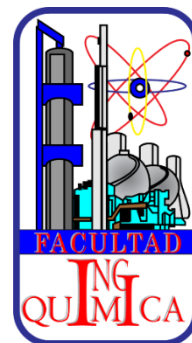




Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería Química



TESIS

**“Diseño de un sistema de control para el ajuste del TRH y
Temperatura de un reactor de flujo ascendente a escala laboratorio
para estudios de degradación”**

PRESENTA

ISRAEL NEFTALI ROBLES RUIZ

**Para obtener el grado de
Licenciatura en Ingeniería Química**

ASESOR DE TESIS

DRA. MAYRA RUIZ REYES

H. Puebla de Zaragoza, 24 de febrero de 2025

Agradecimientos

A Dios porque no conforme con darme los bienes celestiales, también me ha dado dones intelectuales

A mi papá por solventar los gastos para mi educación y enorgullecerse de mi crecimiento

A mi mamá por fomentar en mí el gusto por el saber y la investigación en la niñez

A mi asesora de tesis por fiarse de mí para realizar este trabajo

A mí mismo por haber sabido usar las dificultades que se presentaron durante el presente trabajo de tesis para desarrollarme como estudiante y persona

INDICE

INDICE	i
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 HIPÓTESIS	4
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. ANTECEDENTES	5
Introducción.....	1
2.1 Vinaza	3
2.2 Descripción de un RAFA.....	4
2.3 Control de Bioprocesos	5
2.4 Proceso de digestión anaerobia	7
2.5 Turbidez en el agua residual	9
2.6 Tipos de lazos de Control	10
2.7 Selección de variables manipuladas, medibles y controladas	13
2.8 Función de transferencia.....	15
2.8.1 Calcular una función de transferencia a través de datos experimentales	15
2.8.2 Criterio de estabilidad.....	17
2.9 Señales estándares de entrada.....	19
2.10 Respuesta transitoria y respuesta en estado estacionario	20

2.11 Tipos de controladores y acciones correctivas.....	21
2.12 Técnicas de sintonización.....	24
2.13 Interfase de control.....	27
2.13.1 Pantallas de información	28
2.13.2 Controladores	30
2.13.3 Gestión de la interacción	30
2.14 Lenguajes de programación.....	31
3. METODOLOGÍA.....	33
Introducción.....	1
3.1 Caracterizar el sistema de reacción.	2
3.1.1 Caracterización del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	2
3.1.2 Caracterización de la vinaza.....	5
3.2 Selección y programación de los elementos de control.....	6
3.2.1 Selección de los elementos de control para el lazo TRH	8
3.2.2 Programación de los elementos de Control para el lazo del TRH.....	9
3.2.3 Selección de los elementos de control para el lazo de temperatura.....	12
3.2.4 Monitoreo de Cambios en la conductividad durante el proceso de clarificación de Vinaza.....	13
3.2.5 Calibración de los conductímetros	16
3.2.6 Programación en Arduino.....	17
3.3 Identificación del Sistema	20
3.3.1 Herramienta System Identification de Matlab.....	20
3.3.2 Validación de los modelos obtenidos.....	21
3.3.3 Obtención de los parámetros del controlador en Simulink.....	21
3.4 Desarrollo de la Interfaz de Control para el procesamiento de Señales	22
3.5 Desarrollo del Lazo de Control de TRH.....	24

3.6 Desarrollo del lazo de control para el ajuste térmico	24
3.7 Prueba del Sistema de Control elaborado.....	24
4. RESULTADOS.....	25
Introducción.....	1
4.1 Datos obtenidos al diluir la vinaza con agua desionizada en el RAFA	2
4.2 Valores de Conductividad.....	4
4.3 Identificación del Sistema	6
4.3.1 Datos de la primera parte del experimento.....	8
4.3.2 Datos de la segunda parte del experimento	11
4.3.3 Datos de la tercera parte del experimento	14
4.3.4 Elección definitiva de la función de transferencia.....	17
4.4 Sintonización del lazo de control de TRH.....	19
4.4.1 Sintonización del Controlador por el método CHR	21
4.4.2 Señales de entrada de prueba.....	25
4.5 Interfaz de Control.....	29
4.5.1 Lazo de Temperatura	30
4.5.2 Lazo de TRH	31
4.5.3 Prueba de la Interfaz de Control.....	33
5. CONCLUSIONES.....	36
REFERENCIAS	2

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de un UASB (2024).....	5
Figura 2 Tipos de sensores (Stanbury, y otros, 2016).....	7
Figura 3 Etapas del proceso de digestión anaerobia.....	8
Figura 4 Efectos del tiempo de retención hidráulica en el proceso de digestión anaerobia	9
Figura 5. Diagrama de un Lazo Abierto de Control (Ogata, 2010).....	10
Figura 6. Lazo Cerrado de Control (Ollero, y otros, 2006).....	11
Figura 7 Lazo de control de temperatura típico (Seborg, y otros, 2011).....	12
Figura 8 Lazo de control de nivel típico (Seborg, y otros, 2011).....	12
Figura 9 Localización de tomas de muestra para un proceso de fermentación (Kosseva, y otros, 2013).....	13
Figura 10. Variables de un proceso y su relación	14
Figura 11 Función de transferencia de un sistema.....	15
Figura 12 Criterio de estabilidad según el lugar de los polos.....	18
Figura 13. Criterio de estabilidad para los sistemas de tiempo discreto (Seborg, y otros, 2011)18	
Figura 14. Comportamiento sigmoidal de un sistema	25
Figura 15. Principales componentes de la Interfaz humano-máquina.....	28
Figura 16. Información necesaria para diseñar la HMI y sus fuentes	29
Figura 17 Reactor de flujo ascendente a escala laboratorio.	2
Figura 18. DFP del proceso experimental de clarificación de vinaza	4
Figura 19. Diluciones a diferentes porcentajes de vinaza en las celdas del equipo de absorbancia	5
Figura 20. Valores de Turbidez con respecto al porcentaje de vinaza en la mezcla vinaza-agua. 5	
Figura 21. Datos obtenidos de absorbancia a diferentes disoluciones de vinaza	6
Figura 22. Propuesta de Instrumentación para el proceso a escala laboratorio de clarificación de vinaza.....	7
Figura 23. Boma peristáltica para Arduino.....	8
Figura 24 Turbidímetro Gravity	9
Figura 25 Diagrama de funcionamiento del lazo de control de TRH.....	10
Figura 26. Ecuación del flujo en función del PWM.....	11
Figura 27. Gráfica de relación PWM y valores de NTU	11
Figura 28 Diagrama de funcionamiento de Lazo de Control de Temperatura	13

Figura 29. Adecuación del Proceso para la identificación del Sistema y para observar los cambios de conductividad a la entrada y salida del reactor	15
Figura 30. Curva de calibración del conductímetro uno	17
Figura 31. Curva de calibración del conductímetro dos	17
Figura 32. Programa de Arduino de sensores y obtención de datos	19
Figura 33. Variables relacionadas para encontrar el modelo matemático del sistema.....	20
Figura 34. Jerarquización de la información en el diseño de la interfaz de Control	23
Figura 35. Valores de Turbidez y TRH con respecto al tiempo en la primera parte del experimento	2
Figura 36. Valores de Turbidez y TRH con respecto al tiempo en la segunda parte del experimento	3
Figura 37. Valores de Turbidez y TRH con respecto al tiempo en la tercera parte del experimento	4
Figura 38. Valores de CE a la entrada y salida del RAFA	5
Figura 39. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales	7
Figura 40. Raíces de los modelos obtenidos con los datos unidos de los tres experimentos	8
Figura 41. Prueba de blancura de los 4 modelos obtenidos con los datos unidos de las tres partes del experimento	8
Figura 42. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales de la primera parte del experimento.....	9
Figura 43. Lugar de las raíces de los modelos obtenidos con los datos de las tres partes del experimento	10
Figura 44. Prueba de Blancura	10
Figura 45. Prueba de independencia de los modelos de segundo orden.....	11
Figura 46. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales de la segunda parte del experimento.....	11
Figura 47. Raíces de los modelos continuos del segundo experimento	12
Figura 48. Raíces de los modelos discretos del segundo experimento.....	13
Figura 49. Prueba de blancura de los modelos discretos obtenidos en el segundo experimento	13
Figura 50. Análisis de residuales de los sistemas continuos de los modelos obtenidos con los datos de la segunda parte del experimento	14

Figura 51. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales de la tercera parte del experimento	15
Figura 52. Raíces de los modelos obtenidos con los datos de la tercera parte del experimento	16
Figura 53. Prueba de blancura para los modelos obtenidos con los datos de la tercera parte del experimento	16
Figura 54. Prueba de independencia de los modelos de los datos de la tercera parte del experimento que pasaron la prueba de blancura.....	17
Figura 55. Prueba de blancura de los tres modelos seleccionados a) Modelo con los datos de la primera parte del experimento, b) Modelo con los datos de la segunda parte del experimento, c) Modelo con los datos de la tercera parte del experimento	18
Figura 56. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales del modelos seleccionado	19
Figura 57. Comportamiento del sistema en lazo abierto.	20
Figura 58. Comportamiento del modelo seleccionado al ruido blanco	21
Figura 59. Acercamiento de la gráfica de Simulink del sistema para obtener los valor de a) θ y b) τ	22
Figura 60. Desempeño de los controladores con la técnica de sintonización CHR	23
Figura 61. Respuesta del Control Proporcional con una ganancia de 50	24
Figura 62. Desempeño del Controlador P frente a la entrada de ruido blanco	24
Figura 63. Desempeño de los controladores PI y PID con la sintonización CHR	25
Figura 64. Comportamiento del controlador PI a la entrada de ruido blanco	26
Figura 65. Respuesta del controlador PI a la entrada de ruido blanco con una ganancia proporcional de 0.1	26
Figura 66. Señal de Respuesta del Controlador PI a la entrada impulso unitario	27
Figura 67. Prueba de cambios sostenidos al lazo de control	28
Figura 68. Comportamiento de los controladores PI y PID con una ganancia proporcional de 0.1	28
Figura 69. Pestaña principal de la interfaz de control donde se observa todo el sistema de digestión de vinaza	29
Figura 70. Pestaña del lazo de control de Temperatura	30
Figura 71. Alarma activada por temperatura alta en el sistema.....	31
Figura 72. Pestaña del lazo de control del TRH.....	32
Figura 73. Funcionamiento manual de la interfaz del lazo de TRH.....	33

Figura 74. Funcionamiento de la interfaz de control en modo automático 34

Índice de Tablas

Tabla 1 Valores de DQO de la vinaza reportados en la literatura	3
Tabla 2 . Valores del método de Z-N para sistemas con comportamiento sigmoideal en lazo abierto	25
Tabla 3 Método Ziegler-Nichols de lazo cerrado	26
Tabla 4. Método CHR para control regulatorio sin sobreimpulso.....	27
Tabla 5. Características de funcionamiento de las bombas propuestas para armar el lazo de control de TRH	8
Tabla 6. Características de funcionamiento actuadores para armar el lazo de control de temperatura.....	12
Tabla 7. Valores de conductividad para la vinaza reportada por la literatura	14
Tabla 8. Valores analógicos del conductímetro 1 a diferentes diluciones	16
Tabla 9. Valores analógicos del conductímetro 2 a diferentes diluciones	16
Tabla 10. Modelos obtenidos con los datos de las tres partes del experimento	7
Tabla 11. Modelos obtenidos con los datos de la primera parte del experimento	9
Tabla 12. Modelos obtenidos con los datos de la segunda parte del experimento	12
Tabla 13. Modelos obtenidos con los datos de la tercera parte del experimento.....	15
Tabla 14. Funciones de Transferencia obtenida de los datos experimentales	17
Tabla 15. Valores de los parámetros necesarios para realizar la sintonización.	21
Tabla 16. Valores de las constantes para los controladores según el método CHR.....	23

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulica	6
Ecuación 2. Ecuación de la entrada escalón	19
Ecuación 3. Ecuación de la entrada rampa	19
Ecuación 4. Ecuación de la entrada pulso rectangular	19
Ecuación 5. Ecuación de la entrada sinusoidal.....	20
Ecuación 6. Respuesta de un sistema $c(t)$. (Ogata, 2010)	20
Ecuación 7. Señal de error.....	21
Ecuación 8. Ecuación de la acción Proporcional.....	21
Ecuación 9. Ecuación de la acción Integral.....	22
Ecuación 10. Ecuación del controlador PI	22
Ecuación 11. Ecuación de la acción derivativa	22
Ecuación 12. Ecuación del controlador ON-OFF.....	23
Ecuación 13. Ecuación del período último.....	25
Ecuación 14. Ecuación que de NTU con respecto al voltaje medido por el fototransistor	9
Ecuación 15. Formato estándar de la ecuación cuadrática que relaciona Voltaje con Turbidez. 10	
Ecuación 16. Traslación de la ecuación original tomando en cuenta el valor experimental del agua desionizada.....	10
Ecuación 17. Función de transferencia primer orden.....	21
Ecuación 18. Función de transferencia segundo orden	21
Ecuación 19. Función de transferencia con un polo y un cero.....	21
Ecuación 20. Función de transferencia con dos polos y ceros.	21

RESUMEN

Los métodos biológicos para el tratamiento de aguas residuales son los mayormente empleados. Sin embargo, estos procesos ofrecen poca flexibilidad en el diseño y funcionamiento. El diseño de procesos para la eliminación de contaminantes impulsados en mejorar la eficiencia y minimizar costos operativos ha generado la necesidad de contar con mejores herramientas de diseño de plantas de tratamiento de efluentes industriales. Tomando en consideración que estos métodos deben incluir estudios de operatividad del proceso (flexibilidad, capacidad de control y resiliencia) este trabajo de tesis se centra en el desarrollo de una herramienta para el estudio de la flexibilidad y controlabilidad de la etapa de reacción, empleando como caso base el efecto del Tiempo de Retención Hidráulica requerido para la degradación de solutos disueltos o suspendidos.

El estudio se centra en la selección de elementos de control y su correspondiente programación para el desarrollo de un lazo de control y seguimiento en tiempo real de la variación de contaminantes cuyas propiedades colorimétricas o de conductividad puede ser empleadas como una funcionalidad de su concentración presente en el sistema y así utilizarse como variable a controlar en el lazo de control. Tomando como base lo reportado en la literatura respecto a los efectos del Tiempo de Retención Hidráulica en el comportamiento del proceso, así como, en los gradientes de concentración y condiciones térmicas, el diseño del lazo de control toma este parámetro como principal variable a manipular. Para la programación de los sensores se realizaron pruebas experimentales empleado como muestra soluciones de vinaza, en donde las lecturas de los sensores programados fueron comparadas con lecturas obtenidas aplicando técnicas analíticas a nivel laboratorio y/o pruebas comparativas con métodos alternos de medición según el sensor. En el diseño del modo de control a programar se realizaron entornos virtuales a partir de los datos experimentales en Matlab. Finalmente, el lazo de control y sistemas de seguimiento en tiempo real se aplicaron en un prototipo experimental de un reactor de flujo ascendente escala laboratorio empleando como flujo de trabajo soluciones de vinaza preparadas en el laboratorio.

La capacidad de adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real en función de un ajuste automático o manual del Tiempo de Retención Hidráulica permitirá realizar estudios de flexibilidad y controlabilidad del proceso a diseñar, así como estudios dirigidos a las identificación o caracterización hidráulica del sistema. En este sentido, y con el fin de otorgar

una mayor accesibilidad a este tipo de tecnologías se seleccionaron plataformas de programación (Matlab y Arduino) que permiten el manejo y procesamiento de señales con el mínimo costo económico y accesible a entornos de investigación y comercialización sin sacrificar el tiempo de respuesta del lazo de control o generación de base de datos en tiempo real.

1.INTRODUCCIÓN

Introducción

El aumento de la demanda de agua derivado de las actividades antropogénicas ha provocado un aumento global de la producción de aguas residuales y contaminación cuerpos de agua. Por lo que, la eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales requiere de procesos efectivos. Las metodologías actuales son complejas y costosas por lo que la generación de consorcios, así como la optimización o diseño de nuevas alternativas es de gran importancia para abordar la problemática relacionada con los efluentes (AL Gonçalves, 2017). En este sentido, el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), como parámetro en el proceso de tratamiento de aguas residuales, tiene un gran impacto en la calidad del agua trata y el consumo de energía del proceso.

Diversos estudios han empleado el TRH como medio de optimización de rendimientos de degradación de contaminantes (Wei, y otros, 2023; Jamal, y otros, 2022; Leicester, y otros, 2020), minimización de ensuciamiento en membranas o soportes (Deng, y otros, 2016), así como desarrollo de modelos basados en datos operativos y parámetros de desempeño de procesos de tratamientos de aguas residuales (Wei, y otros, 2023; Jamal, y otros, 2022). Lo anterior ha sido motivación para desarrollar estrategias de control para plantas de tratamiento de efluentes residuales basado en modelos de simulación o características del influente.

El empleo de controladores Proporcional-Integral. (PI), así como bucles de control de reactivos como el oxígeno (para sistemas aerobios) y sistemas de monitoreo en tiempo real han mostrado capacidad de controlar los niveles de contaminantes o nutrientes claves (nitratos en sistemas anaerobios) para el desempeño del proceso al emplear el enfoque Control de Supervisión y Anulación.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de los efluentes derivados de actividades antropogénicas contienen contaminantes cuyas propiedades colorimétricas o de conductividad determinan las necesidades de los tratamientos primarios y secundarios. En los tratamientos primarios mejorados químicamente se requieren sistemas de control retroalimentados para optimizar la dosificación de insumos que permitan controlar la turbidez del efluente en los puntos de ajuste deseados, ya que la turbidez está altamente relacionada con Demanda Química de Oxígeno (DQO). Así mismo en el tratamiento secundario la turbidez es un parámetro que está relacionado con la DQO y con la estabilidad en la biomasa. En este sentido, el control y monitoreo de la turbidez es esencial para mantener los estándares de calidad del agua y cumplimiento con los requisitos regulatorios. Si bien la turbidez está relacionada con la concentración de sólidos suspendidos y disueltos, estos últimos deben tener propiedades colorimétricas o afectar significativamente las propiedades ópticas del agua para poder ser detectados por sensores de turbidez. Para sólidos disueltos incoloros o con baja afectación en las propiedades ópticas del agua la conductividad puede ser un parámetro de apoyo al seguimiento de desempeño o eficacia del proceso.

Uno de los efluentes derivados de actividades antropogénicas que actualmente carece de un tratamiento óptimo es la vinaza por lo que el desarrollo de un sistema de control que pueda ser empleado para el desarrollo, diseño o caracterización de nuevas tecnologías dirigidas a su tratamiento es de gran importancia.

La vinaza es el principal desecho orgánico de la producción del alcohol y del destilado de fermentados, se encuentra entre los residuales orgánicos de mayor efecto contaminante sobre la flora y fauna del planeta. Suele ser vertida en cuerpos de agua como material de desecho con poco a nulo tratamiento, provocando la contaminación del agua y el deterioro del medio ambiente (SAGARPA, 2016).

Una de las alternativas para el aprovechamiento de este residuo es la producción de metano a través de la Digestión Anaerobia (DA) de la vinaza, produciendo así biogás. Además, los lodos restantes de este proceso podrían usarse como biofertilizante (SAGARPA, 2016). Este proceso se lleva a cabo en Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA) que es el medio típico por el cual se realiza la digestión de aguas residuales (Mullai, y otros, 2020). Y, para el exitoso funcionamiento del proceso y el planteamiento de un posterior escalamiento se debe llevar el proceso al estado estacionario, para ello se requiere de un sistema de control.

Si bien es cierto que existen sistemas de control típicos para este proceso, se basan en mediciones hechas fuera de línea, lo cual genera retrasos para aplicar las acciones correctivas, además del costo económico que implica realizar el análisis de las muestras por el equipo y personal necesario.

Dentro de las variables que se pueden medir en línea a las aguas residuales está la Turbidez, parámetro que permite conocer el estado del efluente, si es apta para verterse en cuerpos de agua o para consumo humano y está relacionada con la cantidad de sólidos suspendidos y disueltos que contiene el fluido. Relacionado a la turbidez está el tiempo de retención hidráulica (TRH), periodo de tiempo que un fluido permanece en una unidad de tratamiento, de los parámetros más importantes en el diseño y operación de estos reactores, ya que pueden determinar el desarrollo de incrustaciones o adherencias, así como las características en la biomasa y el grado de degradación de los sólidos presentes (Sillero, y otros, 2023). Asimismo, cambios en el TRH aunado a variaciones en la proporción de materia orgánica a microorganismo (MO/M), alteran las características de la biomasa y sus productos metabólicos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Para el correcto funcionamiento de un proceso industrial químico es necesario mantener las variables de proceso estables. Este es el objetivo de un sistema de control. En el caso de la digestión de vinaza, se trabaja con la variable de Temperatura, porque, como en todo bioproceso, es importante mantener la temperatura del medio estable para evitar la muerte de los microorganismos implicados, así como evitar un descenso en el rendimiento del proceso.

Igualmente, el TRH se considera un parámetro crítico que afecta tanto la eficiencia en la degradación o eliminación de un contaminante como la productividad de la biomasa, es necesario el desarrollo de sistemas de control que permitan estabilizar tanto el TRH como las condiciones térmicas del reactor.

En el tratamiento de vinaza, los cambios que sufre al degradar sus componentes se ven reflejados en la turbidez del efluente tras someterse al tratamiento, por lo que se considera parámetro de desempeño. En este sentido, y tomando como base que toda variable a controlar debe ser medible la turbidez se presenta como la variable a controlar por su relación con el estado del proceso de degradación.

1.3 HIPÓTESIS

El ajuste del TRH en función de datos en tiempo real de la turbidez aumenta la efectividad del proceso y mejora la operación de un reactor de flujo ascendente para estudios a nivel laboratorio.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseño de un sistema de control para el ajuste del TRH y Temperatura de un reactor de flujo ascendente a escala laboratorio para estudios de degradación usando como caso base la clarificación de la vinaza.

1. 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar el sistema de reacción.
2. Seleccionar y programar los elementos de control.
3. Desarrollar el lazo de control para el ajuste del TRH en función de la turbidez del efluente del reactor.
4. Desarrollar el lazo de control para el ajuste térmico del reactor.
5. Desarrollar la interfase en Matlab para el procesamiento de señales.

2.ANTECEDENTES

Introducción

En el presente apartado se encuentra el fundamento teórico consultado para la realización del trabajo de investigación, empezando con la descripción de la vinaza y el RAFA, para poder delimitar el área del trabajo de investigación, la digestión anaerobia de la vinaza. Posteriormente, se introduce al ámbito del control de procesos describiendo los parámetros de importancia en los bioprocesos, para luego describir la digestión anaerobia de manera general y el impacto que el tiempo de retención hidráulica tiene en el mismo. Se continúa describiendo brevemente lo que es la Turbidez y el lugar que ocupa en el trabajo de aguas residuales, debido a que la vinaza es considerada un agua residual y en este trabajo de investigación se planteó como el medio por el cual monitorear el proceso.

Luego se entra específicamente al ámbito del Control, comenzando con la descripción de los dos principales lazos de control que existen, abierto y cerrado, después, se van introduciendo el resto de los conceptos básicos, empezando con los componentes que forman un lazo de control, las señales de entrada y salida, la función de transferencia y su obtención a través de datos experimentales.

Así es como se llega a la parte de análisis de estos modelos obtenidos de manera empírica por medio de herramientas estadísticas como son la prueba de blancura y la prueba de independencia. Así mismo, se habla de la estabilidad del sistema, criterio importantísimo para poder determinar la utilidad de un modelo matemático, así como la utilización de la señales de entrada estándar para terminar de conocer el comportamiento del modelo, para esto fue importante conocer y entender los conceptos de respuesta transitoria y respuesta en estado estacionario, que permiten describir fácilmente el comportamiento de un sistema control.

Después, se pasa a describir el tipo de controladores y las acciones correctivas que son el método por el cual se mantiene un proceso en régimen permanente, se hablan de los controladores PID y de dos posiciones y para poder encontrar los parámetros de estos controladores de forma más sencilla se describen dos métodos de sintonización, el método Ziegler-Nichols y el método CHR. El primero por ser el más utilizado y que se contempla en la formación del Ingeniero Químico y el segundo debido a que es un método con mejor rendimiento y que aplica para sintonizar este tipo de sistema de tipo regulatorio.

Finalmente, en esta sección se menciona la interfaz de control, parte integra del sistema de control y necesaria para que el operador pueda utilizar eficientemente el lazo de control que se desarrolló,

y como todo sistema de control se utilizaron lenguajes de programación, que se describen brevemente al final de esta sección.

2.1 Vinaza

La vinaza proviene de la producción de etanol y del destilado de fermentados, por cada litro de alcohol que se produce se obtienen de 12 a 15 litros de vinaza (SAGARPA, 2016). Se caracteriza por ser una sustancia ácida, su pH va de 3.5 a 5, presenta un color café oscuro, tiene Sólidos Totales Suspendidos (TSS) en una magnitud de 10^4 mg/L. Consiste en 93% agua y 7% sólidos orgánicos y minerales, de estos 75% son biodegradables y el resto son minerales (Marafon, y otros, 2020). Y si bien la vinaza tiene un alto contenido de materia orgánica que puede ser fuente de nutrientes para las plantas, por esta misma razón es que al verterse en cuerpos de agua la vinaza consume el oxígeno propio del agua, además al tener un pH corrosivo la vinaza perjudica la absorción de nutrientes por las plantas.

Tabla 1 Valores de DQO de la vinaza reportados en la literatura

Valores del DQO reportados en la literatura	
Fuente	Valor DQO [mg/l]
(Caputo, 2020)	15 344
(García, 2012)	125 424
(De Oliveira Lima, y otros, 2023)	29 817
(Robles-González, y otros, 2012)	56 068 – 125 136
(Ibarra Camacho, y otros, 2018)	51 530 – 71 200

Al ser un agua residual el valor de la demanda química de oxígeno (DQO) es relevante para el estudio de la vinaza, ya que este valor denota la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia que se encuentra en ella, y por lo tanto nos permite tener una magnitud de la cantidad de materia orgánica presente en la vinaza. Además de que este es uno de los parámetros utilizados para medir la efectividad de un tratamiento biológico en el agua residual. La literatura reporta un rango de 15 344 a 125 424 mg/l de DQO para los diferentes tipos de vinaza (Tabla 1).

Cabe destacar que la **NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021** permite hasta un valor de 210 mg/l en los efluentes que las industrias descargan a los cuerpos de agua.

Por otro lado, tan sólo las compañías tequileras en México, al producir 577.2 millones de litros de Tequila en 2023 (Statista, 2024), produjeron alrededor de 7,792.2 millones de litros de Vinaza. Es decir, 25 veces la capacidad de la Presa Manuel Ávila Camacho en Puebla, o casi 9 veces el volumen de una piscina olímpica cada día. La mayoría de ese volumen sin darle un tratamiento adecuado para ser vertido a cuerpos de agua.

Existen varias alternativas para aprovechar la vinaza, la más usada es el fertirriego, que consiste en regar los sembradíos con vinaza para que los cultivos aprovechen los nutrientes presentes en esta, sin embargo, en caso de sobrepasar cierto límite el pH del suelo presentará cambios importantes que dañen el metabolismo de las plantas y provoquen daños a la producción. Por otro lado, existe la posibilidad de producir biogás a través de la digestión anaerobia (DA) de la vinaza, y utilizar los lodos resultantes de estos procesos como un fertilizante. Este proceso se lleva típicamente en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

2.2 Descripción de un RAFA

El Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA o UASB en inglés) es un proceso de un sólo biorreactor tubular que suele operar en régimen continuo, donde la recirculación de lodos y la agitación mecánica son mantenidas al mínimo o incluso completamente omitida y que en particular tiene equipado en la parte superior un sistema de separación de sólidos y de gas (Lettinga, y otros, 1980). Se utiliza principalmente para el tratamiento de aguas residuales por el método de digestión anaerobia. El influente ingresa al reactor por la parte inferior del mismo, donde se encuentran los microorganismos, el fluido permanece un tiempo dentro del reactor para que se lleve a cabo la digestión anaeróbica. (Figura 1).

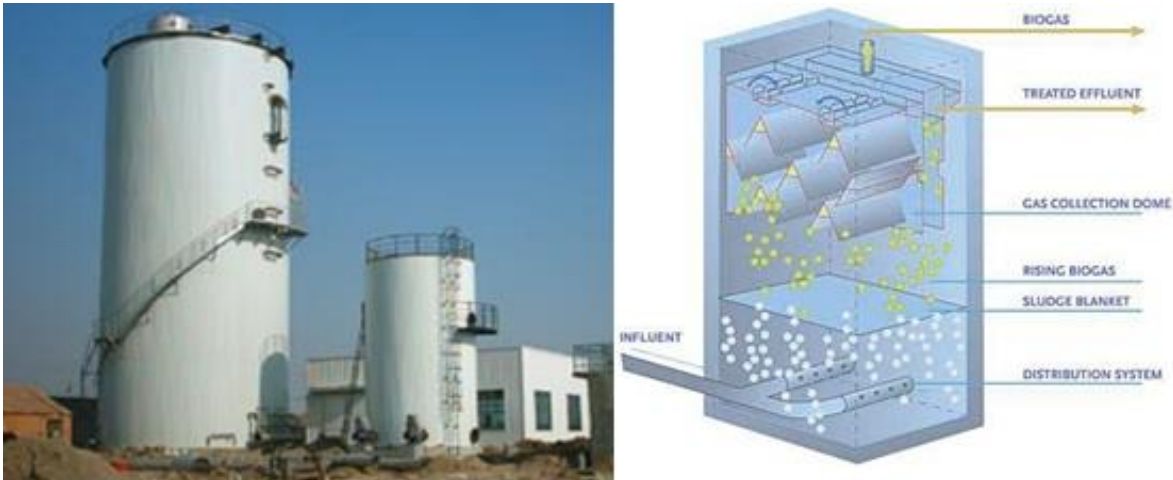


Figura 1. Esquema de un UASB (2024)

A pesar de que la tecnología de digestión es ampliamente conocida y estudiada esta es muy sensible a las perturbaciones del proceso, por lo que es relevante utilizar sistemas de control y monitoreo en línea para la operación eficiente del proceso. En un reactor para la degradación de contaminantes, el sistema de control típico consta de dos componentes, seguimiento y control. En esos sistemas se monitorea los parámetros que son sensibles a las perturbaciones del proceso y estos datos se envían al sistema de control para regular (o controlar) esos parámetros al valor deseado. La estrategia de control pueden ser simple como un control de retroalimentación de encendido/apagado, complejas como lógica difusa adaptativa, control de redes neuronales o sus combinaciones (Batstone, y otros, 2004; Pind, y otros, 2003). Sin embargo, un sistema de control avanzado podría equipararse con técnicas básicas de seguimiento; así mismo, las estrategias de control simples podrían compensarse con equipos avanzados de monitoreo. En este sentido, la implementación de dispositivos electroquímicos, cromatográficos y espectroscópicos para el monitoreo y control en línea del proceso de degradación puede ser empleada tanto en sistemas de control de lazo convencionales o sistemas de control avanzado (Duc, y otros, 2015).

2.3 Control de Bioprocesos

En los bioprocesos se suelen tomar en cuenta principalmente las siguientes variables de estado: pH, temperatura, concentración de oxígeno media, concentración del sustrato, velocidad del flujo, etc. (Doran, 2013) Debido a su relación con el comportamiento de los microorganismos que participan en la transformación del sustrato.

Sin embargo, no todas estas variables son variables a controlar, por ejemplo, el pH debe ser monitoreado para mantener las condiciones ideales para el microorganismo con el cual se trabaja,

pero no se mide pretendiendo mantenerlo en un valor específico (Stanbury, y otros, 2016). En este trabajo de investigación las variables que nos interesa monitorear, por su importancia en la DA es la temperatura, y por la información que podemos obtener de ella de manera simple es la Turbidez.

Por otro lado, los microorganismos encargados de la digestión tienen un rango de temperatura en el que pueden sobrevivir y una temperatura óptima, que es aquella con la cual se logra un mayor rendimiento en la producción de productos como metano o metanol.

Para efluentes con sólidos disueltos o suspendidos el seguimiento de la turbidez del fluido es importante ya que va de la mano con el estado actual del proceso en cuanto al grado de digestión logrado. En el caso de la vinaza, esta presenta una coloración marrón oscuro la cual al avanzar el proceso de degradación se va clarificando.

Otro parámetro importante, no sólo en los bioprocesos, sino en cualquier reactor es el tiempo de retención hidráulica (TRH), que es la razón entre el volumen de operación del reactor y el caudal del fluido que entra al reactor (Ecuación 1); es decir, es el tiempo que el material o sustrato permanece en el recipiente. Mientras más largo sea el TRH mayor será el grado de conversión de los reactivos en el producto final.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulica}$$

Igualmente, la configuración de los sensores es una parte crítica de todo sistema de control. Según Stanbury, y otros. (2016) existen tres tipos de sensores según su aplicación para el control del proceso (Figura 2).

En el caso de los bioprocesos es común encontrar sensores de tipo off line, ya que muchas veces la información necesaria para monitorear el proceso no es una simple variable de estado, como la temperatura o presión; sino que alguna característica del afluente que se obtiene al hacer pruebas analíticas como la DQO, Sólidos Totales, Densidad o incluso un análisis del estado de los microorganismos presentes en el bioproceso.

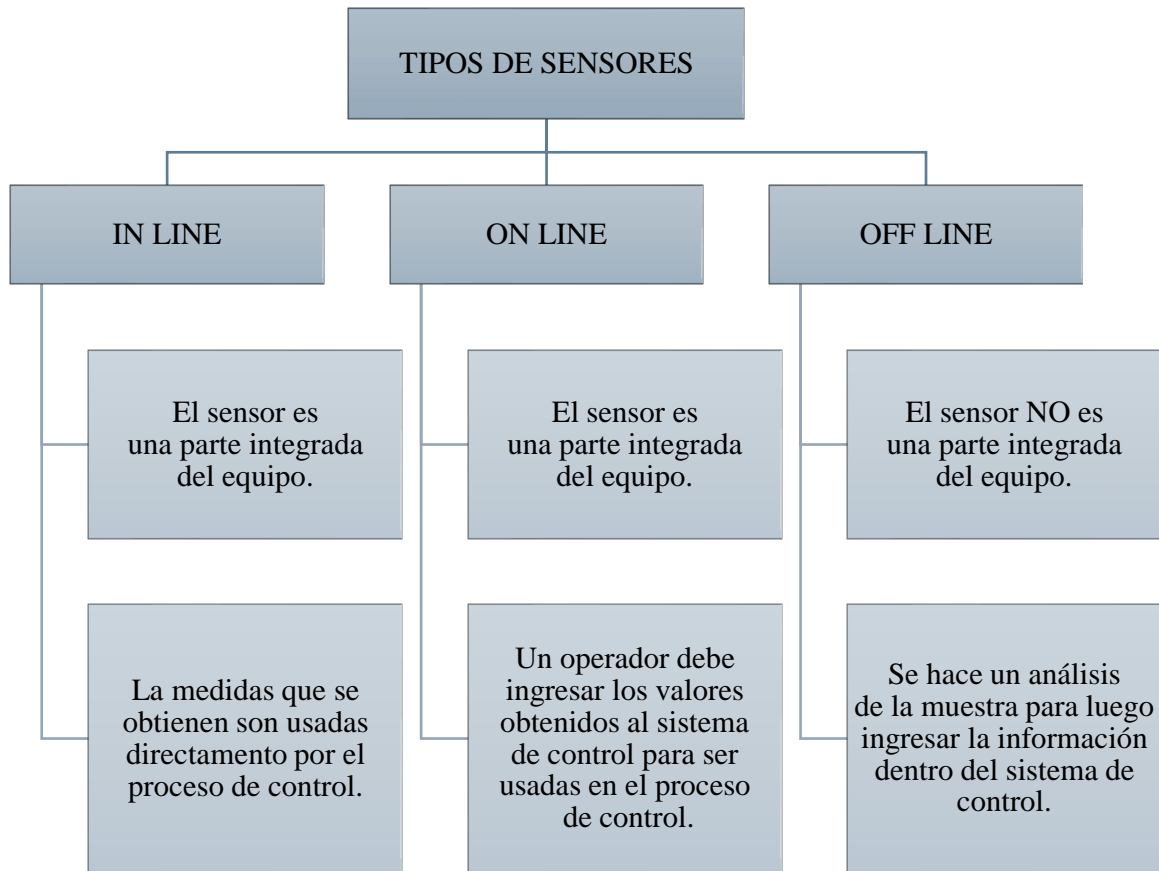


Figura 2 Tipos de sensores (Stanbury, y otros, 2016)

Precisamente este tipo de mediciones provocan una disminución en la efectividad del sistema de control, ya que para obtener los valores reportados por las pruebas analíticas se necesita de un intervalo de tiempo de algunas horas, lo cual provoca un retraso en la implementación de las acciones correctivas, aunado a que al ser pruebas analíticas entra la posibilidad de error en la medición por factor humano.

2.4 Proceso de digestión anaerobia

El complejo proceso de la digestión anaerobia (DA) consta de 4 fases, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Figura 3). En la fase de hidrólisis, los polisacáridos, lípidos y proteínas presentes en la vinaza se transforman en glucosa, ácidos grasos y aminoácidos, respectivamente. En la fase de acidogénesis, como su nombre lo indica, las bacterias convierten la glucosa y los aminoácidos en ácidos orgánicos (butírico, acético, propiónico, etc.), además de CO₂, H₂ y amonio, asimismo esta fase da lugar al Metanol y Etanol. En la fase de acetogénesis,

sólo se mantienen el H₂, CO₂, Ácido acético y Metanol. Finalmente en la metanogénesis los compuestos anteriores dan lugar al Metano, junto con CO₂ y agua. (Mostafa, y otros, 2019).

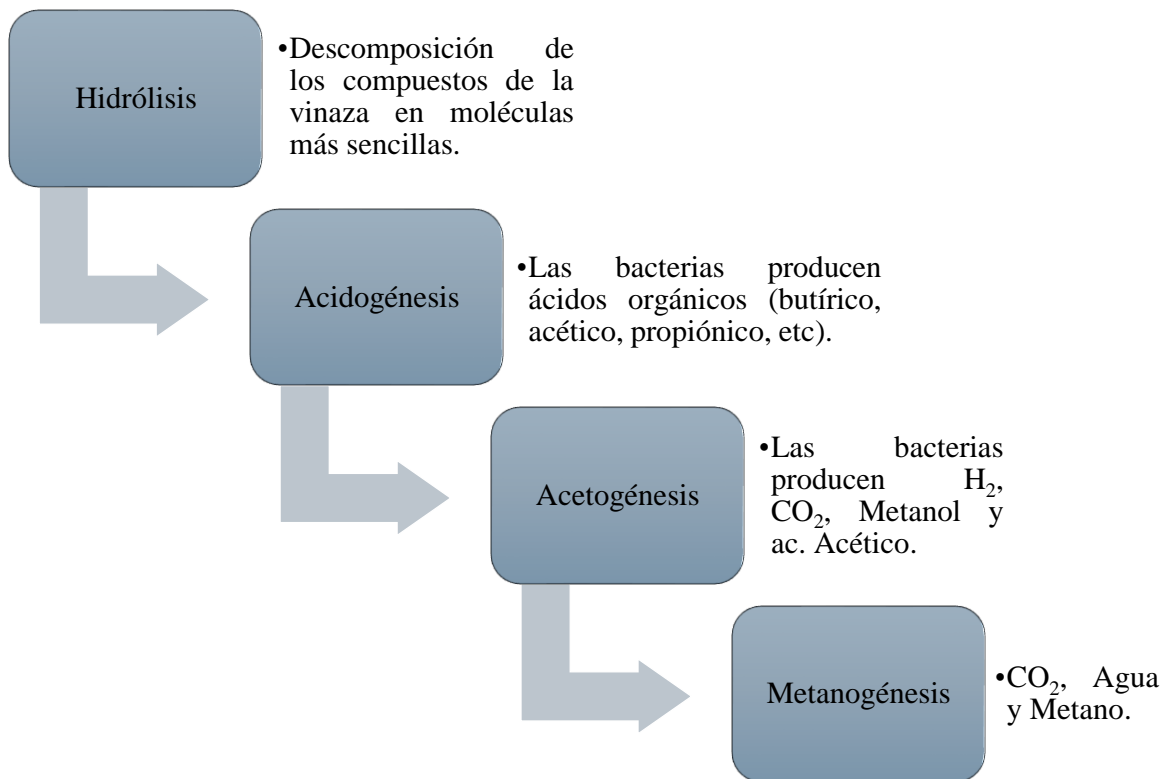


Figura 3 Etapas del proceso de digestión anaerobia

Debido a que las bacterias presentes en los lodos son quienes dirigen la DA cobra importancia el TRH (Figura 4), ya que cualquier microorganismo necesita su tiempo específico para consumir su sustrato favorito y sintetizar el producto (Mostafa, y otros, 2019). En caso de que el TRH no sea el óptimo se producirá una actividad metabólica desfavorable por parte de los microorganismos.

Un TRH prolongado puede provocar la muerte de microorganismo por la escasez de nutrientes, y en caso de haber un exceso de materia orgánica disponible (que se puede traducir en un TRH corto) las bacterias metanogénicas se inhibirán debido a que las bacterias acidogénicas procesan más rápido la materia orgánica (Mendiola-Rodríguez, y otros, 2022).

Por otro lado, es importante tomar en cuenta que en caso de que haya una velocidad de flujo muy alta, empezará a darse el fenómeno de arrastre de partículas, provocando la salida de la biomasa. Así mismo, conforme el proceso de DA avanza y los componentes dentro de la vinaza se

empiezan a degradar esta se irá clarificando, puesto que la coloración de la vinaza está dada por la cantidad de materia orgánica que esta contiene.

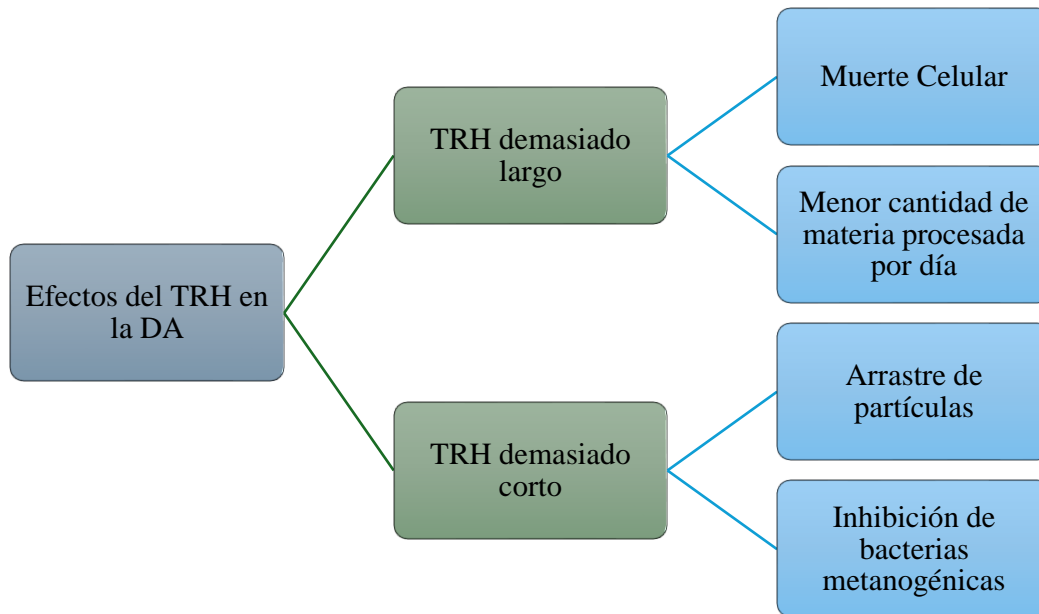


Figura 4 Efectos del tiempo de retención hidráulica en el proceso de digestión anaerobia

2.5 Turbidez en el agua residual

La turbidez en el agua es causada por materia suspendida y disuelta como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica y microorganismos. Para medir la turbidez de una muestra se utiliza un haz de longitud de onda que incide en esta y se toma la cantidad de luz que sale de la misma desde cierto punto de referencia, usualmente desde los 90°. (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2022).

La desviación o dispersión de la luz está relacionada con fenómenos ópticos que dependen de la concentración, el tamaño, y la forma de las partículas, así como la longitud de onda incidente, al ángulo de observación, el índice de refracción del medio de suspensión. En la práctica, en el tratamiento de agua, la turbidez es el indicador más utilizado de la concentración de partículas en el agua (Bratby, 2015).

Los sólidos que puede contener el agua se dividen principalmente en dos tipos, los sólidos suspendidos (SS) y los sólidos disueltos (SD) (Vanous, y otros, 1982). Los primeros son aquellos que pueden ser separados por filtración y para su determinación se usa ese procedimiento, se toma una muestra y se filtra, posteriormente los residuos se secan para eliminar la mayor cantidad

de humedad presentes en ellos y así determinar el peso de los sólidos. En cuanto a los SD se debe realizar un segundo proceso que consiste en evaporar todo el líquido restante hasta que queden solamente sólidos para pesarlos y determinar su cantidad. Tanto SS y SD afectan los valores de turbidez.

Si bien la turbidez está relacionada con la cantidad de sólidos presentes en una muestra, es difícil correlacionar la turbidez con el peso o la concentración del número de partículas de la materia en suspensión porque el tamaño y forma de la partícula afectan las propiedades de dispersión de la luz de la suspensión, por lo cual no existe un medio universal de calibración de turbidez para todas las fuentes de agua.

La primera medida de turbidez fueron las unidades Jackson de turbidez (JTU), utilizadas como parámetro para estudiar hasta donde podía penetrar la luz en el agua, posteriormente se utilizaron las unidades nefelométricas de turbidez (NTU), que son aquellas que resultan del instrumento típico que hace incidir un haz de luz y se mide la cantidad de luz que resta al pasar en un ángulo de 90°.

2.6 Tipos de lazos de Control

Los tipos de lazos de Control se dividen en dos principalmente, según la relación con la señal de entrada. El controlador de lazo abierto es aquel en el cual la acción correctiva no se compara con la variable de entrada (Figura 5), en cambio, el controlador de lazo cerrado recibe constantemente información sobre la señal de entrada para realizar cambios en tiempo real (Figura 6).

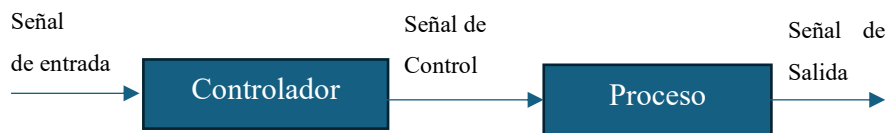


Figura 5. Diagrama de un Lazo Abierto de Control (Ogata, 2010)

Los lazos de Control están formados por 4 elementos principales:

1. Sensor: Instrumentos que miden las variables a controlar, perturbaciones y variables secundarias. Se basan en la medición de un fenómeno físico cuya magnitud está relacionada con el valor de la variable que se desea medir.

2. Transmisor: Es el elemento que convierte la señal del sensor en una señal estándar eléctrica, neumática o digital, que puede ser transmitida a distancia sin verse perturbada y que puede ser entendida por un controlador.
3. Controlador: Recibe la señal de la variable medida y calcula la acción correctiva por medio del algoritmo programado.
4. Actuador: Elemento que manipula la variable de proceso de acuerdo con la acción calculada por el controlador, la cual llega en forma de señal analógica estándar.

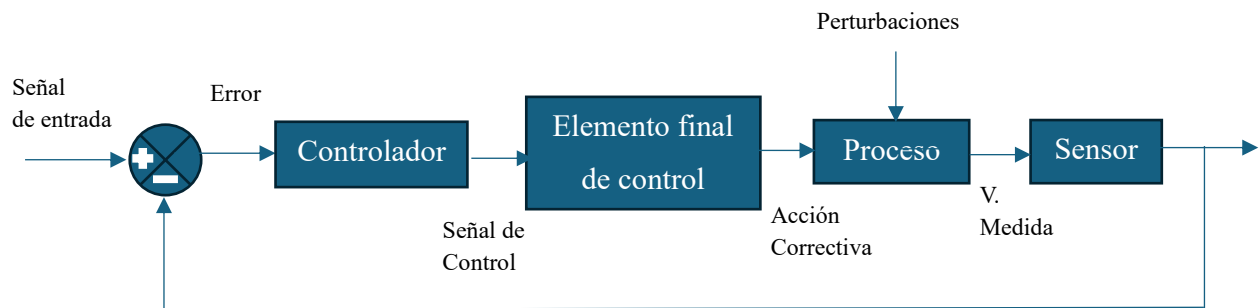


Figura 6. Lazo Cerrado de Control (Ollero, y otros, 2006)

Cabe mencionar que los elementos de control trabajan en ciertos rangos o señales estándar las cuales permiten utilizar instrumentos de diferentes fabricantes. El rango de estas señales es:

1. Neumáticas (3-15 psi)
2. Eléctricas: Corriente 4-20 mA; Tensión 1-5 V / 0-10 V

En la Figura 7, tenemos un lazo de control de temperatura formado por un termopar (sensor), una resistencia eléctrica de calentamiento (elemento final de control) que están conectadas entre sí por un controlador para mantener a cierta temperatura el líquido de un tanque (proceso). Se puede observar por la simbología que el sensor y la resistencia están conectados al controlador por líneas eléctricas. Cabe destacar que el termopar se encuentra dentro del tanque y no en la línea de entrada o salida ya que se quiere controlar la temperatura dentro del tanque, por lo tanto debe ser colocado adecuadamente el sensor para que el controlador tenga un valor adecuado de la temperatura del sistema, igualmente se observa que se implementó un mezclador en el tanque para evitar que haya diferentes perfiles de temperatura y sea lo más homogénea posible dentro del proceso.

El lazo de control para el ajuste térmico del sistema de esta investigación será similar, sólo que la resistencia eléctrica no estaría dentro del tanque del proceso como en el ejemplo, sino en contacto con este.

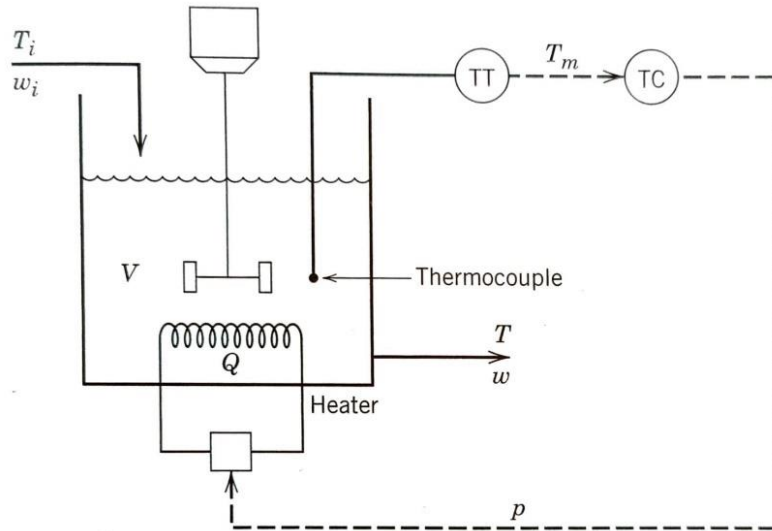


Figura 7 Lazo de control de temperatura típico (Seborg, y otros, 2011).

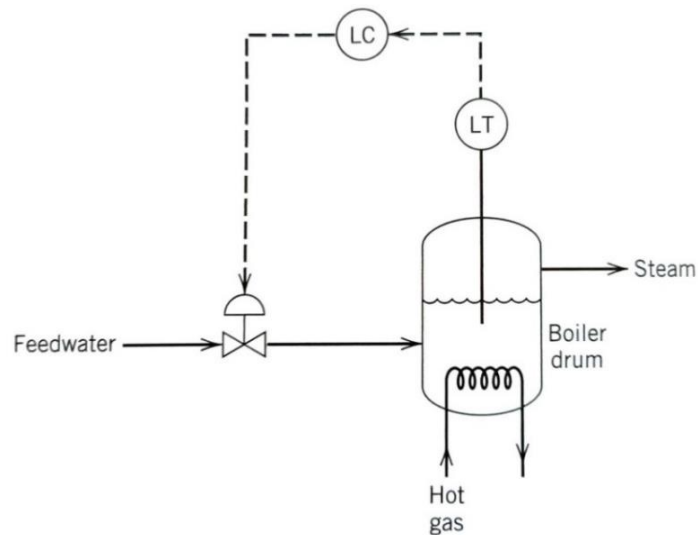


Figura 8 Lazo de control de nivel típico (Seborg, y otros, 2011).

En la Figura 8, se observa un lazo de control de nivel de líquido para un tanque de vapor (proceso), formado por una válvula (elemento final de control), un sensor de nivel (sensor), ambos conectados al controlador por líneas eléctricas. En este caso dependiendo del nivel del líquido se ajusta la apertura de la válvula. Un sistema análogo se realizará para el lazo de TRH, sin embargo, se hará en función de los cambios en la turbidez del líquido y no del nivel dentro del tanque de almacenamiento.

En la Figura 9 se observa un biorreactor donde se toman muestras para hacer los estudios analíticos pertinentes y así obtener información sobre el estado del bioproceso (sensor off line),

esta información se introduce en el software de control para que el sistema tome las acciones necesarias para mantener estable el proceso. En este caso se mide el Carbón Orgánico Total (TOC) del proceso en las líneas de recirculación y de salida. Este tipo de muestreos son los que se llevan a cabo para el control de los biodigestores, entre ellos el RAFA. En este trabajo de investigación se evitarán estos tipos de muestreos para analizar el rendimiento del muestro en tiempo real.

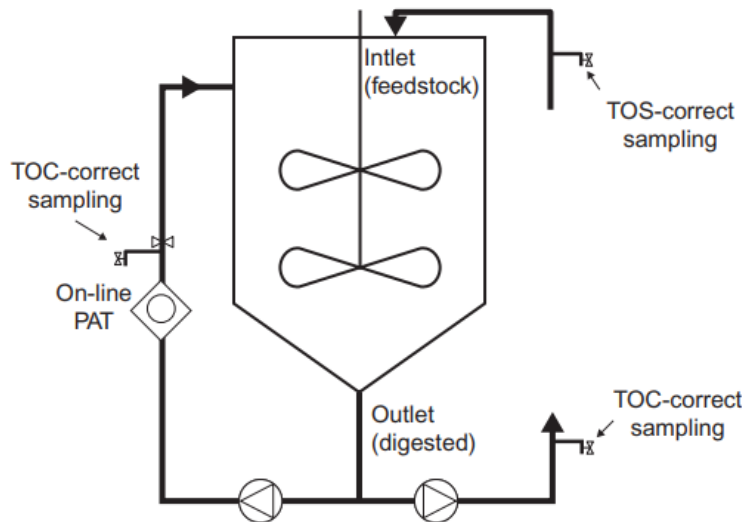


Figura 9 Localización de tomas de muestra para un proceso de fermentación (Kosseva, y otros, 2013).

2.7 Selección de variables manipuladas, medibles y controladas

Para el diseño y análisis de los sistemas de control, es conveniente clasificar las variables del proceso en variables de entrada y variables de salida (Figura 10). Las variables de salida o simplemente salidas son variables dependientes que típicamente son asociados con líneas de salida o condiciones dentro de los tanques, como composición, temperatura, nivel, velocidad del flujo. En cuanto a las variables de entrada, son aquellas que afectan el proceso en una o más variables de salida. Así mismo, las variables de entrada son clasificadas en variables manipuladas o perturbaciones. Las variables manipuladas se usan para ajustar la velocidad del material o energía que entra o sale del sistema. Por definición una perturbación es una entrada que no puede ser manipulada, por ejemplo las condiciones ambientales.

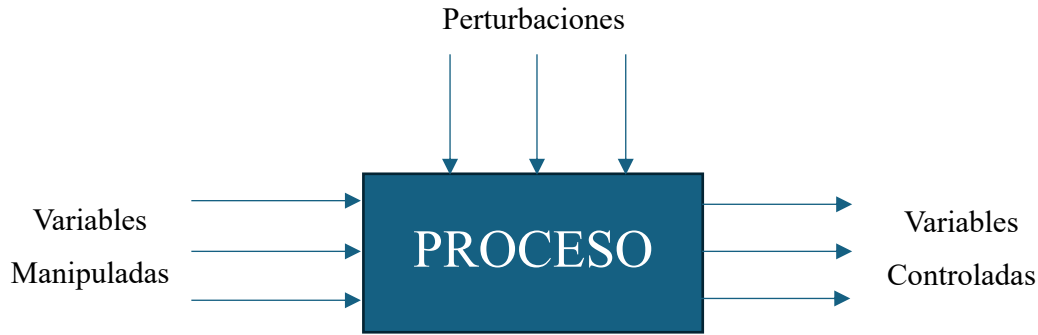


Figura 10. Variables de un proceso y su relación

La mayoría de los procesos dentro de la industria tienen varias variables de entrada y de salida relacionadas entre sí, conforme se aumenta la cantidad de estas, la complejidad del sistema aumenta, por lo tanto, no se suelen escoger todas las variables del proceso, sino las más relevantes para la dinámica del proceso.

Generalmente es deseable tener tantas variables medibles como variables controlables. (Seborg, y otros, 2011) Las variables controlables deben ser medidas de forma on-line y estas medidas deben ser usadas para el control por realimentación.

Consideraciones de planta y objetivos de control han producido directrices o heurísticas para la selección de las variables a controlar tomando en cuenta las salidas disponibles (Newell, y otros, 1989):

1. Todas las variables que no se autorregulen deben ser controladas para que el proceso sea estable.
2. Escoger salidas que deben ser mantenidas dentro de las restricciones de operación del equipo.
3. Seleccionar salidas que son directamente medidas como indicadores de calidad
4. Escoger variables de salida que seriamente interactúen con otra variables controlada.
5. Escoger salidas que tengan favorables características dinámicas y en régimen permanente.

Excepto la primera heurística, ninguna de las anteriores reglas es estricta. De hecho para situaciones específicas estas reglas pueden estar en conflicto o ser inconscientes.

En cuanto a las variables manipuladas, también existen heurísticas para seleccionarlas (Newell, y otros, 1989):

1. Seleccionar las entradas que tienen un efecto importante en las variables controladas.
2. Escoger entradas que rápidamente afecten las variables controladas
3. Las variables manipuladas afectaran las variables controladas directamente más que indirectamente.
4. Evitar el reciclo de perturbaciones

Igualmente, estas heurísticas pueden estar en conflicto, para solventar esta problemática es necesario tener un buen conocimiento de sobre el comportamiento del proceso, tanto en estado dinámico como estado estacionario.

2.8 Función de transferencia.

La función de transferencia $G(s)$ de un sistema es el cociente entre la transformada de la Laplace de la salida $Y(s)$ y la transformada de Laplace de la entrada o señal de excitación $X(s)$ (Figura 11). A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar la dinámica de un sistema mediante ecuaciones algebraicas en el dominio de “s”. El orden de la función está dado por la potencia más alta de la variable s en el denominador.

Conociendo la función de transferencia del sistema se puede comprender su naturaleza estudiando la salida o respuesta para varias formas de entrada. La función de transferencia se puede determinar por medio de modelos matemáticos que relacionen los comportamientos físicos y químicos, sin embargo, en caso de desconocerse la función de transferencia de un sistema, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiándola salida del sistema. Igualmente, es importante comentar que la función de transferencia no aporta información sobre la estructura física del sistema, e incluso sistemas físicamente diferentes pueden tener una función de transferencia idéntica.



Figura 11 Función de transferencia de un sistema

2.8.1 Calcular una función de transferencia a través de datos experimentales

Si bien una función de transferencia se puede desarrollar desde modelos teóricos rigurosos, esta opción puede ser poco práctica por la complejidad del proceso dado, debido a la cantidad de parámetros físicos desconocidos o la cantidad de ecuaciones diferenciales

implicadas. En el caso de este trabajo de investigación en el cual se trabaja con vinaza esto es relevante, debido a que la vinaza tiene un rango de valores amplísimo dependiendo de la fuente de la cual provenga y como ya se comentó el proceso de DA es muy complejo.

Una segunda opción es desarrollar un modelo empírico a partir de datos experimentales, donde se conoce el valor de la señal de entrada y el valor de la señal de salida, a esto se le conoce como identificación de proceso o sistema (Ljung, 1999).

El primer paso para este proceso es decidir que cantidades y variables son importantes para describir el sistema, luego obtener los datos experimentales y teniendo los valores de la señal de entrada y de salida con respecto al tiempo se selecciona la estructura del modelo y el nivel de complejidad de este.

Se utiliza la regresión (lineal o no lineal) para estimar los parámetros desconocidos del modelo. Usando los datos de entrada y salida se puede evaluar la precisión del modelo basado en consideraciones de Estadística. Igualmente se puede validar el modelo con nuevos datos experimentales y verificar el nivel de concordancia de este. Para un modelo dinámico también puede ser usados criterios no estadísticos como el tiempo de respuesta o la estabilidad del sistema (Seborg, y otros, 2011).

2.8.1.1 Análisis estadístico un modelo empírico

En la estadística de datos existe un parámetro conocido como residuales que son la diferencia entre un modelo predictivo y datos experimentales, en otras palabras la parte de los datos que el modelo no pudo reproducir. En el caso del proceso para la identificación de un sistema, el residual es la diferencia, entre el valor de salida calculado por el modelo y el valor real de salida obtenido del conjunto de datos. El análisis de los residuales consiste en dos pruebas, la prueba de blancura y la prueba de independencia (Ljung, 1999). Estas pruebas ayudan a valorar la capacidad del modelo para reproducir nuevos conjuntos de datos.

Se llama prueba de blancura porque se mide si los residuales se pueden tomar como provenientes de ruido blanco, es decir que no guardan correlación estadística. De acuerdo con la prueba de blancura, un buen modelo tiene una función de autocorrelación de residuos dentro del intervalo de confianza de los estimados correspondientes, indicando que los residuales no están correlacionados, indicando que el modelo ha capturado toda la información sistemática de los datos, dejando sólo las fluctuaciones aleatorias.

Por otro lado, según la prueba de independencia, un buen modelo tiene residuales no correlacionados con las entradas pasadas. La evidencia de correlación indica que el modelo no describe como se forma la salida a partir de la entrada correspondiente. Es decir un pico en la gráfica fuera del intervalo de confianza en un retraso k quiere decir que la contribución a la salida $y(t)$ que se origina de la entrada $u(t-k)$ no está adecuadamente descrita por el modelo.

2.8.2 Criterio de estabilidad

Un requerimiento para un sistema dinámica de lazo cerrado es la estabilidad, es decir, la habilidad del sistema para operar bajo una variedad de condiciones sin perder el control. Para los sistemas lineales e invariantes con el tiempo, la estabilidad de un sistema puede ser evaluada por el lugar de los polos de este, es decir, por las raíces que caracterizan al denominador de la función de transferencia (Figura 12). Los criterios para seguir son los siguientes:

1. Si todas las partes reales de los polos son estrictamente negativas, entonces el sistema tiene asintóticamente a cero, es decir no importa cuando grande sea el estado inicial, cuando el tiempo tienda a infinito el valor del sistema será cero.
2. Si alguno de los polos tiene un valor real positivo, entonces siempre será posible encontrar un estado inicial que provoque que en un tiempo dado el valor sea infinito, entonces el sistema es inestable.
3. Si uno de los tiene valor real cero, entonces existe la posibilidad de encontrar un valor inicial que provoque que llegue a infinito, de manera que el sistema es marginalmente estable.
4. En caso de que se encuentren dos polos con valor real cero, entonces el sistema también es inestable.

Cabe mencionar que el lugar de los ceros (raíces del numerador) no son relevantes para este criterio.

En cuanto a los sistemas discretos la zona estabilidad está dentro del círculo unitario $|z| = 1$. Este círculo unitario es el límite entre la zona estable e inestable, así como lo es el eje imaginario en el plano s (Figura 13). Cualquier polo dentro del círculo es un polo estable y fuera de este cualquier polo es inestable. En caso de que un polo esté justo en el círculo unitario, entonces el sistema es marginalmente estable.

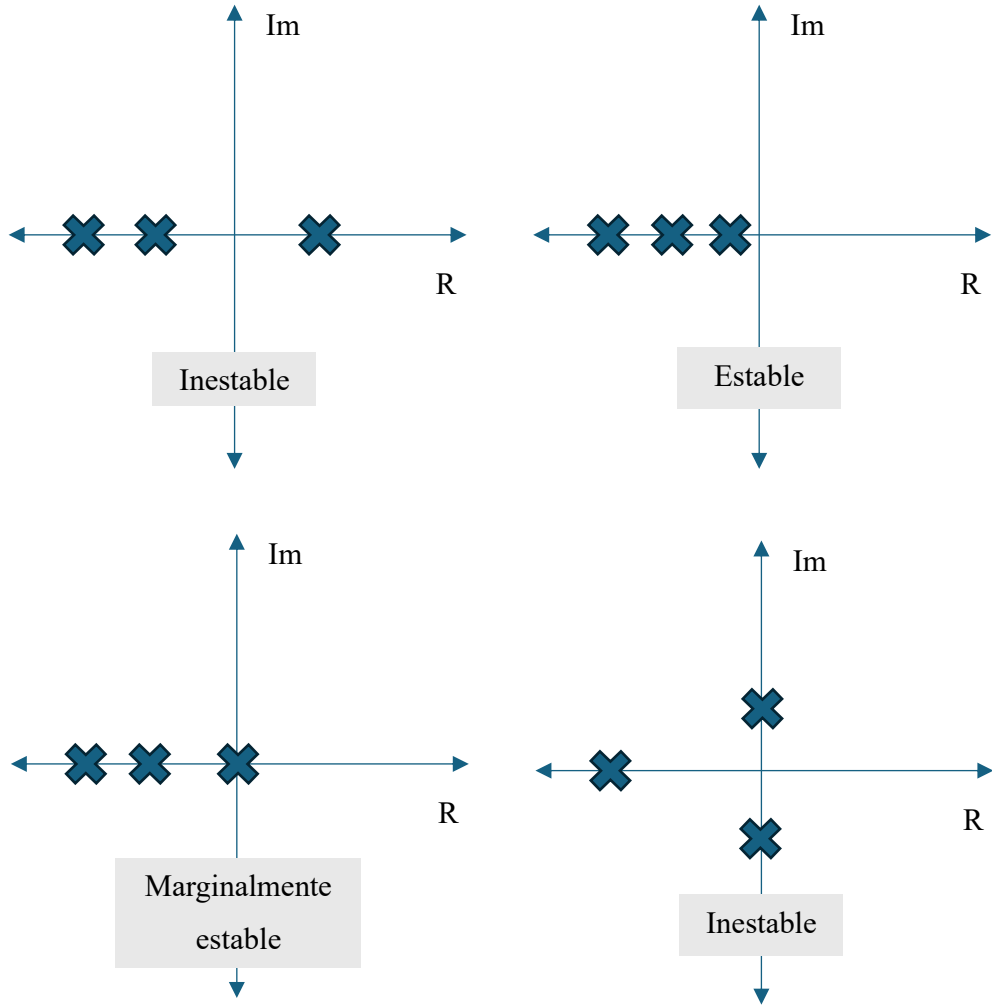


Figura 12 Criterio de estabilidad según el lugar de los polos

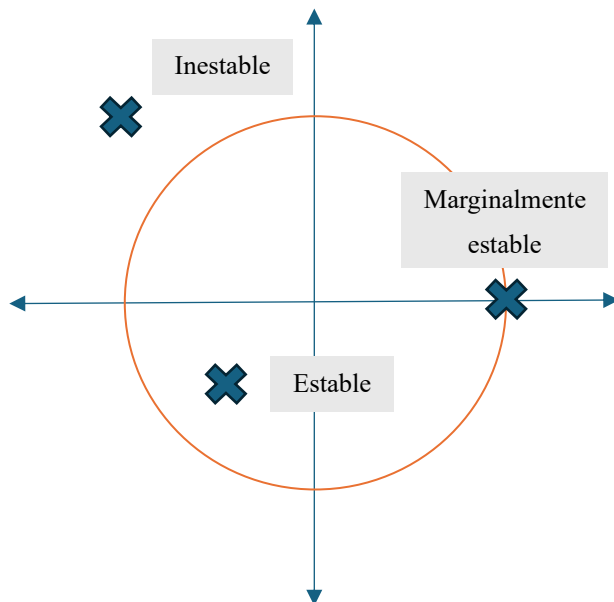


Figura 13. Criterio de estabilidad para los sistemas de tiempo discreto (Seborg, y otros, 2011)

2.9 Señales estándares de entrada

En el análisis y diseño de procesos dinámicos y sistemas de control, es importante saber cómo se comportará la señal de salida a una señal determinada de entrada (perturbaciones o un cambio en el set-point). El uso de señales estándares de entrada se justifica porque existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común y la capacidad del sistema de manejar las señales de entrada reales (Ogata, 2010). Cabe mencionar que por conveniencia, al comparar respuestas transitorias de varios sistemas, es una práctica común usar la condición inicial estándar de que el sistema está en reposo al inicio, por lo cual la salida y todas las derivadas son respecto al tiempo son cero.

Hay seis tipos importantes de señales de entrada usadas en la práctica industrial para el propósito de modelaje y control (Seborg, y otros, 2011). El primero es la señal de escalón (Ecuación 2), que consiste en un cambio repentino de cierta magnitud y que se mantiene en el tiempo. En los procesos industriales existen estos cambios repentinos y sostenidos, por ejemplo la alimentación de un reactor puede cambiar de una fuente de almacenamiento a otra, provocando cambios en la temperatura o concentración de la corriente de alimentación.

$$u_s(t) \begin{cases} 0 & t < 0 \\ M & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2. Ecuación de la entrada} \\ \text{escalón}$$

Donde el $t = 0$ es cuando se da el cambio repentino y la magnitud M es el tamaño de este cambio, típicamente a M se le asigna el valor de la unidad.

Igualmente, existe la entrada rampa (ramp), que consiste en un cambio gradual y sostenido por un periodo de tiempo (Ecuación 3). Por ejemplo, las condiciones ambientales se acercan a este comportamiento, donde la temperatura va aumentando sostenidamente, aunque lentamente.

$$u_R(t) \begin{cases} 0 & t < 0 \\ at & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3. Ecuación de la entrada} \\ \text{rampa}$$

Igualmente, existe el pulso rectangular (RP), similar a la señal escalón, con la diferencia que en este caso la señal regresa a su valor inicial después de un tiempo (t_w), ya sea largo o corto (Ecuación 4).

$$u_{RP}(t) \begin{cases} 0 & t < 0 \\ h & 0 \leq t < t_w \\ 0 & t \geq t_w \end{cases} \quad \text{Ecuación 4. Ecuación de la entrada} \\ \text{pulso rectangular}$$

También existen procesos que están sujetos a entradas periódicas como los cambios en la temperatura durante todo el día, donde en el día aumenta hasta llegar a un punto máximo para justo después empezar a descender conforme va anocheciendo para llegar a un punto mínimo durante la madrugada y volver a subir al amanecer. Matemáticamente se representa como la función seno (Ecuación 5).

$$u_{sin}(t) \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sin \omega t & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 5. Ecuación de la entrada sinusoidal}$$

Una señal parecida al pulso rectangular es la señal de impulso o función delta de Dirac, sólo que en este caso t_w es igual a 0., mientras que el área bajo el pulso es la unidad. Un ejemplo físico de esta señal sería la inyección repentina de una cantidad de colorante, esta señal es de interés especial en este trabajo de investigación por los saltos que puede presentar los valores de turbidez en el influente del reactor. Finalmente, el sexto tipo de señal de entrada es la señal aleatoria, llamada así porque no puede ser determinada con respecto al tiempo.

2.10 Respuesta transitoria y respuesta en estado estacionario

La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes, la respuesta transitoria y la respuesta en estado estacionario. La respuesta transitoria se refiere a la que va del estado inicial al estado final, es decir, desde el inicio, hasta que el sistema se estabiliza. En cuanto a la respuesta en estado estacionario, se define como la salida del sistema conforme el tiempo tiende a infinito, matemáticamente podría expresarse según la Ecuación 6.

$$c(t) = c_{tr} + c_{ss}(t) \quad \text{Ecuación 6. Respuesta de un sistema } c(t). \text{ (Ogata, 2010)}$$

La respuesta transitoria de un sistema de control muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario. Al especificar las características de la respuesta transitoria de un sistema de control es común especificar los siguientes puntos:

1. Tiempo de retardo (θ): Tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final.
2. Tiempo de subida (τ): Tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final. Para sistemas subamortiguados de segundo orden, por lo general se usa el tiempo de subida de 0 a 100%, para otro tipo de sistemas subamortiguados se aplica el tiempo de 10 a 90%.

3. Tiempo pico: Tiempo requerido para que respuesta alcance el primer pico de sobreenergación.
4. Sobreenergación máxima (porcentaje): Máximo valor del pico de la curva respuesta, medido a partir de la unidad.
5. Tiempo de asentamiento: Tiempo requerido para que la curva de respuesta alcance un rango de alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final, de 2 o 5%.

Es importante mencionar que, casi todos los sistemas de control son sistemas en el dominio del tiempo, es decir, deben presentar respuestas de tiempo aceptables, de manera que el sistema de control se debe modificar hasta que la respuesta transitoria sea satisfactoria, es decir, lo suficientemente rápida y amortiguada (que genere pocas y pequeñas oscilaciones antes de alcanzar el estado estacionario). Cuando se logran una sobreenergación pequeña, el tiempo de subida suele alargarse y viceversa, por lo tanto, debe encontrarse un equilibrio entre ambos criterios.

2.11 Tipos de controladores y acciones correctivas

Al darse perturbaciones en los Procesos Químicos o al querer llevar una variable a determinado valor se encuentra un error, es decir, una diferencia entre el valor medido de la variable a controlar y el valor deseado o set point (Ecuación 7), tomando en cuenta la magnitud del error se realiza una acción correctiva. Por otro lado, los controladores se clasifican a su vez según las acciones correctivas que emplean: Proporcional, Integral y Derivativa. Existen controladores que utilizan una o dos o las tres acciones al mismo tiempo (Ogata, 2010).

$$e(t) = y_{sp}(t) - y_m(t) \quad \text{Ecuación 7. Señal de error}$$

La acción Proporcional se llama así precisamente porque la ganancia del controlador (k_c) es proporcional a la señal de error (Ecuación 8). El signo de k_c puede ser negativo o positivo para que así crezca o decrezca la acción correctiva, además es ajustable, lo cual suele hacerse cuando el controlador ha sido instalado (Seborg, y otros, 2011). El controlador Proporcional tiene como desventaja inherente el error en estado estacionario u offset.

$$p(t) = \bar{p} + k_c e(t) \quad \text{Ecuación 8. Ecuación de la acción Proporcional}$$

La acción Integral, lo que hace es integrar los valores de la señal de error en un tiempo determinado. La acción integral se utiliza cuando es necesario eliminar el offset. Según el modelo matemático de la acción integral (Ecuación 9) se observa que la acción correctora cambia con

respecto al tiempo a menos que el error sea igual a 0, de manera que cambia continuamente hasta alcanzar el estado estacionario.

$$p(t) = \bar{p} + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* \quad \text{Ecuación 9. Ecuación de la acción Integral}$$

Es importante mencionar que si bien la característica de la acción integral de eliminar el offset es un objetivo importante, el controlador integral es rara vez usado únicamente, debido a que actúa después de que la señal de error persiste por un tiempo, en cambio, la acción proporcional actúa de manera prácticamente inmediata, por lo tanto, el control integral es usado usualmente junto con el control proporcional como un controlador proporcional-integral o PI (Ecuación 10).

$$p(t) = \bar{p} + K_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* \right) \quad \text{Ecuación 10. Ecuación del controlador PI}$$

La acción Integral tiende a generar oscilaciones, lo cual reduce la estabilidad de sistema de control por realimentación, si bien hay una tolerancia a la cantidad de oscilaciones debido a que usualmente está asociado con una respuesta más rápida, este comportamiento indeseable puede ser contrarrestada con una adecuada sintonización del controlador o la acción derivativa.

La función de la acción derivativa es anticiparse al comportamiento futuro del error, por medio del cálculo de la pendiente de la función error (Ecuación 11), por eso anteriormente era llamada acción predictiva. La acción derivativa presenta una ventaja sobre la acción proporcional haciendo una distinción sobre el periodo sobre el cual la desviación se desarrolla y sobre la acción integral al no tener que depender de un periodo de tiempo.

$$p(t) = \bar{p} + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 11. Ecuación de la acción derivativa}$$

La acción derivativa nunca es usada sola, debido a que en caso de que el valor del error se mantenga, entonces el controlador dejaría de detectarlo debido a que la derivada de una constante es 0. En caso de que los sensores del proceso presenten mucho ruido el controlador derivativo actuará de forma desordenada y terminará por amplificar el ruido, para esto es posible realizar un filtro en el sensor para disminuir el ruido.

Existe un cuarto tipo de controlador, es el controlador ON-OFF o de dos posiciones. Se llama de dos posiciones precisamente porque idealmente su funcionamiento se basa en estar encendido

(ON) o apagado (OFF) (Ecuación 12). Es sencillo y se suele usar para procesos industriales no críticos, o para termostatos o sistemas de calefacción. De igual manera se puede considerar como un controlador proporcional con una ganancia de control muy alta (Seborg, y otros, 2011).

$$p(t) = \begin{cases} p_{max} & \text{si } e \geq 0 \\ p_{min} & \text{si } e < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 12. Ecuación del controlador ON-OFF}$$

Para escoger el valor de los parámetros de un controlador PID, se puede decir de manera general, que cuando los parámetros tienen un valor pequeño, suelen tener menor efecto y cuanto mayor sea, el efecto será más fuerte, provocando también que el proceso sea más lento e incluso se vuelva inestables, de manera que se tiene que encontrar un valor intermedio para cada parámetro.

En cuanto a la acción proporcional, al incrementar el valor de K_c , se reduce el tamaño del error de offset cuando se dan perturbaciones en el sistema, al tiempo que toma más tiempo regresar al estado estacionario.

Para un controlador PI el aumentar K_c o disminuir τ_i la respuesta suele ser más rápida, y cuando ambos decrecen la señal presenta más oscilaciones. Sin embargo, es importante decir que en caso de no tomar en cuenta algún parámetro importante del proceso, por ejemplo el tiempo de retardo, en caso de incrementar K_c probablemente aumentará el comportamiento oscilatorio (Seborg, y otros, 2011).

En cuanto a que tipo de controlador escoger se puede decir que se puede utilizar un controlador proporcional (P) cuando se trate de un proceso no autorregulado que exhiba un término $1/s$ en su función de transferencia, por ejemplo, control de nivel en tanques de líquido o de Presión en Tanques de Gas.

Cuando no es aceptable un controlador P, se pasa a usar un controlador Proporcional e Integral (PI). Sobre todo, debe utilizarse cuando el error off-set en régimen permanente no es aceptable y al mismo tiempo, el proceso es suficientemente rápido como para que el efecto dinámico de la acción integral no sea significativo. Por ejemplo, en controladores de Flujo siempre se utiliza PI porque no se admiten error en régimen permanente y se tiene una dinámica muy rápida y no se incluye la acción derivativa (D) porque los lazos de caudales suelen presentar ruido importante, lo cual empobrece la acción derivativa.

Finalmente, se puede utilizar un controlador que ocupe las tres acciones (PID) si no hay ruido relevante en los sensores y si se desea incrementar la velocidad de respuesta. Los lazos de control

de temperatura y presión de vapor suelen pertenecer a esta categoría. Cabe destacar, que en los procesos que presentan un tiempo muerto elevado en comparación con la constante de tiempo dominante, la acción derivativa no suele aportar un efecto significativo.

2.12 Técnicas de sintonización

La función de un sistema de control por realimentación es asegurar que el lazo cerrado tiene la dinámica deseada y las características de respuesta en estado estacionaria. Se espera que el controlador de lazo cerrado cumpla con los siguientes criterios de rendimiento:

1. El sistema del lazo cerrado debe ser estable.
2. Los efectos de las perturbaciones son minimizados.
3. Respuesta suave y rápida a los cambios en el set-point.
4. El error en estado estacionario es eliminado.
5. Se evita el control excesivo.
6. El sistema de control es robusto, que es insensible a los cambios en el proceso y a las inexactitudes del modelo del proceso.

No es posible alcanzar a cubrir todos los criterios al mismo tiempo en un sistema de control, porque implican conflictos inherentes y disyuntivos. Sin embargo, se debe buscar un buen balance entre el rendimiento y la robustez.

Un sistema de control exhibe un alto grado de rendimiento si provee rápidas y suaves respuestas a las perturbaciones y los pequeños cambios en el set-point. Un sistema es robusto cuando rechaza las perturbaciones para un amplio rango de condiciones y para un grado razonable de inexactitud del modelo. La robustez puede ser alcanzada escogiendo una configuración conservadora del control, con pequeños valores de K_c y grandes valores del τ_I , sin embargo, esto provoca un bajo rendimiento. Así, una configuración conservadora sacrifica rendimiento en orden a alcanzar robustez.

Los parámetros de las acciones correctivas PID (K_c, τ_I, τ_D) son quienes dirigen las acciones correctivas, por lo tanto, la sintonización o ajuste de estos parámetros es de vital importancia. Los métodos más sencillos de sintonización están basados en el comportamiento del proceso en el dominio del tiempo.

Los primeros métodos y todavía muy utilizados son los métodos de Ziegler y Nichols (Z-N). En caso de que sea un sistema de primer orden con retraso y presente un comportamiento sigmoidal (Figura 14) y sea un lazo abierto se utilizan ciertos parámetros (Tabla 2).

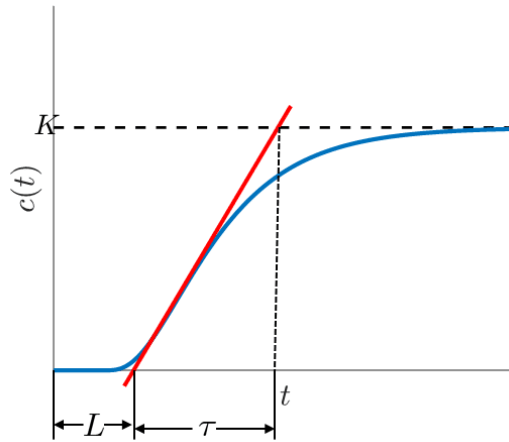


Figura 14. Comportamiento sigmoidal de un sistema

Tabla 2 . Valores del método de Z-N para sistemas con comportamiento sigmoidal en lazo abierto

Tipo de controlador	Ganancia proporcional K_c	Tiempo integral τ_I	Tiempo derivativo τ_D
P	$\frac{\tau}{KL}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	$2L$	$0.5L$

Para un proceso en lazo cerrado en sistemas con comportamiento oscilatorio. La caracterización dinámica del Proceso se basa en la ganancia última K_u , la frecuencia última ω_u y en el período último P_u , parámetros de la respuesta en frecuencia del lazo cerrado. El período último se obtiene por medio de la frecuencia última (Ecuación 13):

$$P_u = \frac{2\pi}{\omega_u}$$

Ecuación 13. Ecuación del período último

Y si bien se pueden obtener de manera teórica, también se pueden obtener de manera experimental con el siguiente algoritmo:

1. Se lleva manualmente al punto nominal de operación
2. Se anulan las acciones integral y derivativa del controlador y se sintoniza la ganancia a un valor bajo
3. Se pone el controlador en automático y se provoca un cambio en el punto de consigna o en una perturbación; como la ganancia se ajustó a un valor bajo, la respuesta será lenta y sobre amortiguada.
4. Se incrementa la ganancia en sucesivos pasos y se provoca el cambio en cada uno de ellos, hasta conseguir una respuesta que presente una oscilación mantenida.
5. La ganancia última es la ganancia del controlador en esas condiciones y el período último se mide sobre la gráfica, siendo la distancia entre las Crestas de esta misma.

Con estos dos parámetros procedemos a encontrar las constantes de nuestro controlador dependiendo del tipo de sistema que tengamos siguiendo el ajuste PID mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3 Método Ziegler-Nichols de lazo cerrado

Tipo de controlador	Ganancia proporcional K_c	Tiempo integral τ_I	Tiempo derivativo τ_D
P	$0.5 K_u$	—	—
PI	$0.45 K_u$	$0.83 P_u$	—
PID	$0.6 K_u$	$0.5 P_u$	$0.125 P_u$

En base al método Z-N, se han elaborado mejoras para casos específicos, uno de estos métodos es el método Chien–Hrones–Reswick (CHR), que sirve para un control regulatorio, muy utilizado en la industria, ya que el control regulatorio busca rechazar todas las perturbaciones que se puedan dar durante el proceso. Este método de sintonía propone dos criterios de desempeño para el controlador PID, dar la respuesta más rápida posible sin sobre impulso, además, presenta una mejor estabilidad que Z-N.

Si se opta por escoger “La respuesta más rápida posible sin sobre impulso” (Tabla 4) da como resultado una ganancia proporcional pequeña para el controlador. Una ventaja de tener una ganancia proporcional pequeña es conseguir una mayor robustez del sistema asegurando que nuestro lazo cerrado de control no entre en la zona de inestabilidad.

Tabla 4. Método CHR para control regulatorio sin sobreimpulso

Tipo de controlador	Ganancia proporcional K_c	Tiempo integral τ_I	Tiempo derivativo τ_D
P	$\frac{0.3\tau}{K\theta}$	—	—
PI	$\frac{0.6\tau}{K\theta}$	4θ	—
PID	$\frac{0.95\tau}{K\theta}$	2.375θ	0.421θ

2.13 Interfase de control

Según Scaife (2017), la interfaz hombre-máquina (HMI) comprende la relación del trabajador, ya sea operador o técnico de mantenimiento, con un sistema para realizar su tarea, lo cual incluye a su vez la interacción física a través de paneles de control, cableados y dispositivos de entrada o interfaz hombre-computadora (HCI). Además, afirma que la HMI es un aspecto integral de toda la operación de control.

Generalmente, en una planta industrial existe una sala de control, en la cual se encuentra el operador donde este interactúa con el equipo por medio de pantallas de información, controles y sistemas de alarma. Estos sistemas comprenden componentes de hardware y software.

Es importante diseñar una interfaz que sea fácil de usar para el usuario, es decir, intuitiva y que sigan ciertas reglas generales, ya que si el usuario necesita desaprender ciertas formas de trabajo previamente aprendidas y adoptar nuevas, existe una posibilidad importantes de que el operador cometa errores en el manejo del sistema.

Hay tres componentes principales de una HMI, las pantallas de información, controles y gestión de la interacción (Figura 15).

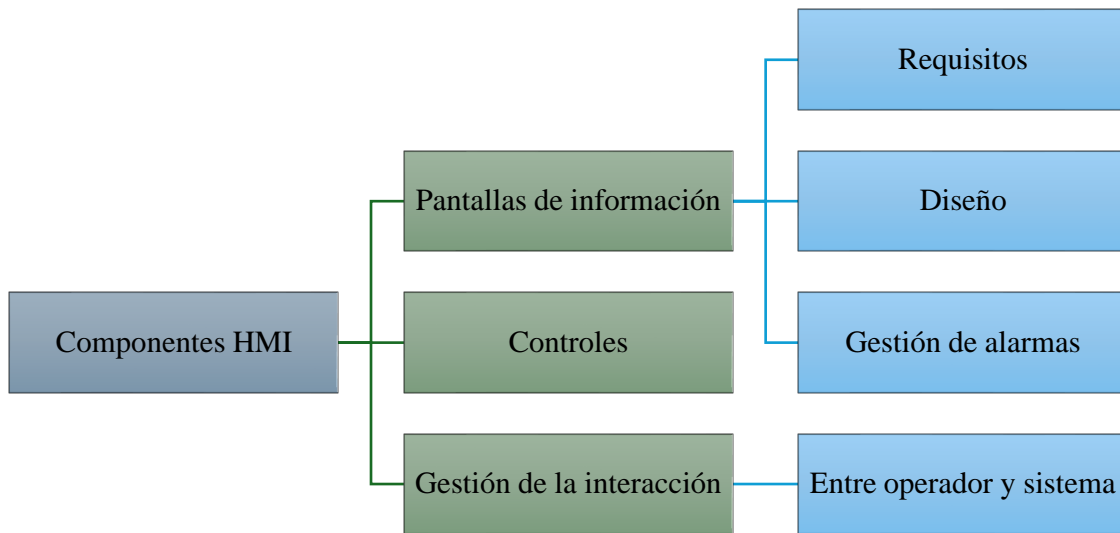


Figura 15. Principales componentes de la Interfaz humano-máquina

2.13.1 Pantallas de información

Las pantallas sirven como canales de salida para la información del sistema, tanto estado del proceso, como el valor de las variables, así como señales de alarma. Son el medio por el cual el operador obtiene lo necesario para controlar y monitorear una planta de forma efectiva.

El diseño de la información requiere, por un lado, la información del proceso, y por otro, la información de las tareas del operador (Figura 16). Se debe tomar especial cuidado en el diseño de la visualización de la información. Es decir, se busca saber que necesita el operador para realizar su tarea. Igualmente en este ámbito entran consideraciones como el tamaño de la pantalla, tipo y tamaño de letra, diseño de colores y agrupación de la información.

Una vez obtenidos los requisitos de información y definidos los medios más adecuados para presentar la información se puede llevar a cabo el diseño detallado de la interfaz del usuario, Scaife (2017) enumera los siguientes principios básicos para esto:

1. Coherencia de información, en términos de diseño, codificación y métodos de interacción con el sistema.
2. Agrupación de información, debe estar de forma lógica para el usuario, por prioridad, unidad de proceso o función del sistema.

3. Simplicidad de la información al mostrar al usuario, mantener el desorden al mínimo y que la información requerida sea fácil de ver y comprender.

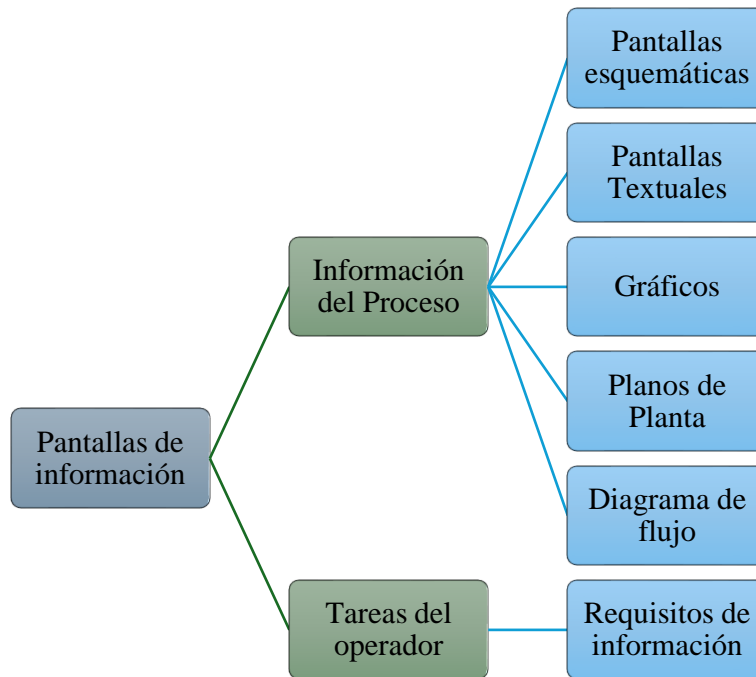


Figura 16. Información necesaria para diseñar la HMI y sus fuentes

La coherencia se logra por una guía de estilo, es decir un estándar o uniformidad en este, para cada pantalla de la interfaz. La coherencia permite al usuario anticipar y saber dónde encontrar la información deseada con el mínimo esfuerzo para que sea intuitiva y obvia.

Para agrupar la información es importante establecer una jerarquía de visualización que debe empezar en el nivel inferior con cada componente individual como bombas, válvulas, sensores. Una jerarquía ayudará al usuario a navegar y comprender el sistema. El siguiente nivel sería los equipos como un intercambiador o una torre de destilación; el siguiente una planta completa, y el primer nivel sería una visión general de todo el proceso.

La simplicidad es importante, porque los usuarios tendrán un desempeño deficiente si la cantidad de información es abrumadora o difícil de asimilar. Si se nota muy abrumante la cantidad de información, lo mejor será dividir la información en diferentes pantallas. Esto requiere una consideración cuidadosa de la información a la que se debe hacer referencia, por ejemplo se puede subdividir una turbina de gas en pantallas de compresor, cámara de combustión y turbina de gas en lugar de mostrar todo en una sola pantalla y al mismo tiempo mantener una visión general de toda la unidad visible.

Un principio interesante, con respecto a la simplicidad, es el de “la cabina oscura”, usada en los sistemas de aviación para que los pilotos vean las pantallas de la cabina iluminada cuando hay algún problema, de lo contrario, demasiada información puede actuar como distracción. En la industria química se aplica usando una cantidad mínima de color durante las operaciones normales, y cuando hay algún problema se utiliza el color para llamar la atención del operador sobre la información pertinente.

El punto final del diseño de la información son las alarmas, aquellas indicaciones de parte del sistema para que el usuario actúe. También existen alarmas que indican al operador cuando una condición se ha cumplido, en este caso no se debe imitar el diseño una alarma de emergencia para evitar confusiones durante el control del proceso.

2.13.2 Controladores

Los controladores son el medio por el cual, el operador envía información al sistema para manipularlo y mantenerlo estable. Se dividen en dos tipos, controles de hardware (botones, interruptores, pulsadores) y controles de software (menús, listas despegables, botones digitales). Como se puede imaginar, es importante que la pantalla y los controles se integren adecuadamente para realizar una interfaz útil.

También para su diseño, Scaife (2017), enumera principios claves:

1. Compatibilidad con tarea: El control utilizado se adapte bien al tipo de cambios
2. Compatibilidad con expectativas y modelos mentales: Una flecha hacia abajo es disminuir, una hacia arriba es aumentar.
3. Coherencia: con las expectativas del usuario
4. Agrupación: Por función y pantallas a las que afectan.

Al ser los controladores por donde ingresa información el usuario el sistema se debe diseñar para detectar errores del operador, para que verifique con el operador su configuración. Por ejemplo valores fuera de rango, o valores en rango críticos. La verificación de errores debe ser como una molestia para evitar que el usuario se acostumbre y termine por volverse insensible a los mensajes de error.

2.13.3 Gestión de la interacción

La gestión de la interacción logra que el sistema respalde que el operador pueda organizar la información efectivamente para cumplir con sus tareas, porque es necesario que el operador

mantenga en cualquier interacción el conocimiento de la situación del proceso. Esto se logra haciendo que el operador este inmerso en el sistema, porque el operador del sistema del controlador no es un simple cuidador de la máquina, sino quien a partir de la información que obtiene del sistema realiza las tareas necesarias para monitorear y controlar el sistema como ya se dijo anteriormente.

En este sentido, la navegación a través del sistema es muy importante, para esto Scaife (2017) enumera principios básicos:

1. Minimizar la cantidad de memoria que necesita el operador.
2. Hacer que la navegación a través del sistema sea intuitiva.
3. Proporcionar flexibilidad para la navegación.
4. Facilidad de cambio entre preferencias.

2.14 Lenguajes de programación

Para elaborar sistemas de control es necesario la programación de los elementos de control, sensores y actuadores, así como su conexión con la interfaz de control, hoy en día existen varios lenguajes de programación que pueden servir a nivel industrial, didáctico y de investigación.

Matlab es un lenguaje de programación basado en matrices. La plataforma está optimizada para resolver problemas científicos e ingenieriles. Cuenta con la posibilidad de trabajar con gráficos que facilitan la visualización de los datos, además de contar con una vasta biblioteca de herramientas que permiten trabajar con amplia gama de algoritmos y proporciona herramientas para crear aplicaciones con interfaces gráficas personalizadas. Puede ser utilizado para procesamiento de señales y comunicación, por lo que puede ser aplicable para sistemas de Control.

Dentro de la paquetería de Matlab se encuentra el software de Simulink, que es un entorno de diagrama de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. Cuenta con una biblioteca de bloques predefinidos para modelar sistemas de tiempo continuo y tiempo discreto, en los cuales se puede utilizar el lenguaje de programación propio de Matlab e incluso se puede importar código C y C++.

Permite simular los procesos de Control a través del diagrama de bloques tomando en cuenta señales típicas de los sistemas de Control, como señal pulso, o escalón, también permite

incorporar tiempos de retardo y presenta las señales de control que facilita la aplicación de los métodos de sintonización.

A su vez, Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino son capaces de leer entradas y convertirlas en una salida, activando un motor, encendiendo un LED. Puede indicarle qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la placa. Para ello se utiliza el lenguaje de programación Arduino y el Software Arduino (IDE), disponible para todos los sistemas Operativos.

Al ser un microcontrolador, Arduino asemeja el funcionamiento de un sistema electrónico de Control, recibiendo señales de los sensores y mandando órdenes a los actuadores. Asimismo, Arduino trabaja con rangos electrónicos (40 mA, 5.5V) de funcionamiento semejantes a los sistemas electrónicos de Control (Ollero, y otros, 2006). Además, se ha implementado en varios trabajos experimentales de Control con resultados concluyentes que permiten validar el uso de este software y hardware para usarlo como base para implementar el Controlador al reactor de Vinaza.

3. METODOLOGÍA

Introducción

En esta sección del escrito de tesis se presenta los pasos utilizados para realizar los objetivos de este trabajo. Se esquematizó el trabajo tomando en cuenta la información de la bibliografía consultada, al igual que la selección de las variables a estudiar y los métodos a seguir para la experimentación.

Se encuentra la información experimental previa necesaria para desarrollar los lazos de control, como los valores de turbidez de la vinaza a diferentes concentraciones, la calibración de los sensores y actuadores, así como la información respecto a la programación en Arduino para obtener los datos experimentales que permitieron obtener el modelo empírico del proceso, así como las consideraciones explicadas en la sección de antecedentes para elaborar la interfaz de control aplicadas al proceso estudiado.

3.1 Caracterizar el sistema de reacción.

El caso base sobre el cual se busca desarrollar el lazo de control es la clarificación de la vinaza por medio de la DA, llevada a cabo en un RAFA escala laboratorio que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP.

3.1.1 Caracterización del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

El reactor tiene un volumen total de 500 ml, de geometría cilíndrica (16 cm de diámetro externo), está hecho de celdas de vidrio y está conformado por dos secciones de igual altura (9.2 cm cada una) (Figura 17). Además, el RAFA tiene por dentro, en la sección superior, una malla con empaques porosos para evitar la salida de biomasa por el fenómeno de arrastre de partículas, de manera que su volumen de operación termina siendo de 305 ml.

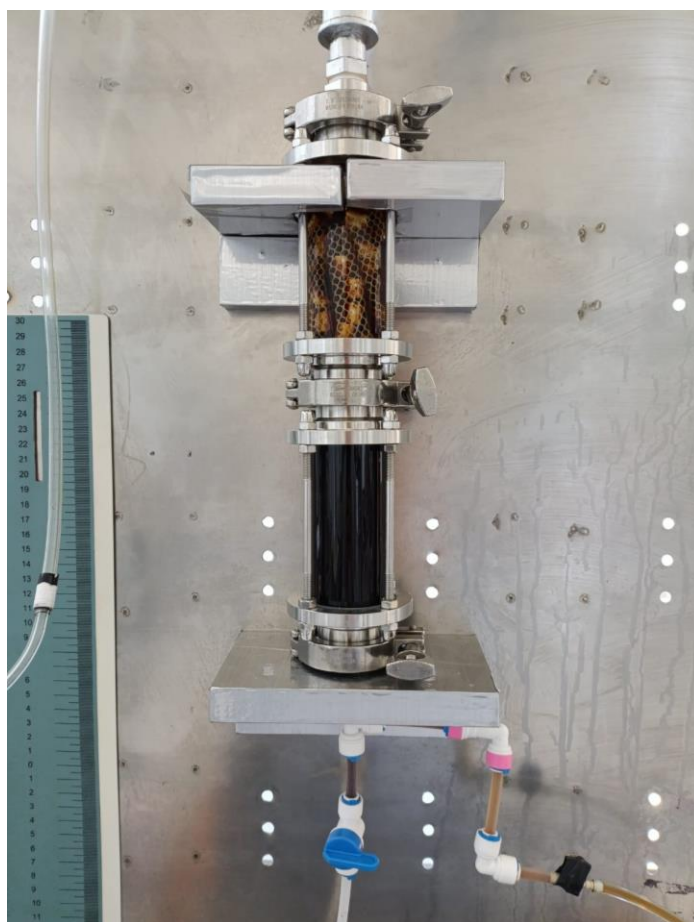


Figura 17 Reactor de flujo ascendente a escala laboratorio.

Aparte del RAFA, el proceso consta de un tanque de almacenamiento. Debido a los altos tiempos de retención hidráulica requeridos para la reducción de contaminantes en este tipo de efluente, el reactor por lo general requiere operación por lotes. La vinaza entra por la parte inferior del RAFA

proveniente del tanque de almacenamiento, posteriormente, por la parte superior del reactor sale el biogás producido por el proceso de digestión y por una segunda tubería la vinaza tratada es descargada al tanque de almacenamiento, la cual tiene acoplada una válvula de esfera. Adicionalmente, la tubería por la cual sale el biogás tiene una válvula check y en la parte inferior, conectada a la línea de alimentación, una línea de descarga que tiene una válvula de esfera (Figura 18).

Según Mullai, y otros (2020), se encontró que para este proceso la temperatura ideal oscila entre los 30 °C a 35°C. En este sentido, ante las variaciones en la temperatura ambiente de Puebla, las cuales pueden oscilar de 1°C a 34°C (Weather Spark, 2023), y su efecto en la estabilidad del reactor empleado para este trabajo de tesis, se integra una fuente de calor o servicio auxiliar que permite estabilizar la temperatura de operación a las condiciones requeridas para la degradación o remoción de los contaminantes.

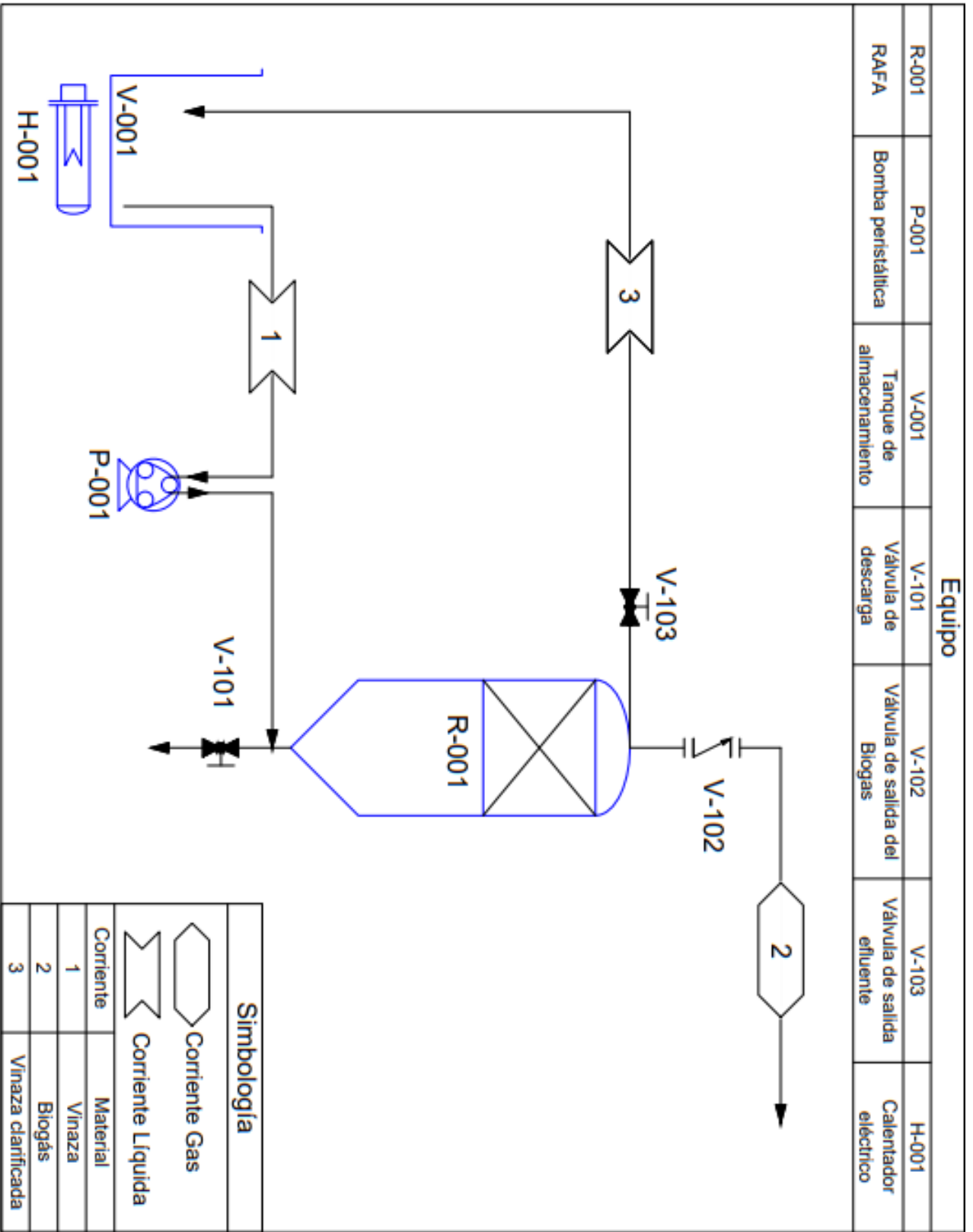


Figura 18. DFP del proceso experimental de clarificación de vinaza

3.1.2 Caracterización de la vinaza

La vinaza utilizada en este trabajo de investigación proviene de una mezcalera artesanal ubicada en el municipio de Atlixco. Para caracterizar la vinaza se realizaron diluciones de esta en agua desionizada a diferentes concentraciones para medir absorbancia y turbidez (Figura 19). Se utilizó agua desionizada para evitar que las partículas presentes en el agua del servicio sanitario interfirieran con las mediciones realizadas. Para medir la absorbancia se utilizó el equipo UV-Vis GENESYS 30 y la turbidez con el turbidímetro Gravity.



Figura 19. Diluciones a diferentes porcentajes de vinaza en las celdas del equipo de absorbancia

Los valores obtenidos (Figura 20 y 21) sirvieron para determinar que parámetro usar para monitorear el estado de la vinaza en el tanque de almacenamiento, y observando que las lecturas de absorbancia sobrepasan el rango del instrumento después de una disolución al 25% de vinaza, se descarta como parámetro útil para poder realizar el monitoreo del proceso de degradación de la vinaza.

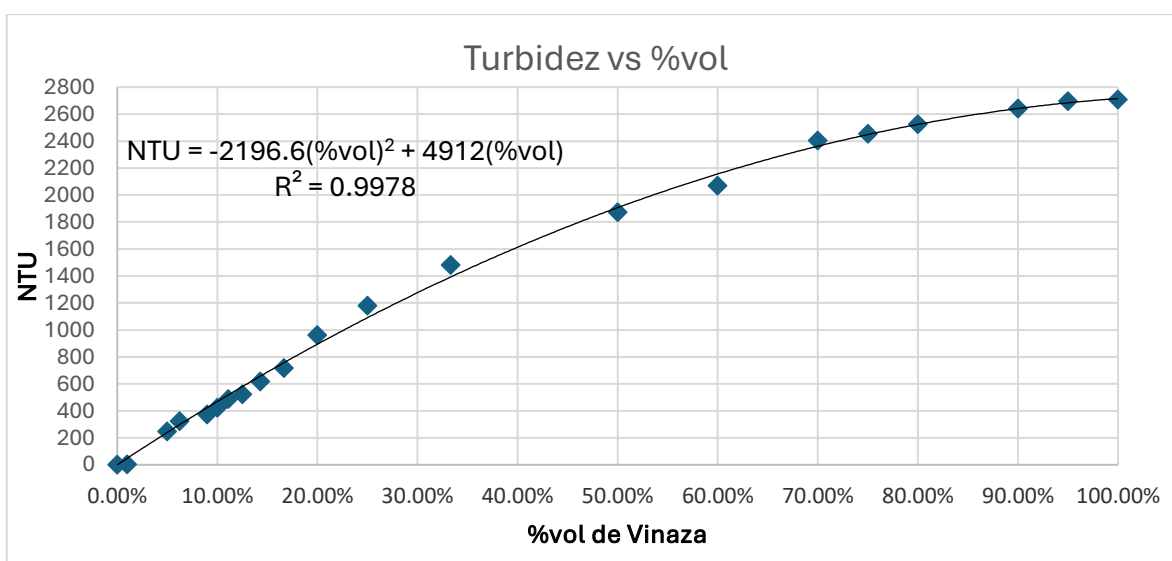


Figura 20. Valores de Turbidez con respecto al porcentaje de vinaza en la mezcla vinaza-agua

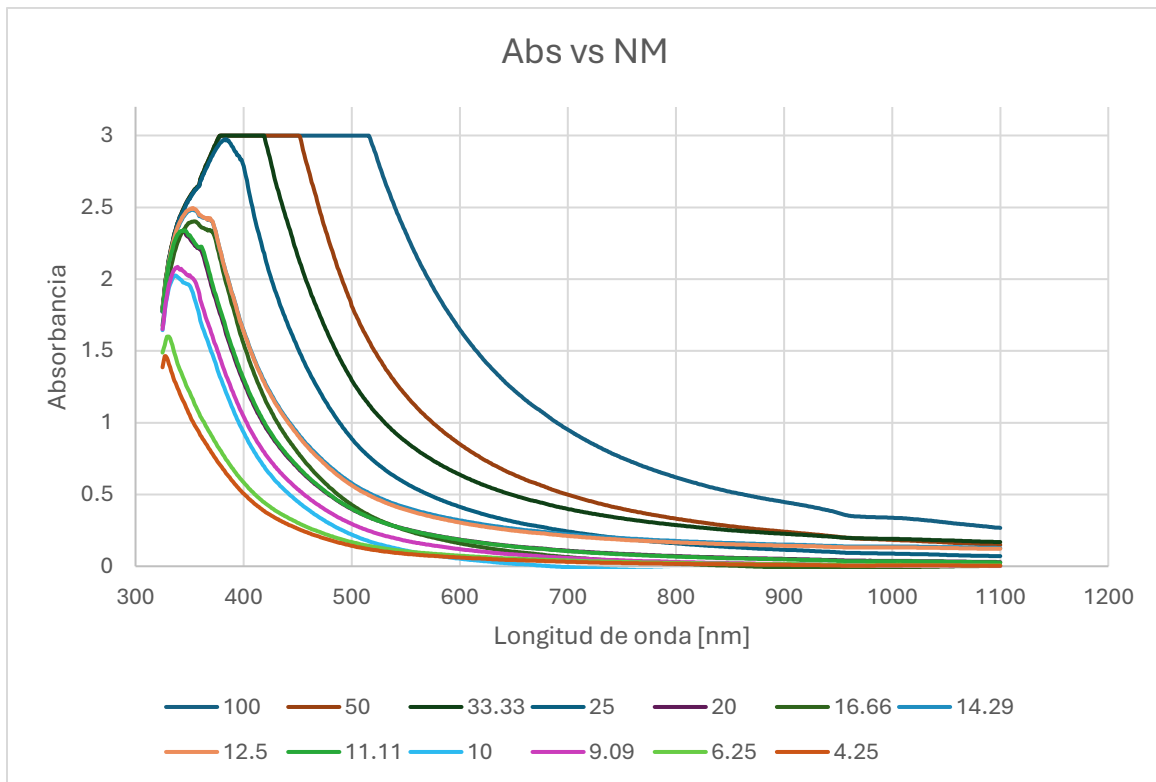


Figura 21. Datos obtenidos de absorbancia a diferentes disoluciones de vinaza

3.2 Selección y programación de los elementos de control.

Según el funcionamiento del sistema, y tomando en cuenta las heurísticas enunciadas por Newell, y otros (1989), se propusieron dos variables de salida para formar los controladores, la turbidez y la temperatura, siendo variables que no se autorregulan y que deben cumplir con cierto valor, la turbidez por un tema ecológico y la temperatura por el desempeño de la DA. Como variables de entrada, se utilizó para la turbidez el TRH, ya que tiene un efecto sobre la coloración del efluente, en cuanto a la temperatura del proceso se utilizará un controlador ON-OFF de manera que se espera que la temperatura se mantenga en el rango adecuado de 30 a 35 °C.

Se proyectó colocar el sensor de turbidez y de temperatura en el tanque de almacenamiento. El sensor de turbidez se relaciona con una bomba, de manera que los cambios en la velocidad de flujo sean orientados por los cambios en la turbidez; y el sensor de temperatura se conecta con la fuente de calentamiento eléctrica (Figura 22). Se utilizó como microcontrolador el software de Arduino y el hardware de Arduino MEGA.

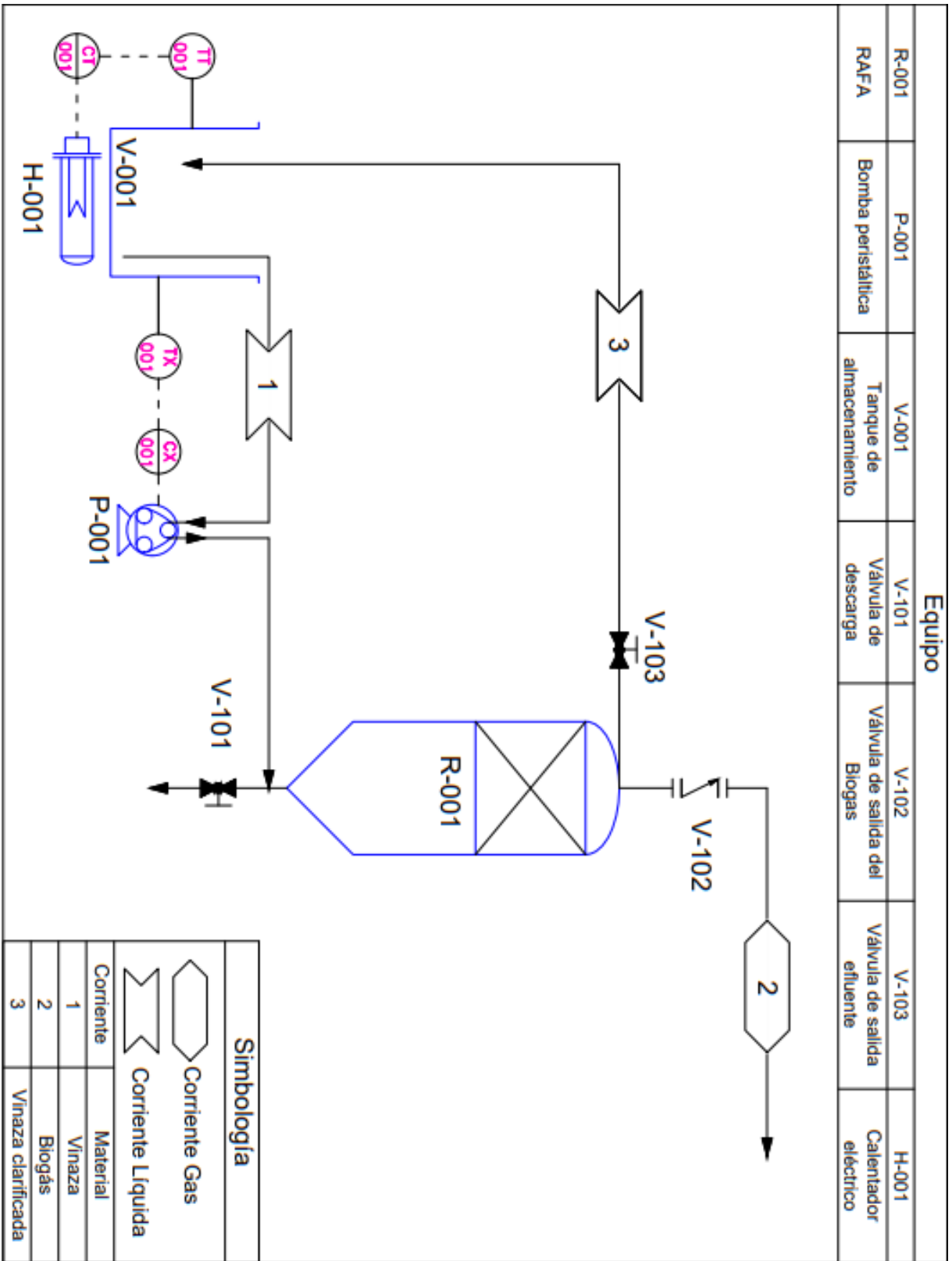


Figura 22. Propuesta de Instrumentación para el proceso a escala laboratorio de clarificación de vinaza

3.2.1 Selección de los elementos de control para el lazo TRH

Para formar el lazo de control de TRH se propusieron tres bombas diferentes (Tabla 5).

Tabla 5. Características de funcionamiento de las bombas propuestas para armar el lazo de control de TRH

Características	Bomba Peristáltica	Bomba Sumergible Arduino	Bomba peristáltica Arduino
Rango de Flujo	1 – 2300 ml/min	80 – 120 l/h	10 - 100 ml/min
Tamaño	26x19.4x21.4 cm	45x39 mm	D= 27.6mm L= 37.9mm
Voltaje de uso	90 a 130 V	3 – 6 V	3 – 12 V
Rango de Temperatura de Trabajo	-----	5 - 60 °C	0 – 40 °C

Al final se seleccionó la bomba peristáltica acoplable a Arduino (Figura 23) debido a que al ser de tipo peristáltica la vinaza no entre en contacto directo con el mecanismo de la bomba maximizando su tiempo útil; además, esta bomba presenta el rango de flujo más pequeño, lo cual es adecuado para conseguir los tiempos de retención hidráulica deseados para el sistema, además de que mientras más pequeño sea el flujo menor será la velocidad y así será más difícil que se presente el fenómeno de arrastre de partículas y a diferencia de la otra bomba peristáltica se puede conectar fácilmente a la tarjeta de Arduino.



Figura 23. Boma peristáltica para Arduino

Se utilizó el turbidímetro Gravity (Figura 24), mismo que sirvió para realizar las medidas de turbidez a diferentes diluciones en la caracterización del sistema. El funcionamiento del turbidímetro consta de un fotodiodo que emite un haz de luz infrarrojo a través del fluido hacia un fototransistor que dependiendo de la cantidad de luz que recibe emite una señal analógica que nos permite saber la cantidad de voltaje que deja recibe el fototransistor y así calcular las unidades Nefelométricas (NTU) de la vinaza utilizando una curva de calibración que da el proveedor (Ecuación 14).

$$y = -1120.4x^2 + 5742.3x - 4352.9$$

Ecuación 14. Ecuación que de NTU con respecto al voltaje medido por el fototransistor

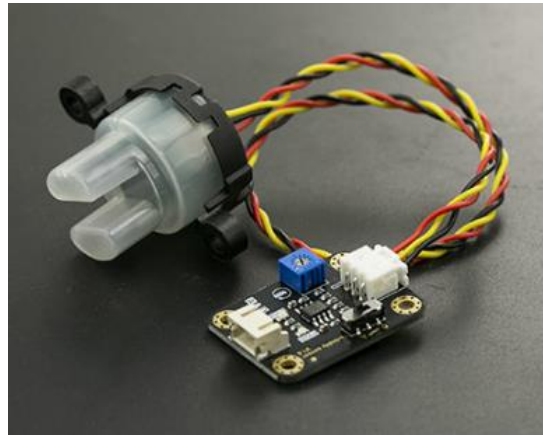


Figura 24 Turbidímetro Gravity

3.2.2 Programación de los elementos de Control para el lazo del TRH

Se programaron estos dos elementos para que el valor del flujo de la bomba esté en función del valor de NTU que arroja el turbidímetro. Se envía el valor de la Turbidez al microcontrolador para que dependiendo de este valor, el microcontrolador envíe una señal de PWM de cierta magnitud para modificar el voltaje que recibe la bomba peristáltica para así controlar la velocidad del flujo del sistema, controlando así el TRH. Los valores de turbidez y TRH se imprimen en tiempo real (Figura 25).

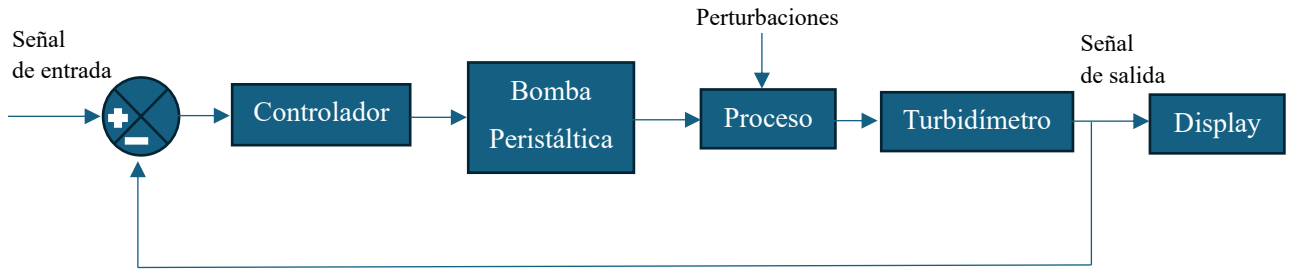


Figura 25 Diagrama de funcionamiento del lazo de control de TRH

Para poder programar correctamente los elementos del lazo de control se realizaron sus curvas de calibración. En el caso del turbidímetro se realizó dicha calibración usando agua desionizada como blanco para asignarle el valor de 0 NTU y tomar en cuenta como el valor de voltaje que reportaba el instrumento como el punto de inicio de nuestra curva de calibración que daba el proveedor (4.2 V), siendo este muy cercano al encontrado por nosotros (4.5 V), para lograr calibrar correctamente el sensor se cambiaron los valores en la ecuación estándar de la ecuación cuadrática (Ecuación 15) para obtener la nueva curva de calibración (Ecuación 16).

$$y = -1120.4x^2 + 5742.3x - 4352.9 \rightarrow$$

$$y = 3000 - 1120.4(x - 2.5)^2$$

*Ecuación 15.
Formato estándar
de la ecuación
cuadrática que
relaciona Voltaje
con Turbidez*

$$y = 3000 - 1120.4(x - 2.8)^2$$

*Ecuación 16. Traslación de la
ecuación original tomando en
cuenta el valor experimental del
agua desionizada*

3.2.2.1 Calibración de la bomba peristáltica y la señal PWM

En cuanto a la bomba peristáltica, se midió la velocidad de flujo que presentaba a diferentes voltajes recibidos a través del PWM de Arduino, encontrando que la bomba puede funcionar en un rango de 140 a 255 PWM, ya que de recibir un voltaje menor a 2.7 V, presenta intervalos irregulares de encendido y apagado. Se encontró la relación entre el valor del PWM y el flujo de la bomba (Figura 26).

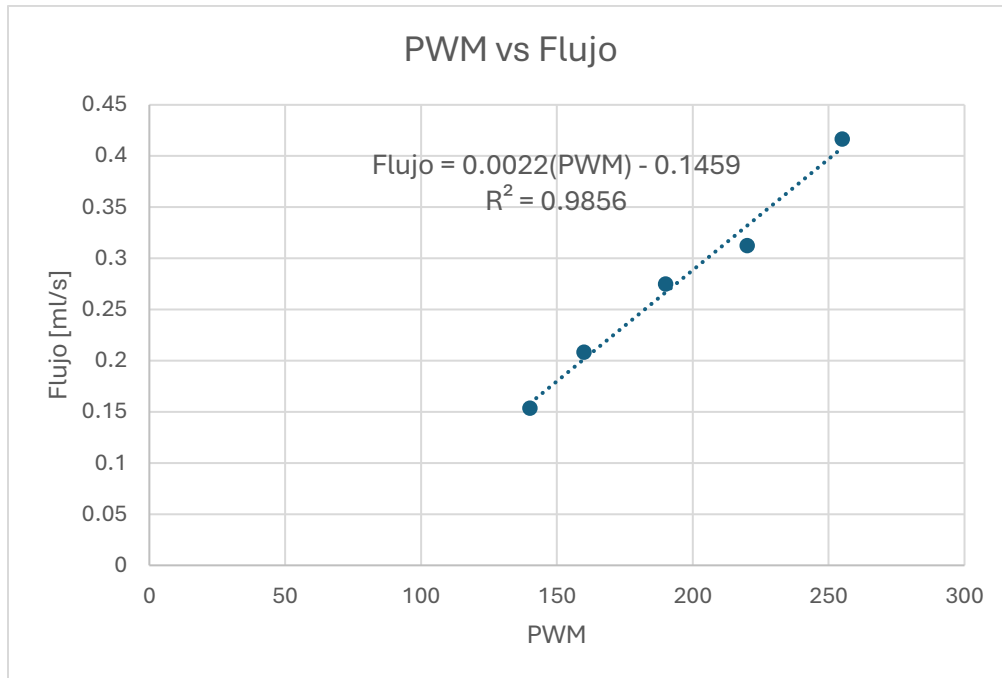


Figura 26. Ecuación del flujo en función del PWM

Para programar el flujo que debe suministrar la bomba dependiendo del valor de Turbidez que detecte la bomba se propuso formar una relación lineal haciendo corresponder el valor más pequeño de turbidez con el valor más alto de flujo de la bomba y viceversa (Figura 27).

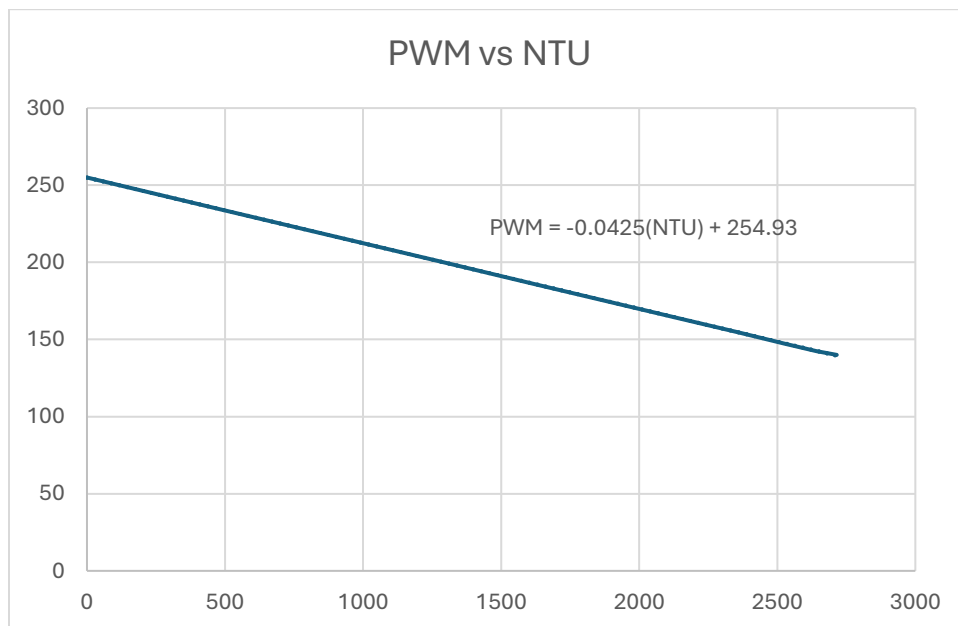


Figura 27. Gráfica de relación PWM y valores de NTU

Cabe mencionar que, en el momento de programar, se acotó esta función para que en el caso de calcularse un valor menor a 140 PWM (debido a que el turbidímetro llegase a reportar un valor de NTU mayor al obtenido en la caracterización de la vinaza) se mantuviera este valor como el tomado por la señal PWM para evitar los intervalos irregulares de prendido y apagado en la bomba.

Debido a que se contempla la recirculación de la vinaza tratada hacia el tanque de almacenamiento, conforme el proceso vaya avanzando el influente se irá clarificando, al tiempo que contendrá una menor cantidad de sustrato disponible para la biomasa, por lo tanto, será necesario que la velocidad del flujo aumente para que la biomasa pueda seguir obteniendo nutrientes de manera adecuada.

3.2.3 Selección de los elementos de control para el lazo de temperatura

Para formar el lazo de control de temperatura inicialmente se tenían dos opciones (Tabla 6). La primera consistía en usar el sensor DS18B20 y programar directamente el funcionamiento ON-OFF para que se encienda y apague el calentador de pecera según la temperatura. La segunda opción consistía en utilizar el Termostato W1209, un dispositivo tipo relee que puede programarse directamente, en este caso el set point sería de 34 °C, además, el termostato cuenta con un sensor sumergible de temperatura para saber cuándo debe permitir o evitar el paso de corriente.

Tabla 6. Características de funcionamiento actuadores para armar el lazo de control de temperatura

Características	Sensor de Temperatura DS18B20 sumergible	Termostato W1209
Rango de Temperatura	-55 a 125 °C	-50 a 110 °C
Tamaño	5 cm	48x40x14 mm
Voltaje de uso	3 a 5 V	9 a 12 V

Finalmente se optó por utilizar el Termostato por presentar una mayor facilidad para ser conectado a la fuente de calor y contener en sí mismo la programación del controlador ON-OFF.

El funcionamiento del lazo de control consta de medir la temperatura con el sensor para enviar esta información al microcontrolador y el controlador ON-OFF permita o no el paso de la corriente eléctrica al calentador de acuario el cual estaría dentro del tanque de almacenamiento (Figura 29).

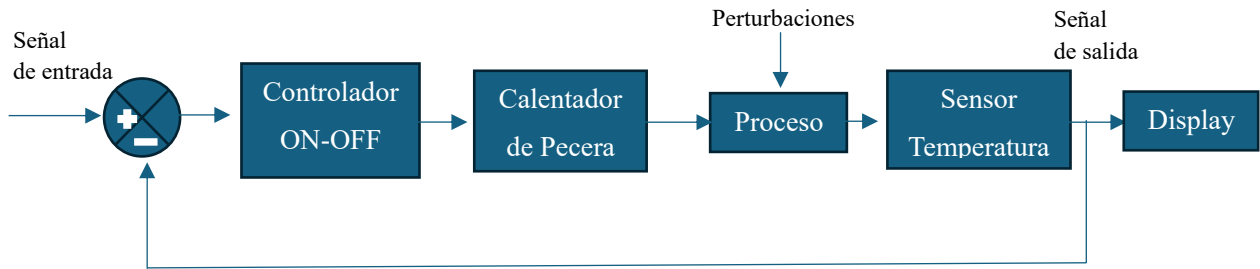


Figura 28 Diagrama de funcionamiento de Lazo de Control de Temperatura

3.2.4 Monitoreo de Cambios en la conductividad durante el proceso de clarificación de Vinaza

A las variables comentadas anteriormente se agregó la conductividad como variable de estudio para observar los cambios en este parámetro durante la degradación de la vinaza y evaluar su utilidad como parámetro de monitoreo del proceso de clarificación de la vinaza. Según la literatura (Tabla 7) se espera que la conductividad oscile entre 1560 a 3090 mS/m.

Para observar correctamente los cambios de conductividad, se agregó un segundo tanque de almacenamiento. A la entrada del Reactor se encuentra el mismo vaso de precipitado de 200 ml, y a la salida se colocó un matraz Kitasato de 400 ml, con la finalidad de comparar los datos a la entrada y a la salida del RAFA sin que haya mezclado directo. Se colocó un conductímetro en ambas posiciones.

De esta forma se presentan cambios en la propuesta original de instrumentación (Figura 22), agregando un segundo tanque de almacenamiento de manera que la entrada y salida del Reactor estén separadas con la intención de observar fácilmente las diferencias entre la entrada y salida del proceso (Figura 29). Este arreglo permitió, además de evaluar la validez de la Conductividad como parámetro de monitoreo, obtener la función de transferencia del proceso por medio de la

programación de la bomba peristáltica según el valor de la Turbidez. En la imagen 29 también se observa el cambio de lugar de la resistencia eléctrica (calentador de pecera).

Tabla 7. Valores de conductividad para la vinaza reportada por la literatura

Valor CE [mS/m]	Fuente
2 800	Caputo, M. (2020). <i>Estudio de la composición orgánica de la vinaza y metodologías para eliminar sus efectos contaminantes</i>
1 850	
2 530	
2 840	Dávila Rincón, J. (2009, agosto). <i>Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación – electroflotación.</i>
1 686	(Ibarra Camacho, y otros, 2018) CARACTERIZACIÓN QUÍMICO-FÍSICA DE VINAZAS DE DESTILERÍAS
1 560	
3 090	Barba Ho, L. E., & García, L. A. (2014). Evaluación de la factibilidad de acople de un sistema fotocatalítico biológico para el tratamiento de vinazas mediante estudios de toxicidad

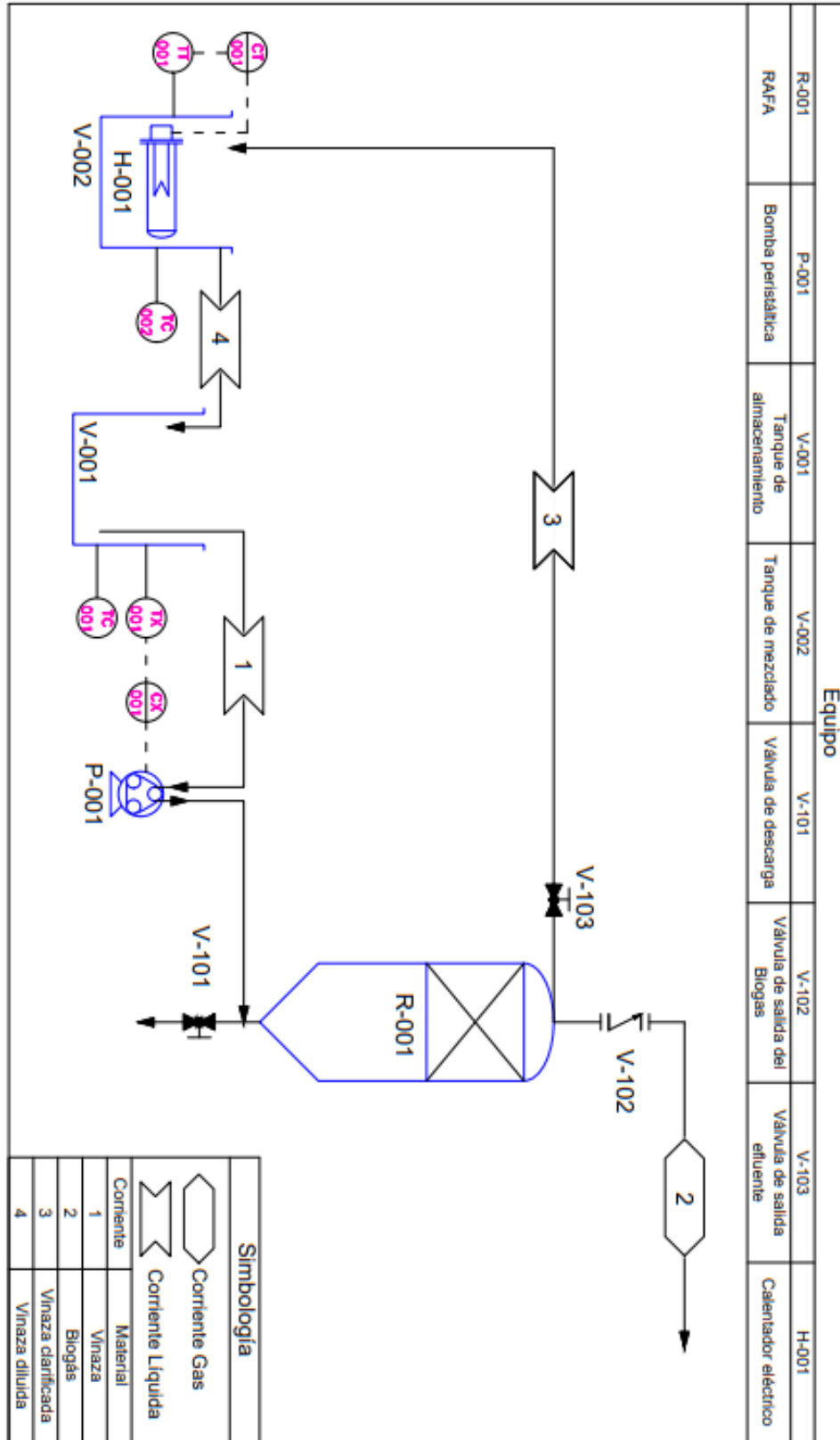


Figura 29. Adecuación del Proceso para la identificación del Sistema y para observar los cambios de conductividad a la entrada y salida del reactor

3.2.5 Calibración de los conductímetros

En cuanto al sensor de Conductividad se realizaron diluciones molares de Cloruro de Sodio (sal de mesa) a 0.001, 0.01 y 0.1 M, anotando el valor de la señal analógica que reportaba cada uno de los conductímetros para corresponderlo con el valor de CE reportada en la norma NMX-AA-093-SCFI-2000. Interesante que cada uno de los conductímetros haya dado valores diferentes para las señales analógicas pese a ser del mismo fabricante (Tablas 8 y 9).

Tabla 8. Valores analógicos del conductímetro 1 a diferentes diluciones

Conductímetro 1		
Molaridad [M]	Valor Analógico	Valor CE Norma [mS/m]
0.001	38	12.4
0.01	175	118.6
0.1	250	1066

Tabla 9. Valores analógicos del conductímetro 2 a diferentes diluciones

Conductímetro 2		
Molaridad [M]	Valor Analógico	Valor CE Norma [mS/m]
0.001	31	12.4
0.01	313	118.6
0.1	484	1066

Con estos datos se obtuvieron las curvas de calibración de cada conductímetro (Figura 30 y 31).

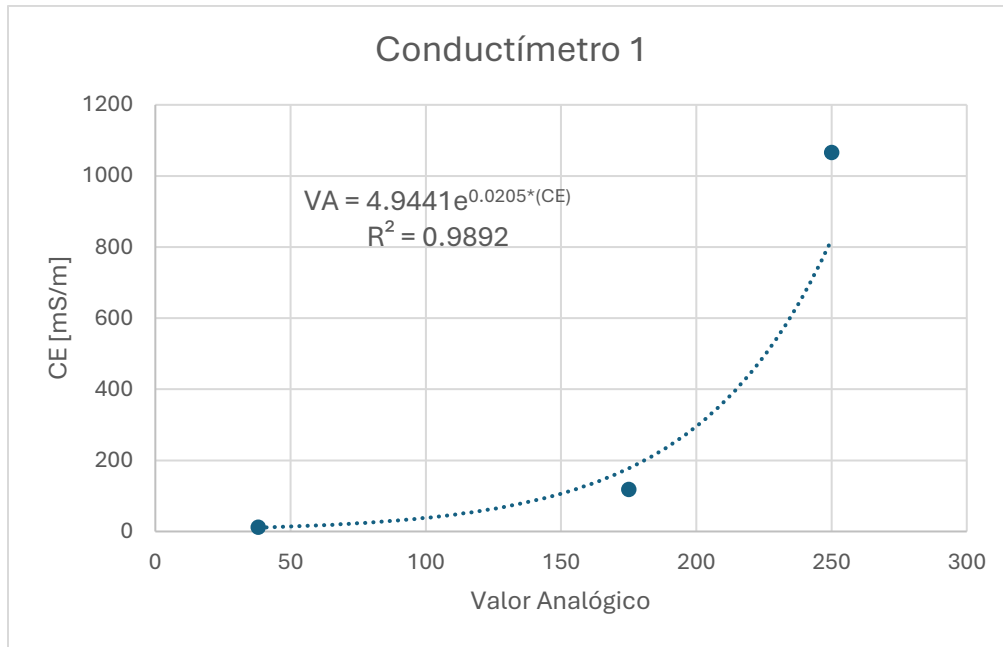


Figura 30. Curva de calibración del conductímetro uno

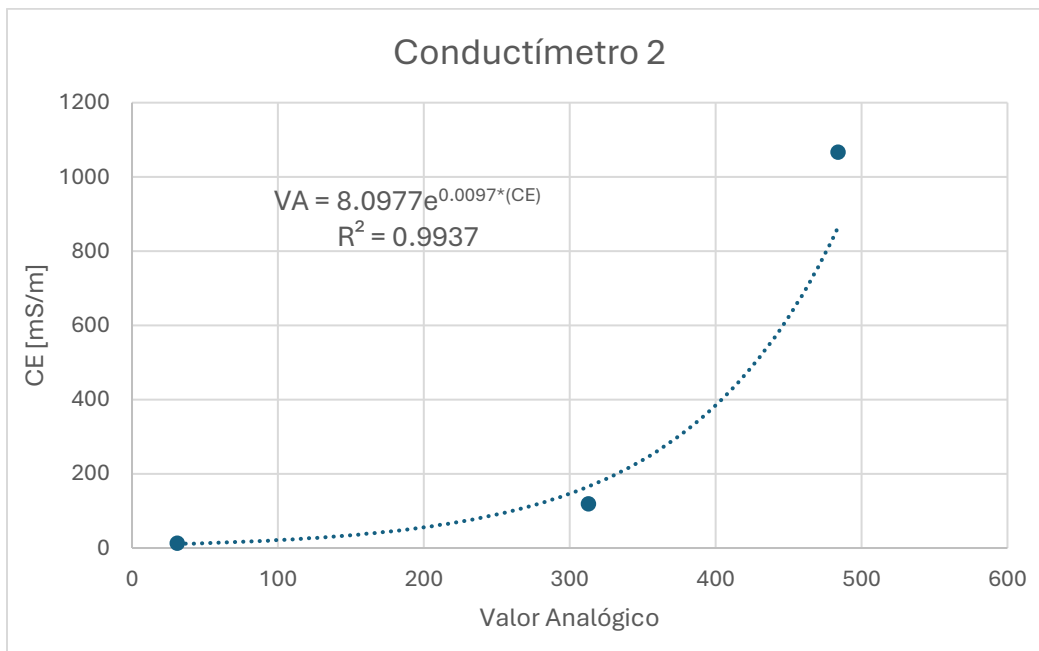


Figura 31. Curva de calibración del conductímetro dos

3.2.6 Programación en Arduino

La programación del lazo de control en Arduino empieza por la declaración de variables para el registro de la información recibida por los sensores, siguiendo con las ecuaciones matemáticas necesarias para recibir la información y relacionar los elementos de control. Igualmente se programó el cálculo del TRH en tiempo real tomando en cuenta el volumen de

proceso del reactor (305 ml) y la velocidad de la bomba según el PWM y si bien Arduino cuenta con un método de impresión de valores en tiempo real, se escogió la herramienta “Data Streamer” para vaciar los datos directamente en hojas de cálculo de Excel con el fin de tener un manejo posterior más fácil de los datos obtenidos, de manera que la hoja de Excel funcionó como Display (Figura 32).

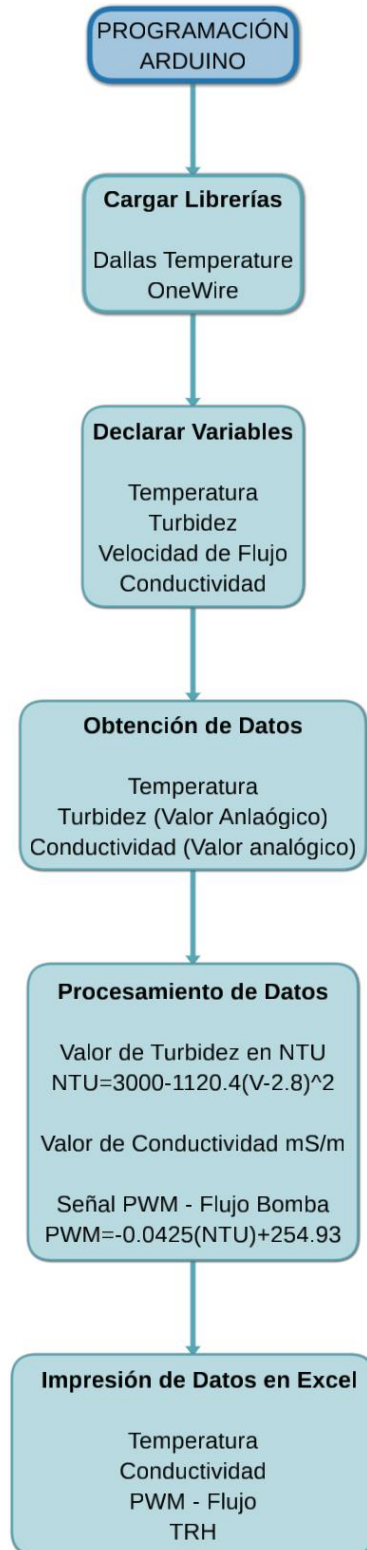


Figura 32. Programa de Arduino de sensores y obtención de datos

3.3 Identificación del Sistema

Para obtener la función de transferencia a utilizar en el lazo de Control de TRH se realizó la simulación del proceso de clarificación de vinaza utilizando el arreglo descrito en la Figura 29. En esta simulación del proceso lo que se cargó el RAFA con vinaza, se llenó el Tanque V-002 (matraz Kitasato) con agua desionizada hasta el borde del tubo lateral (510 ml), y se colocaron 150 ml de vinaza en el tanque V-001 (vaso de precipitado). Así se empezó circular la vinaza por todo el sistema, de manera que el tanque V-002 recibía vinaza de la salida del reactor y esta se iba diluyendo en el agua desionizada y esta mezcla se derramaba hacia el tanque V-001 donde se encontraba la vinaza. El turbidímetro se colocó en el tanque V-001 con la intención de que los valores que se relacionen con la bomba sean los de la entrada debido es importante conocer el estado del influente más que del efluente por la dinámica propia de la DA.

Se realizaron tres corridas de este proceso, cada una con una duración aproximada de 35 minutos, que es el TRH máximo que se puede alcanzar con la bomba peristáltica seleccionada. Entre cada corrida se vació el contenido del V-002 (agua desionizada y vinaza) y se reemplazó sólo con agua desionizada, de nuevo hasta el borde del tubo lateral, buscando que con cada corrida se alcance una mayor dilución de la vinaza. Los datos se tomaron cada 10 segundos en la primera corrida y cada 5 segundos en las otras dos.

3.3.1 Herramienta System Identification de Matlab

Para generar la función de transferencia se utilizó la herramienta “Identificación de Sistema” de la paquetería de Matlab para relacionar el TRH con los valores de NTU siendo la señal de entrada los valores del TRH del experimento descrito anteriormente y el valor de la turbidez la señal de salida (Figura 33).



Figura 33. Variables relacionadas para encontrar el modelo matemático del sistema

Se manejaron cuatro grupos de datos; tres grupos corresponden a cada una de las corridas de dilución de vinaza y el cuarto grupo a la unión secuencial de estos datos. De cada conjunto de datos se obtuvieron dos funciones de transferencia tanto de tipo continuo como discreto, en total 4 modelos diferentes. Se buscó que estas funciones de transferencia fueran de primer orden

(Ecuación 17) y segundo orden (Ecuación 18), además de tipo continuo y discreto; sin embargo, también se optó por otro tipo de configuraciones como un cero y dos polos (Ecuación 19), y dos polos y dos ceros (Ecuación 20), donde a y b son constantes.

$$G = \frac{b}{a + s}$$

Ecuación 17. Función de transferencia primer orden

$$G = \frac{b}{a + s + s^2}$$

Ecuación 18. Función de transferencia segundo orden

$$G = \frac{a + s}{a + s}$$

Ecuación 19. Función de transferencia con un polo y un cero.

$$G = \frac{a + s + s^2}{a + s + s^2}$$

Ecuación 20. Función de transferencia con dos polos y ceros.

Se contempló esta variedad de funciones para tener una mayor cantidad de opciones para escoger el modelo, debido a que son varios los factores para escoger la función de transferencia, como el porcentaje de coincidencia con los datos experimentales, así como la estabilidad de los polos y las pruebas estadísticas para validar el modelo.

3.3.2 Validación de los modelos obtenidos

De cada grupo se tomaron las 4 funciones de transferencia con el mayor nivel de coincidencia con los datos experimentales. Posteriormente se realizó a cada modelo el análisis de polos y ceros eliminando los sistemas que fuesen inestables, además de las pruebas de blancura e independencia para evaluar la exactitud estadística del modelo y escoger la función de transferencia con mejores resultados en estas pruebas.

Para seleccionar la función de transferencia que se utilizó en el lazo de control se utilizaron como criterios el porcentaje de exactitud y los resultados del análisis de residuales y así seleccionar un solo modelo para la función de transferencia.

3.3.3 Obtención de los parámetros del controlador en Simulink

Se realizó un lazo de control en Simulink usando la función de transferencia seleccionada, poniendo como set-point del sistema el valor registrado de 10% vinaza, 423 NTU, esto debido a que según Méndez-Acosta, y otros, (2009); los sistemas de biodigestión anaerobia suelen eliminar del 90 al 95% de los DQO en la vinaza de la Tequila, que es un tipo de mezcal. Si bien este nivel de DQO no cumple con la norma mexicana para desagüe de industrias a cuerpos de aguas, el parámetro pedido es muy pequeño para ser alcanzado por el RAFA, por lo cual en un

hipotético caso a nivel industrial tendría que realizarse un segundo tratamiento para su vertimiento en cuerpos de agua.

Luego, se aplicó el método CHR de lazo abierto para casos regulatorios para encontrar los valores de las constantes del controlador, evaluando el funcionamiento del controlador P, PI y PID para observar cual muestra mejor desempeño para estabilizar el sistema. Finalmente, se hicieron pruebas al controlador de las señales estándares de entrada escalón y pulso unitarios, así como la señal aleatoria y entradas de cambios sostenidos de diferente magnitud tomando en cuenta el comportamiento del sistema de DA para observar su respuesta a las perturbaciones.

3.4 Desarrollo de la Interfaz de Control para el procesamiento de Señales

En esta etapa se desarrolló en la herramienta de App Designer de Matlab la interfase para la visualización y procesamiento de señales, la cual enviará y recibirá las señales directamente a la tarjeta de Arduino sin tener que utilizar el software de este.

Para conseguir un adecuado desarrollo de la interfaz y se siguieron los principios enumerados por Scaife, R. (2017).

La información que debe aparecer del proceso es:

1. Valores de las variables del proceso para el estudio del reactor: Temperatura, TRH y Turbidez.
2. Esquema del sistema basado en el DFP, con algunos cambios orientados a mostrar de forma más exacta la posición de los elementos del sistema, es decir, si en la planta está a la derecha del RAFA el tanque de almacenamiento, entonces así se muestra en la interfaz, aunque en el diseño del DFP se ponga del lado izquierdo por convención respecto al lugar de las corrientes de insumos y productos.

En cuanto a la información necesaria para el operador se tomaron en cuenta las siguientes actividades que debe realizar sobre el sistema:

1. Iniciar el equipo.
2. Mantener la temperatura en el rango de 30 a 35.
3. Obtener información de las variables de estudio: Temperatura, TRH, Turbidez.
4. Parar el equipo en caso de emergencia.

Para garantizar la coherencia en la interfaz se utilizó la estandarización, colocando en el mismo lugar el botón de paro de emergencia (esquina inferior izquierda), el panel de los lazo de control (lado izquierdo de la pestaña) y las gráficas de datos (lado derecho de la pestaña). Así mismo se utilizó el color verde para indicar que algún elemento está en funcionamiento y el rojo para indicar que emergencia y en el botón de paro de emergencia. Para asegurar una correcta gestión de alarmas se utilizó el principio de cabina oscura haciendo que el color de fondo de la ventana cambié a rojo en caso de que la temperatura pase de los 35 °C, de manera que se pueda observar en cada una de las pestañas en que se encuentre el operador y entienda que debe tomar acciones sobre el proceso.

Siguiendo la jerarquización de la información, se diseñó la interfaz para que la primera pestaña sea la ventana que muestra el proceso de manera general, y en las pestañas secundarias se pueda observar la información detallada de cada lazo de control, junto con los comandos correspondientes a cada lazo, lo cual ayudará a cumplir al mismo tiempo el principio de evitar la saturación de información (Figura 34).

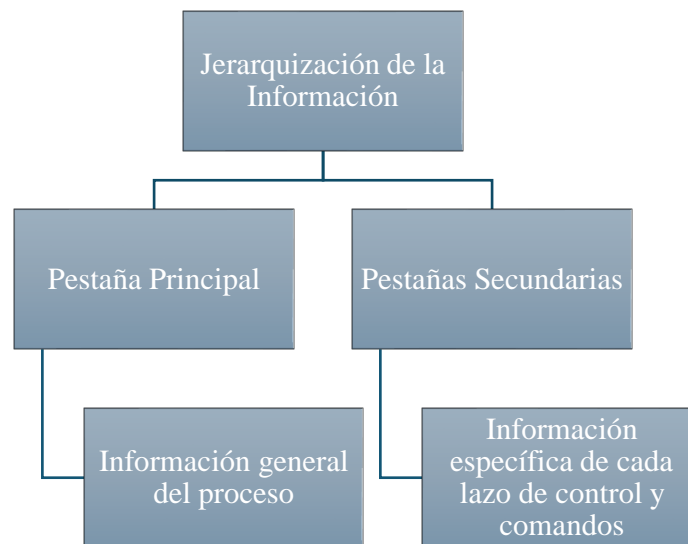


Figura 34. Jerarquización de la información en el diseño de la interfaz de Control

En cuanto a la impresión de los datos, además de las gráficas en tiempo real, se colocó un botón de paro del sistema y guardado de datos, de manera que los datos de tiempo, turbidez, TRH y Temperatura se guardan en una hoja de Excel a la cual se puede acceder posteriormente.

3.5 Desarrollo del Lazo de Control de TRH

Para el desarrollo final del lazo de TRH se programó en la Interfaz el funcionamiento de los elementos, al funcionamiento ya establecido de la bomba se le agregó la acción de control utilizando las ecuaciones establecidas, además se colocó la opción para que el operador pueda ingresar los valores de los parámetros de control en la interfaz.

Cabe destacar que en caso de que el controlador calculara un TRH mayor al que la bomba puede manejar se estableció en la programación para que este fuera del TRH máximo, lo mismo en caso de que fuera un valor de menor para evitar datos no acordes a la realidad reportados por la interfaz de control.

3.6 Desarrollo del lazo de control para el ajuste térmico

En cuanto al lazo de ajuste térmico lo que se buscó realizar en la interfaz fue conectar el hardware (calentador de pecera y controlador ON-OFF), de manera que se pueda observar la temperatura del tanque de almacenamiento y si el calentador está encendido o apagado. No fue necesario programar el funcionamiento del controlador ON-OFF en la interfaz debido a que se puede programar directamente en el hardware.

3.7 Prueba del Sistema de Control elaborado

Para observar el funcionamiento del lazo de control *in situ* se realizó una prueba con todo las partes del lazo de control, desde hardware, e interfaz de control en el RAFA, en este caso se trató de una prueba trazador en la que el elemento que da color al fluido es un colorante vegetal, colocando el sensor de Turbidez directamente sobre la tubería que descarga la salida del Reactor.

4. RESULTADOS

Introducción

En este apartado se muestran los valores obtenidos de la Turbidez y TRH de los tres experimentos de dilución de vinaza dentro del RAFA, los cuales se utilizaron para calcular la función de transferencia utilizando la herramienta de Identificación de Sistema de Matlab, así como los valores reportados por los conductímetros durante esta misma experimentación que nos permiten evaluar su utilidad como parámetro de monitoreo del sistema.

Se encuentran los resultados de las pruebas de estabilidad y análisis de residuales de los modelos matemáticos obtenidos, así como la selección final de la función de transferencia, para continuar con la sintonización y elección del controlador para el sistema y las gráficas de las señales de respuesta obtenidas a las entradas que se propusieron en la metodología. Finalmente se presentan las ventanas de la interfaz de control que se realizaron tomando en cuenta las consideraciones de la literatura.

4.1 Datos obtenidos al diluir la vinaza con agua desionizada en el RAFA

En la Figura 35 se observa el valor de las señales de entrada (TRH) y salida (Turbidez) obtenidas en la primera parte del experimento. Se observa un descenso del valor de Turbidez desde 2600 hasta casi 1400 NTU, durante los primeros 650 segundos de esta primera parte, para luego volver a elevarse el valor de la turbidez hasta 2200 en $t = 840$ aproximadamente y volver a disminuir hasta 1400 nuevamente en un lapso de 200 segundos para posteriormente volver a elevarse de forma abrupta hasta 1844 NTU y durante 1000 segundos aproximadamente elevarse paulatinamente hasta 2100 NTU. En $t = 2130$ se vuelve a observar una subida abrupta en el valor de la turbidez hasta alcanzar los 2600 NTU.

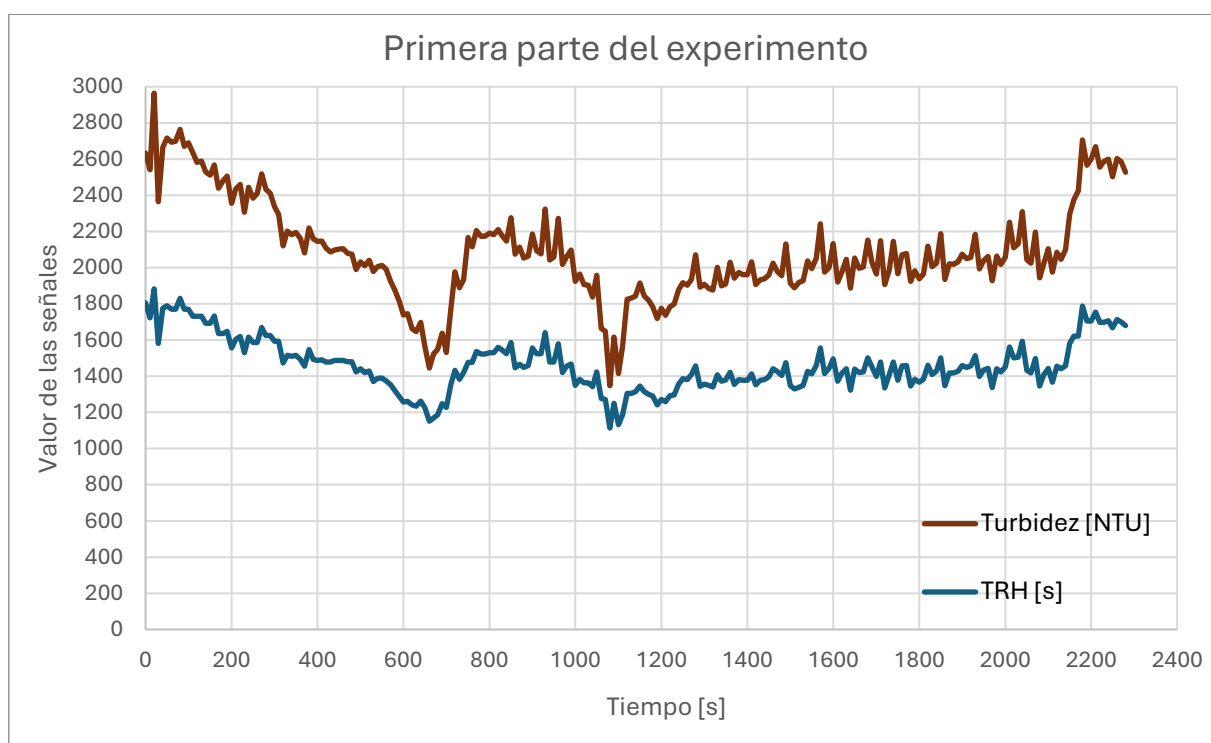


Figura 35. Valores de Turbidez y TRH con respecto al tiempo en la primera parte del experimento

Este comportamiento de rápidas disminuciones y aumentos de manera lenta, y en algunos momentos de forma abrupta en el valor de la turbidez a la entrada del RAFA (tanque V-001), se debe a que conforme avanza el proceso se va oscureciendo el fluido del tanque V-002 al tiempo que se derrama al V-001, de manera que en un primer momento disminuye la turbidez porque el contenido del tanque V-002 es prácticamente agua desionizada solamente; para que después cuando ya empieza a haber más vinaza en V-002 empiece a oscurecer nuevamente el fluido dentro de V-001 por el fenómeno de derrame.

En la segunda parte del experimento (Figura 36) se observa que la turbidez inicial está en continuidad con el valor final del primer experimento. En este caso se observa una disminución rápida (en los primeros 100 segundos) del valor de la turbidez de 2600 NTU hasta 2100 aproximadamente, para luego mantenerse oscilando alrededor de 2200 NTU durante 250 segundos, y desde $t = 350$ la turbidez experimenta una disminución hasta 1400 NTU en $t = 1600$. Este intervalo de disminución contempla oscilaciones propias del ruido que presenta el sensor así como de las partículas suspendidas que se pueden encontrar en la vinaza.

Desde $t = 1600$ empieza a aumentar el valor de la turbidez para llegar a 1950 NTU, volver a disminuir abruptamente y volver a aumentar repentinamente en $t = 1850$, llegando la turbidez a 2400 NTU, luego de unos 30 segundos aproximadamente. Desde ese punto nuevamente empieza a disminuir el valor de NTU lentamente.

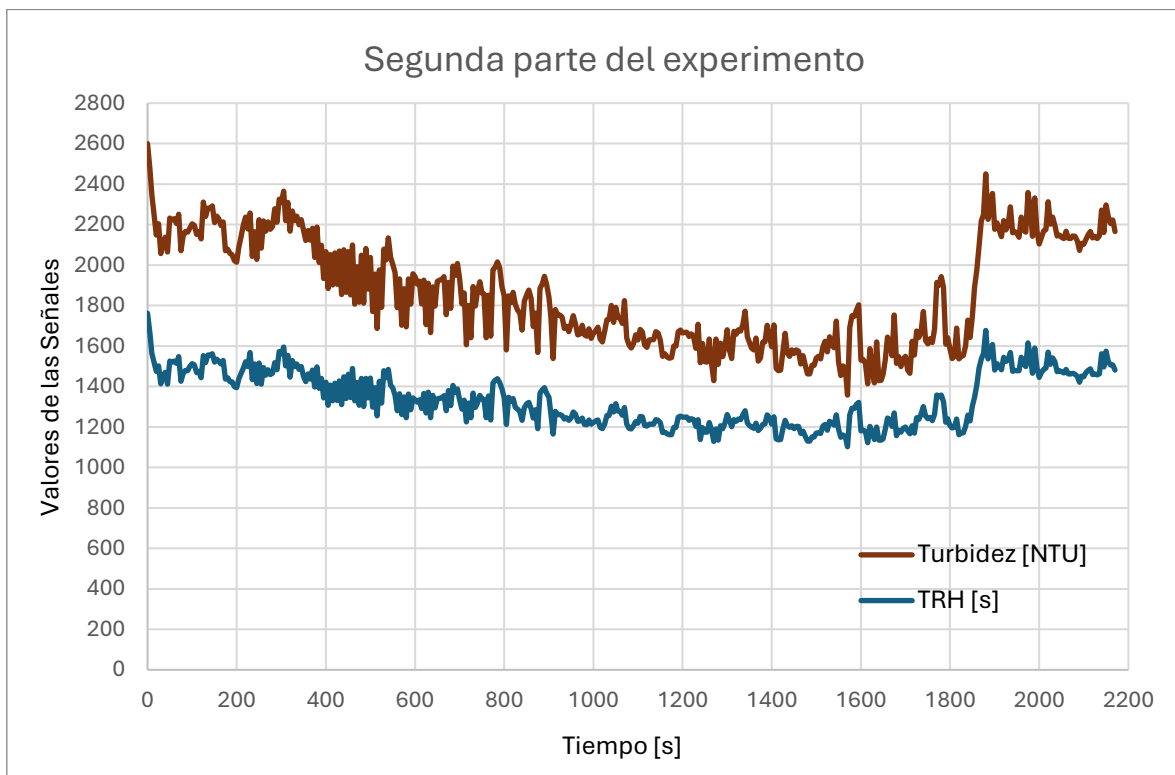


Figura 36. Valores de Turbidez y TRH con respecto al tiempo en la segunda parte del experimento

Para la tercera parte del experimento (Figura 37) se observa una disminución del valor de la turbidez en los primeros 180 segundos, para luego empezar un aumento breve alcanzando un valor superior a 2200 NTU en $t = 250$. Este comportamiento genera dudas puesto que es muy rápido como para que se dé un salto como en los casos anteriores provocados porque V-002 se

va llenando de vinaza y entonces empieza a oscurecerse el líquido dentro de este, tampoco se observa un salto tan drástico, sino una subida constante.

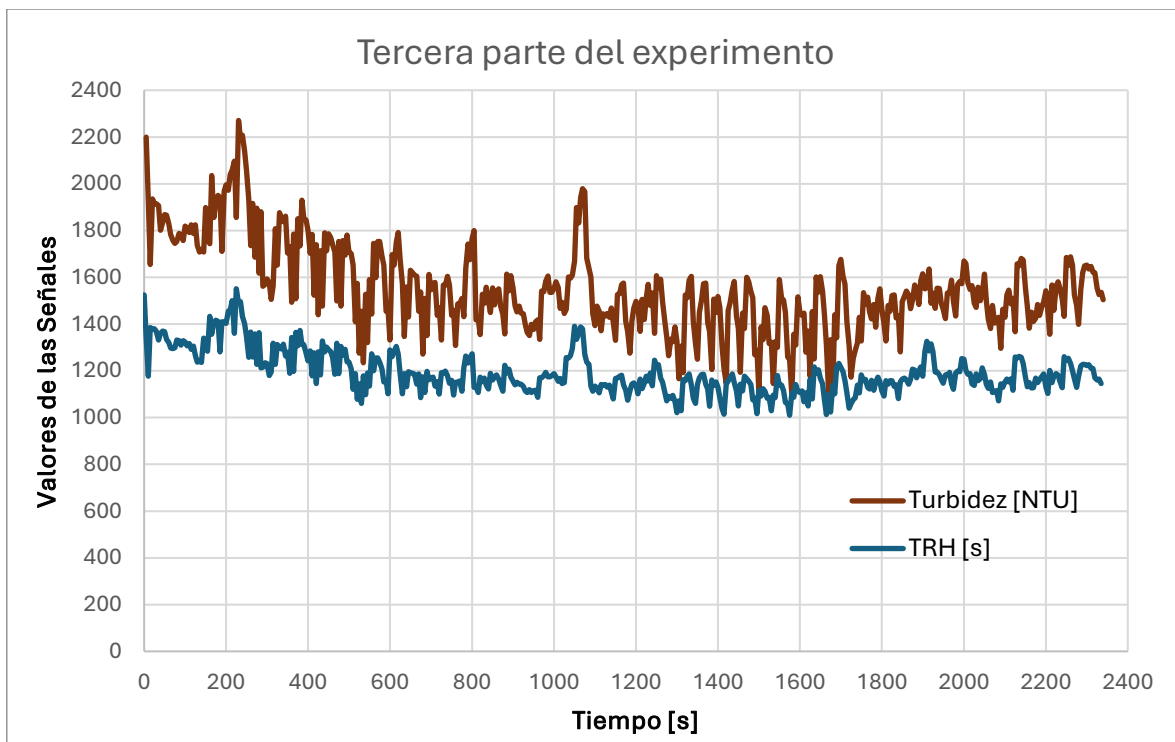


Figura 37. Valores de Turbidez y TRH con respecto al tiempo en la tercera parte del experimento

Desde $t = 250$, se observa una disminución del valor de la turbidez (con oscilaciones) primero sostenido y en $t = 1000$ hay un pico notable, pasando de 1500 NTU hasta casi 2000 NTU para luego regresar de nuevo a 1500 NTU. Desde ese punto sigue disminuyendo la turbidez para desde $t = 1200$ mantenerse alrededor de 1400 NTU. Finalmente desde $t = 1750$ se observa nuevamente un ligero aumento de la turbidez, sin embargo, al ya estar muy diluida la vinaza en este momento del experimento, los cambios en esta variable son menos bruscos y más lentos.

En cuanto al valor del TRH en las tres partes del experimento se observa un comportamiento directamente proporcional, de manera que cuando aumenta el valor de NTU aumenta el TRH y viceversa, lo cual se espera por la programación dada en Arduino al sistema, si bien en un inicio esto ya es un control se observa poco robustez porque es muy propenso a la perturbaciones que se dan en los valores de NTU, por ello es necesario un controlador PID.

4.2 Valores de Conductividad

Los valores de Conductividad Eléctrica (CE) obtenidos están dentro del rango reportado por la literatura (1560 a 3090 mS/m.), aunque se observa que en el caso de la CE de V-001 hubo

un rango mayor de valores, de hasta 4 000 mS/m. En el caso de la CE del tanque V-002 se observan valores fuera del rango reportado por la literatura, pero esto se debe a que la vinaza estaba disuelta en agua desionizada, así que al no ser vinaza pura se pueden esperar valores menores de conductividad.

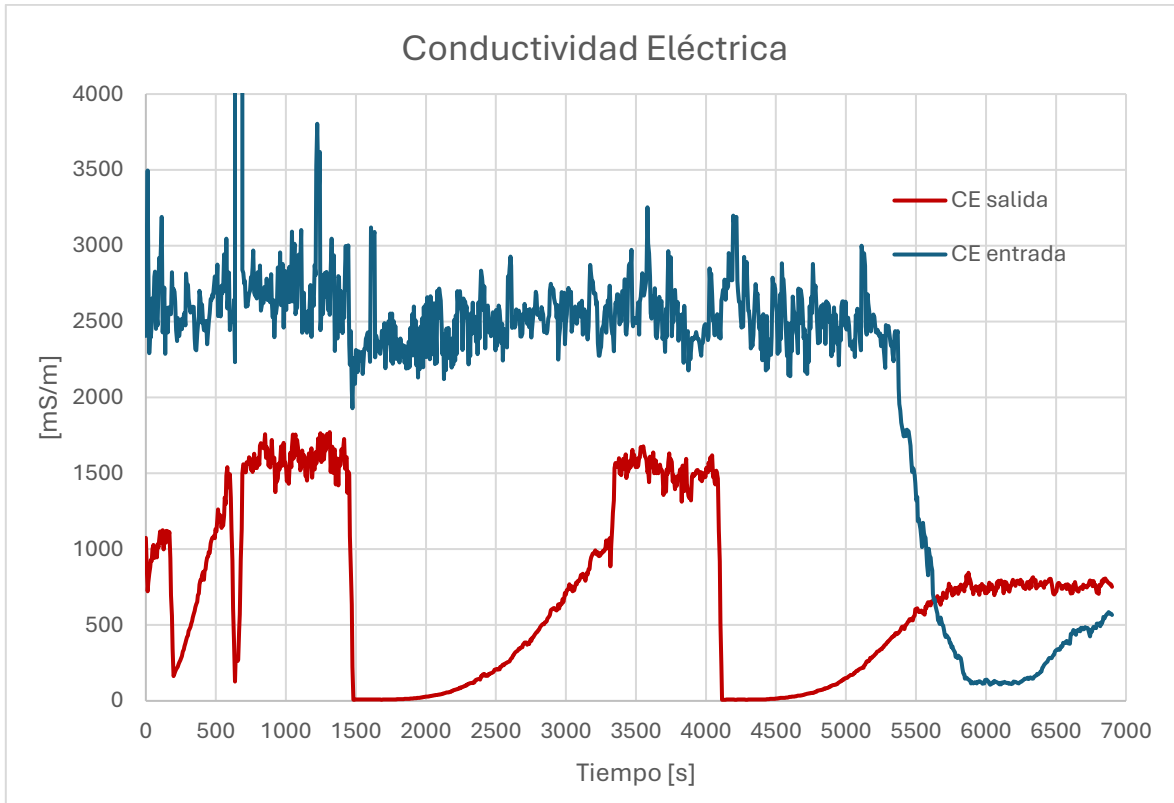


Figura 38. Valores de CE a la entrada y salida del RAFA

Observando la Figura 38, se ve que la CE del tanque V-001 se mantiene prácticamente todo el tiempo dentro del rango de CE para la vinaza, hasta que en $t = 5200$, al ya estar muy diluida la vinaza el valor de la conductividad cae rápidamente para volver a experimentar un pequeño aumento en su valor al final. En cuanto al valor de CE a la salida del reactor, se observa un intervalo de aumento de la conductividad para luego saturarse alrededor del valor de 1500 mS/m, la abrupta disminución que se observa en $t = 1500$ y en $t = 4100$ se debe al vaciado del contenido de V-002 y su relleno con agua desionizada como ya se comentó en la metodología.

Es importante mencionar que los abruptos aumentos y disminuciones de la CE en el intervalo de tiempo $t = 588$ a $t = 690$ se debe a que en ese momento los conductímetros se desconectaron de la placa de Arduino, lo cual generó errores en las mediciones.

En el tercer intervalo del experimento se observa que la CE se comporta de manera similar a los otros dos intervalos, sin embargo en este caso se satura en 720 mS/m, esto se debe a que en punto del experimento la vinaza se encuentra muy diluida, entonces el valor de la CE alcanza un valor menor que en los anteriores intervalos.

Con estas gráficas es fácil observar que la CE no es un parámetro que nos ayude a monitorear el proceso de clarificación de la vinaza puesto que los cambios en la CE no son los suficientemente finos como para darnos una idea de en qué grado de clarificación se encuentra la vinaza, en contraste con la turbidez que presenta cambios más marcados conforme avanza el proceso de clarificación.

4.3 Identificación del Sistema

Uniendo los datos de las tres partes del experimento se obtuvieron 4 modelos que encajaban con el sistema (Tabla 10 y Figura 39). Tres de tipo discreto y uno de tipo continuo. Siendo el que presenta un mayor porcentaje de coincidencia el de tipo continuo.

En cuanto al análisis de estabilidad de las raíces, los modelos discretos tienen sus raíces dentro del círculo unitario (Figura 40), por lo tanto se consideran estables. En cuanto al sistema continuo, uno de los polos se encuentra en el origen, por lo tanto se considera un sistema marginalmente estable.

Así mismo, para el análisis de blancura (Figura 41) se puede observar que todos los modelos discretos están fuera del intervalo de confianza y el modelo continuo tiene algunos picos dentro de este intervalo de confianza, de manera que no son adecuados para describir el proceso pese a tener un porcentaje de coincidencia alto.

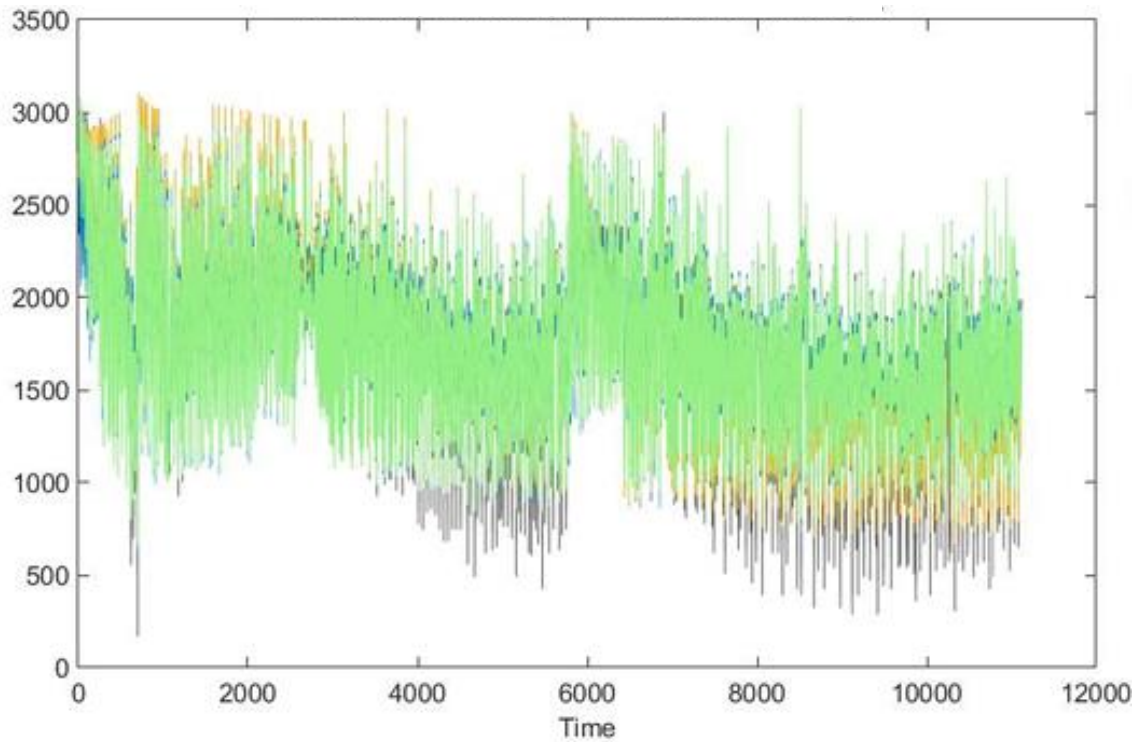


Figura 39 Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales

Tabla 10. Modelos obtenidos con los datos de las tres partes del experimento

Etiqueta	Ecuación del modelo	% de coincidencia con los datos experimentales	COLOR
2-2Cont	$\frac{2.056s^2 + 0.009151s - 0.000001}{s^2 + 0.006125s + 0.000000008}$	76.14	Beige
2Dis	$\frac{1.806}{z^2 + 0.1979z + 0.1142}$	71.72	Celeste
1Dis	$\frac{1.65}{z + 0.1933}$	69.35	Azul rey
1-2Dis	$\frac{1.971z - 1.854}{z^2 - 0.8748z - 0.03908}$	73.61	Verde

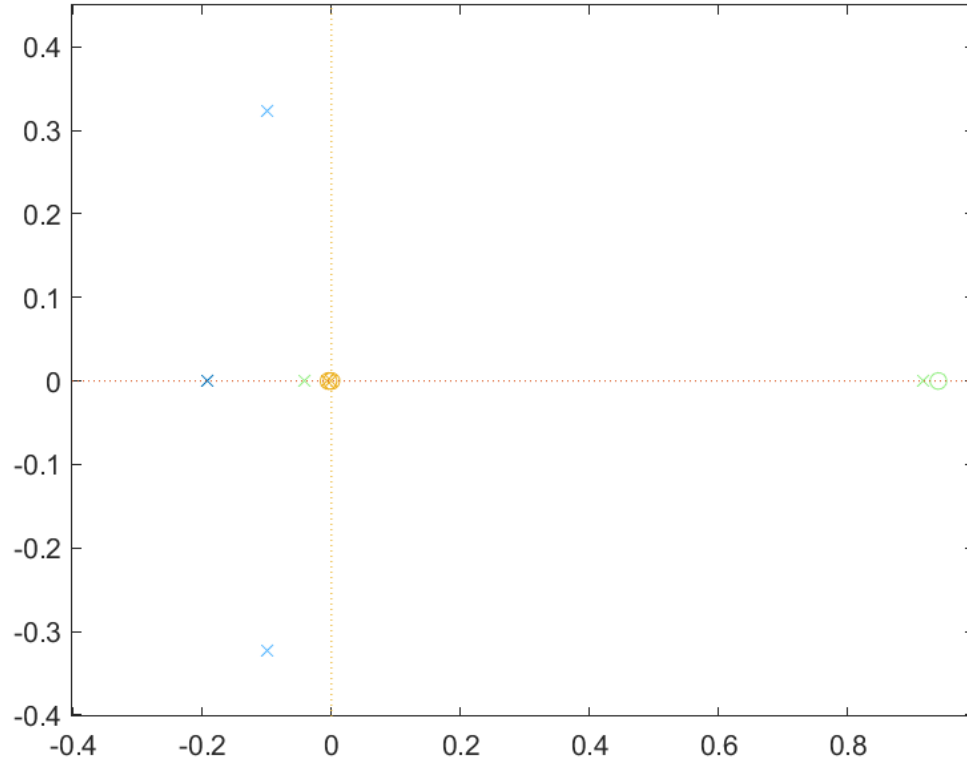


Figura 40. Raíces de los modelos obtenidos con los datos unidos de los tres experimentos

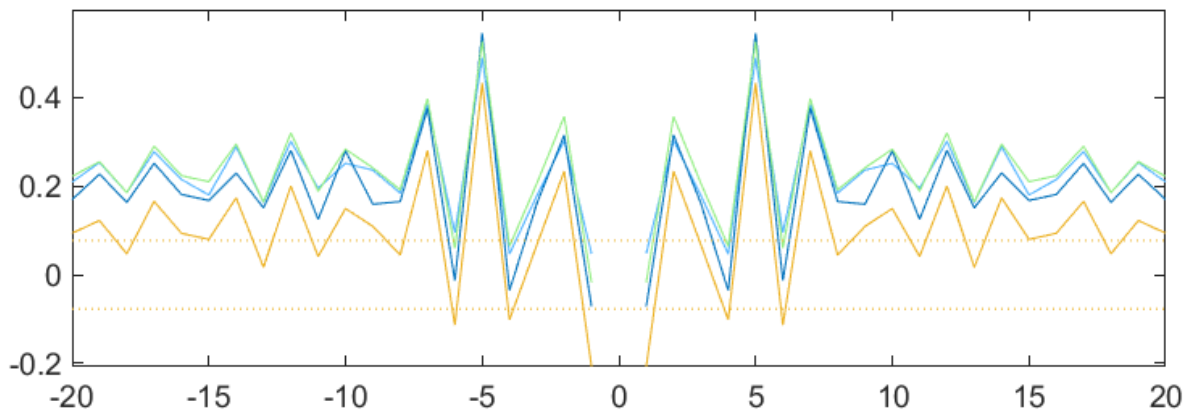


Figura 41 Prueba de blancura de los 4 modelos obtenidos con los datos unidos de las tres partes del experimento

4.3.1 Datos de la primera parte del experimento

Para los datos de la primera parte del experimento también se obtuvieron 4 modelos (Tabla 11 y Figura 42). Dos de tipos discreto, y dos de tipo continuo.

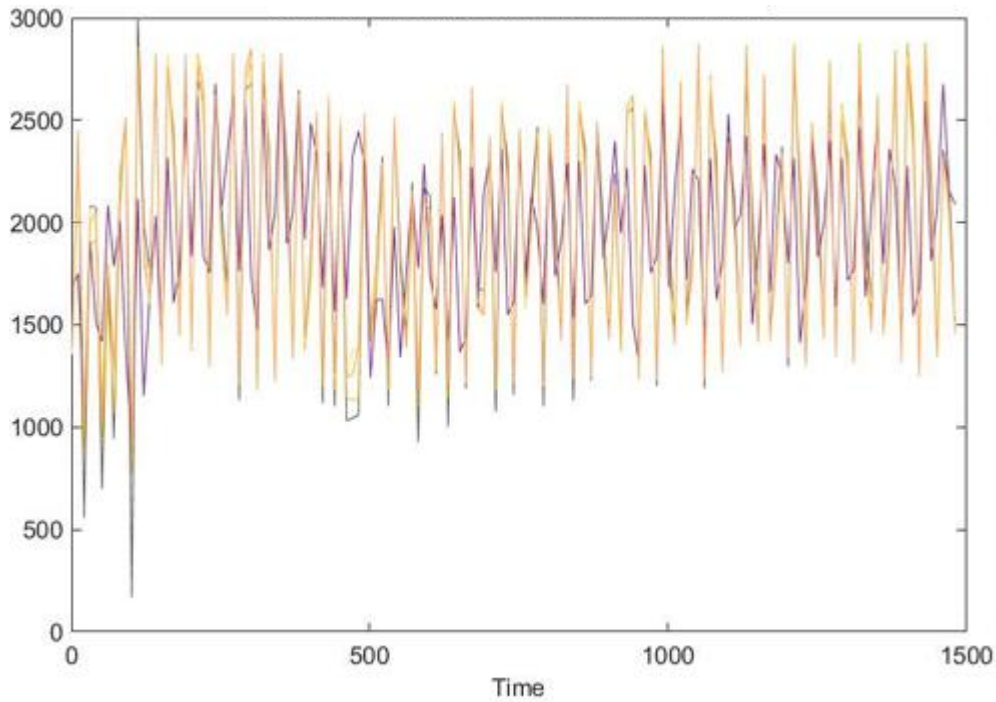


Figura 42 Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales de la primera parte del experimento

Tabla 11. Modelos obtenidos con los datos de la primera parte del experimento

Etiqueta	Ecuación del modelo	% de coincidencia con los datos experimentales	COLOR
2-2Cont	$\frac{1.849s^2 + 0.4532 + 0.0001168}{s^2 + 0.2401s + 0.00077}$	82.16	Beige
2Dis	$\frac{1.689}{z^2 + 0.1022z + 0.09877}$	79.98	Naranja
1Dis	$\frac{1.575}{z + 0.1147}$	76.7	Amarillo
1-2Cont	$\frac{-0.1998s + 0.004012}{s^2 + 0.07904s + 0.002838}$	20.17	Morado

Se realizó el análisis de estabilidad siguiendo el criterio del lugar de los polos del sistema, obteniendo que los 4 sistemas tienen sus polos dentro del área de estabilidad, exceptuando un

polo del sistema continuo con dos polos y dos ceros, el cual tiene un polo en el eje imaginario, por lo cual este sistema es marginalmente estable (Figura 43).

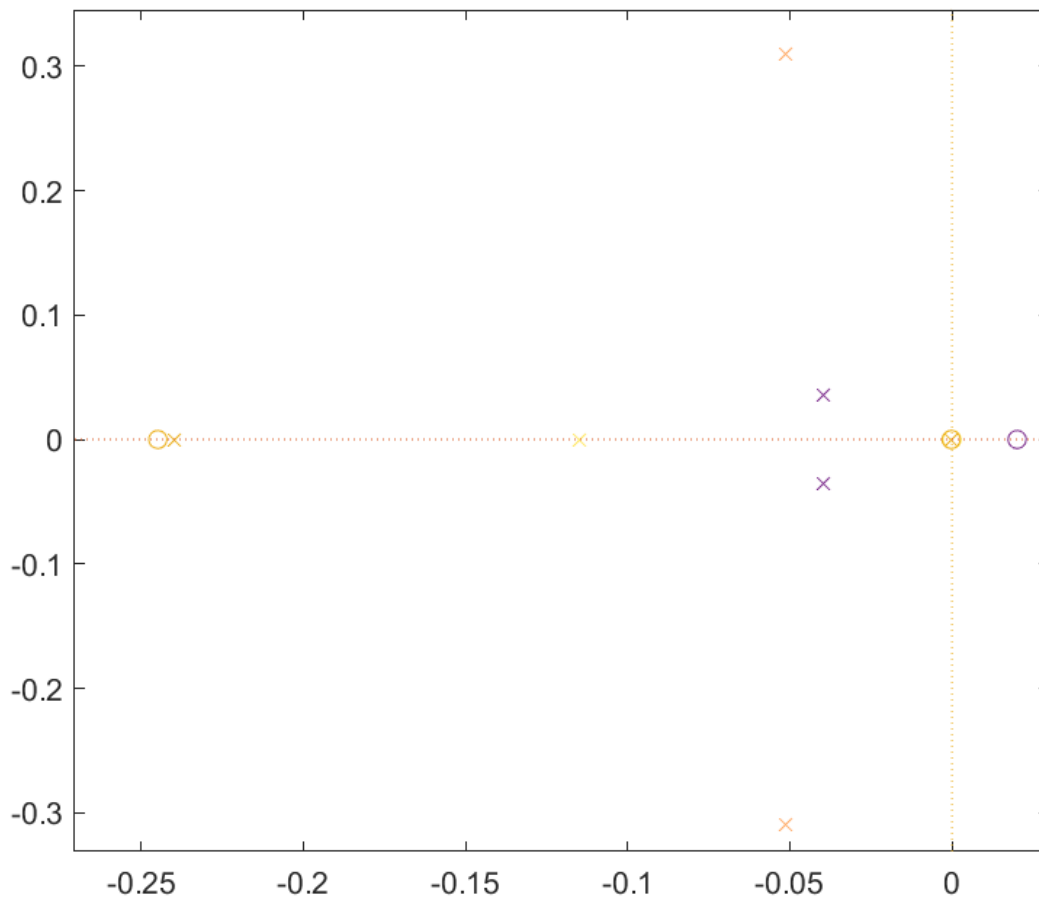


Figura 43. Lugar de las raíces de los modelos obtenidos con los datos de las tres partes del experimento

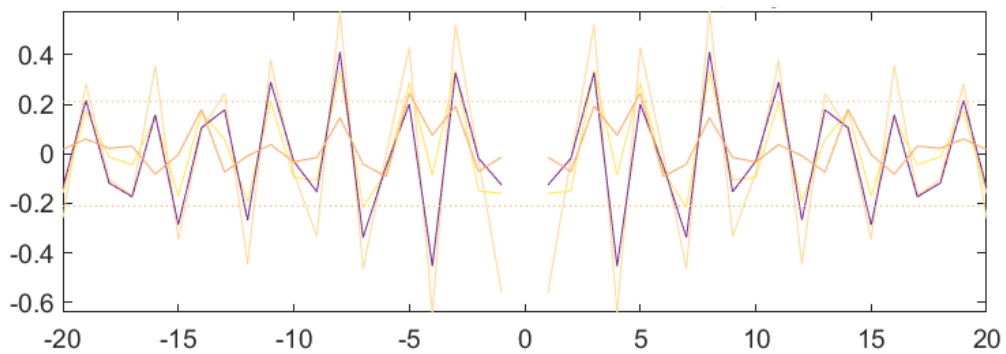


Figura 44. Prueba de Blancura

Para la prueba de blancura (Figura 44), se observa que los sistemas que entran dentro del intervalo es el discreto de segundo orden y el continuo con dos polos y dos ceros, por lo cual el resto se descartan. Los dos modelos restantes igualmente están dentro del intervalo de confianza de la

prueba de independencia (Figura 45), por lo tanto, se escoge el que mayor porcentaje de coincidencia presenta, es decir el modelo continuo con dos polos y dos cero.

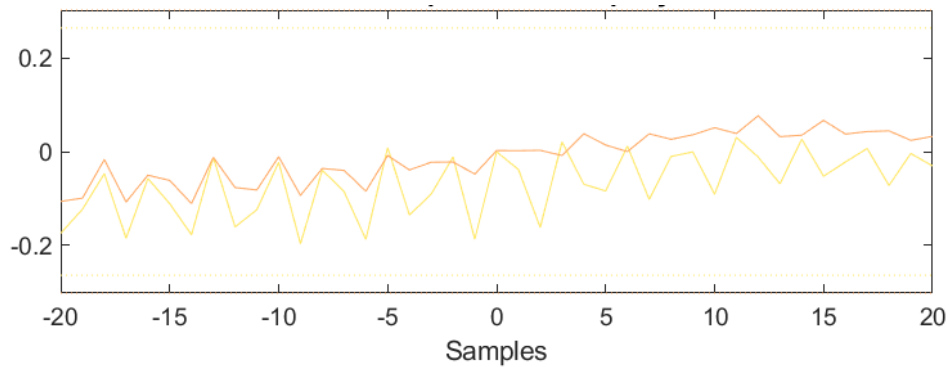


Figura 45. Prueba de independencia de los modelos de segundo orden

4.3.2 Datos de la segunda parte del experimento

Con los datos de la segunda parte del experimento también se obtuvieron 4 modelos (Tabla 12 y Figura 46), también dos discretos y dos continuos. Al igual que el caso anterior todos los sistemas tiene sus raíces dentro del área de estabilidad (Figura 47 y 48). Aunque es importante tomar en cuenta que el modelo continuo con dos polos y dos ceros tiene sus polos muy cerca del eje imaginario.

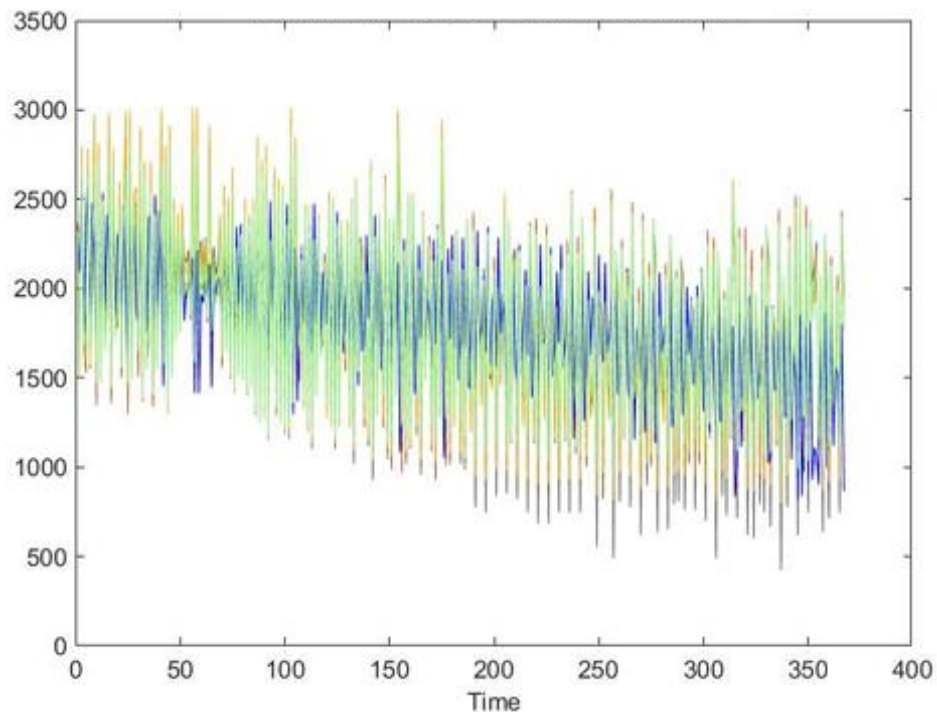


Figura 46. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales de la segunda parte del experimento

Tabla 12. Modelos obtenidos con los datos de la segunda parte del experimento

Etiqueta	Ecuación del modelo	% de coincidencia con los datos experimentales	COLOR
2-2Cont	$\frac{2.067s^2 + 0.02192 + 0.000137}{s^2 + 0.01382s + 0.0001044}$	79.86	Beige
2Dis	$\frac{1.864}{z^2 + 0.1914z + 0.1509}$	76.11	Naranja
1Dis	$\frac{1.643}{z + 0.1773}$	71.55	Verde
1-2Cont	$\frac{-3.452s - 0.002516}{s^2 + 2.056s + 0.002257}$	27.92	Azul

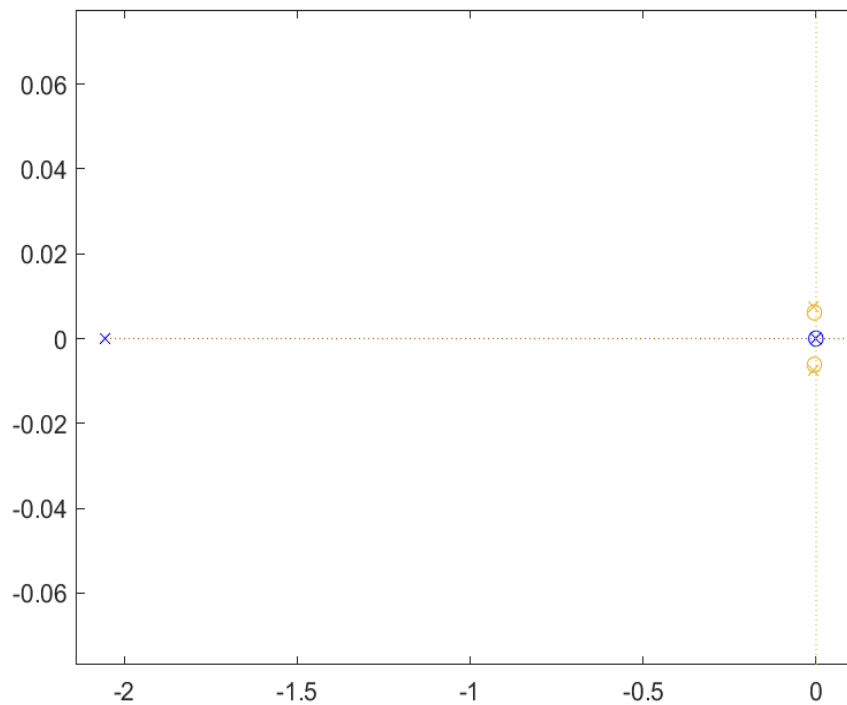


Figura 47. Raíces de los modelos continuos del segundo experimento

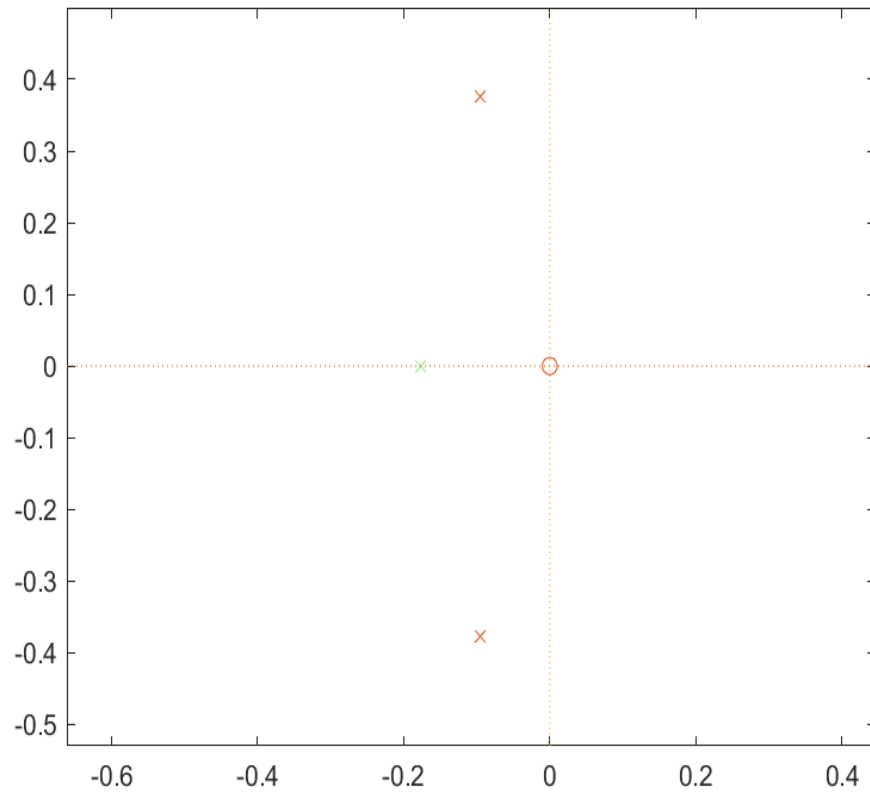


Figura 48. Raíces de los modelos discretos del segundo experimento

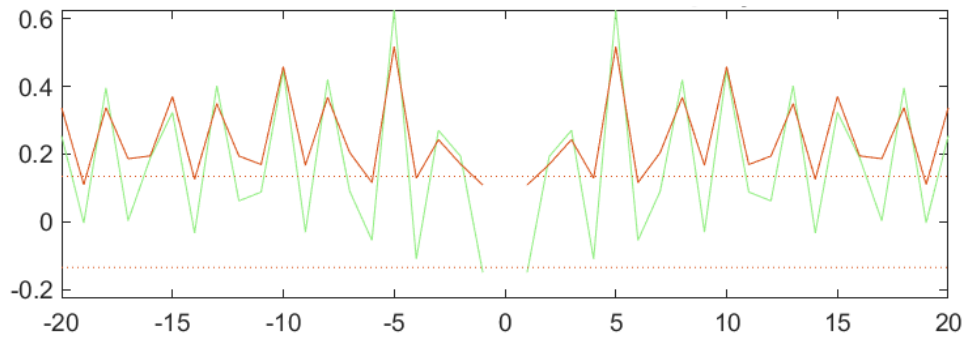


Figura 49. Prueba de blancura de los modelos discretos obtenidos en el segundo experimento

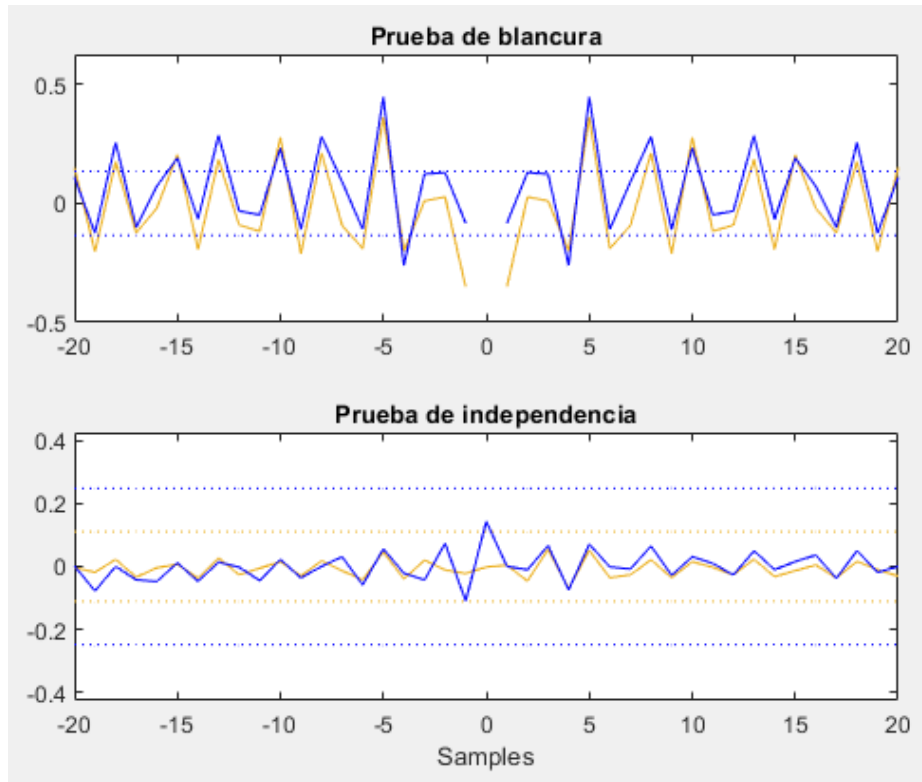


Figura 50. Análisis de residuales de los sistemas continuos de los modelos obtenidos con los datos de la segunda parte del experimento

En la Figura 49, se observa que de nuevo los dos modelos discretos están fuera del intervalo de confianza, por lo que no pasan la prueba de blancura, así que se descartan. En cuanto a los modelos discretos, el que presenta una menor cantidad de picos fuera del intervalo de confianza es el modelo con dos polos y dos ceros (Figura 50), por lo cual es el que se escoge.

4.3.3 Datos de la tercera parte del experimento

Para el tercer experimento se obtuvieron 4 modelos (Tabla 13 y Figura 51), dos de tipo discreto y dos continuos. Todos los sistemas tienen sus raíces dentro del área de estabilidad (Figura 52).

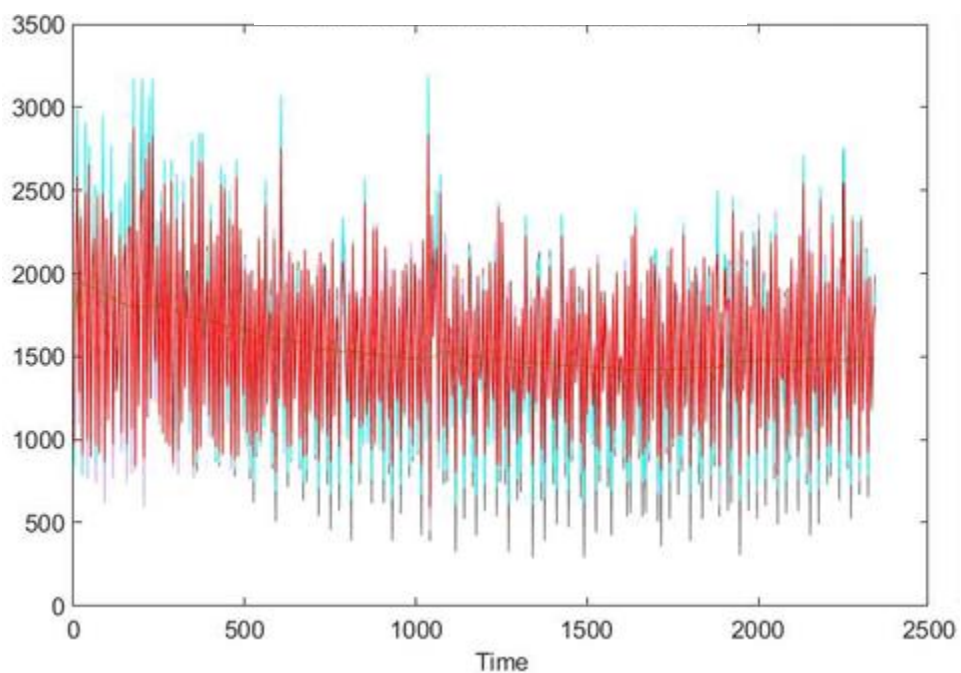


Figura 51. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales de la tercera parte del experimento

Tabla 13. Modelos obtenidos con los datos de la tercera parte del experimento

Etiqueta	Ecuación del modelo	% de coincidencia con los datos experimentales	COLOR
2-2Cont	$\frac{2.364s^2 + 0.0163 + 0.000013}{s^2 + 0.007651s + 0.00001}$	77.33	Azul
2Dis	$\frac{1.921}{z^2 + 0.3046z + 0.1509}$	72.29	Morado
1Dis	$\frac{1.682}{z + 0.2701}$	67.46	Rojo
2Cont	$\frac{0.001487}{s^2 + 0.2477s + 0.001173}$	2.12	Verde

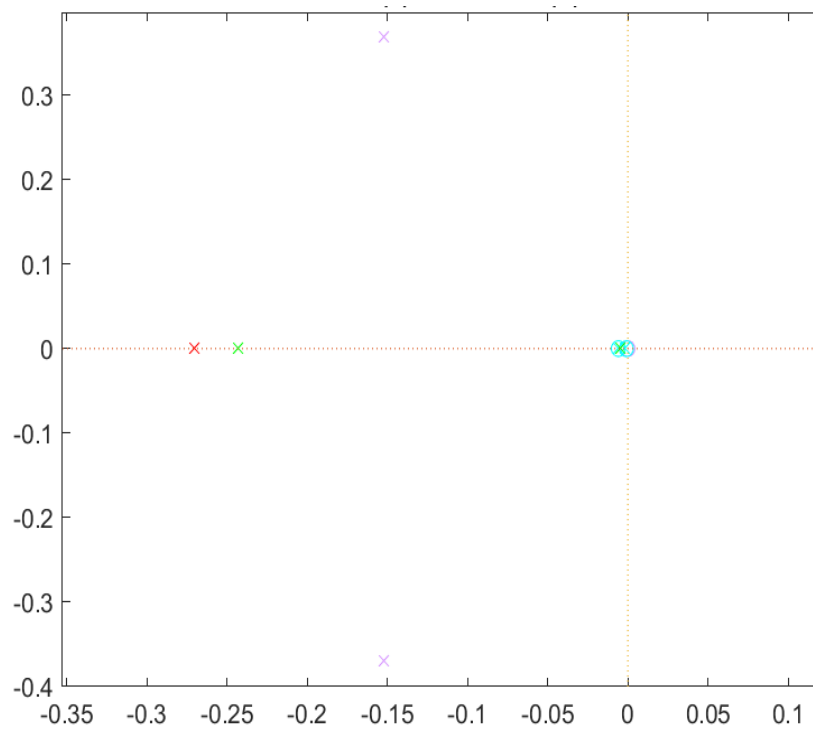


Figura 52. Raíces de los modelos obtenidos con los datos de la tercera parte del experimento

En cuanto a la prueba de blancura, los modelos con menos picos fuera del intervalo de confianza son los modelos continuo con dos polos y dos ceros y el modelo discreto de segundo orden (Figura 53). En cuanto a la prueba de independencia se observa que los dos modelos restantes están dentro del intervalo de confianza (Figura 54); por lo tanto, se opta por el que presenta el mayor nivel de coincidencia, es decir, el modelo continuo con dos polos y dos ceros.

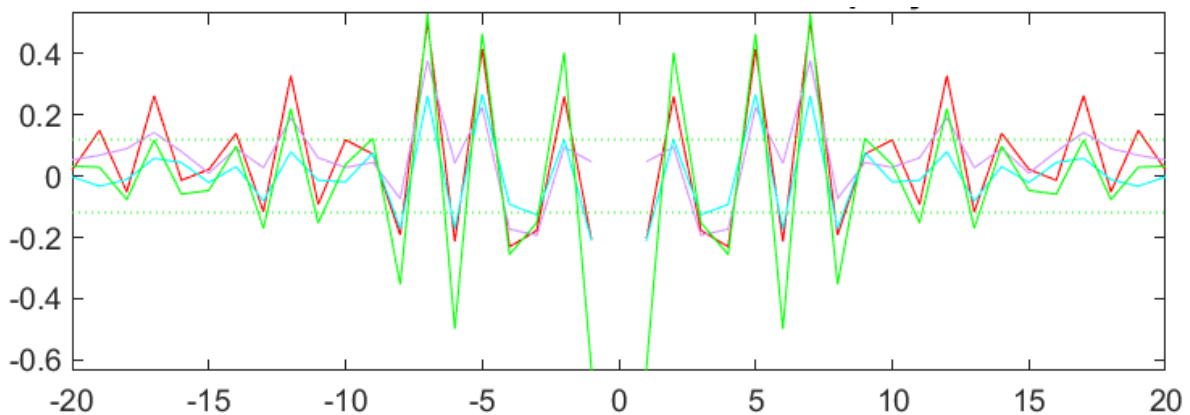


Figura 53. Prueba de blancura para los modelos obtenidos con los datos de la tercera parte del experimento

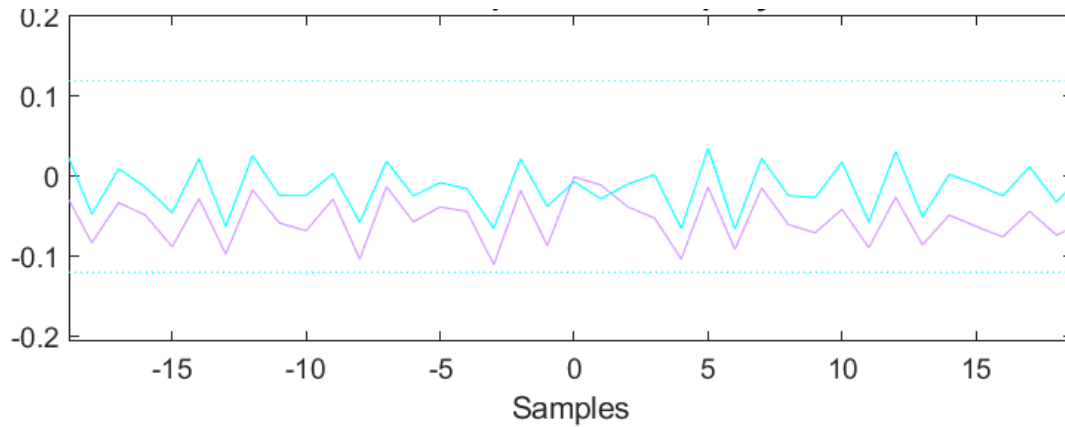


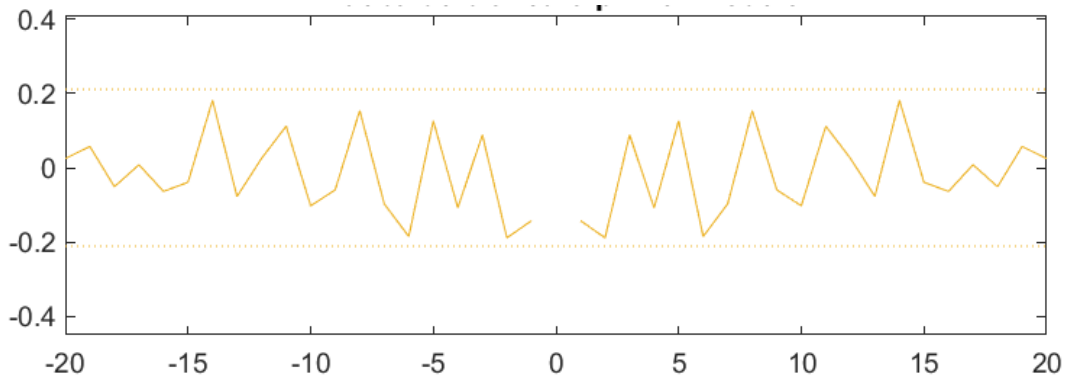
Figura 54. Prueba de independencia de los modelos de los datos de la tercera parte del experimento que pasaron la prueba de blancura

4.3.4 Elección definitiva de la función de transferencia

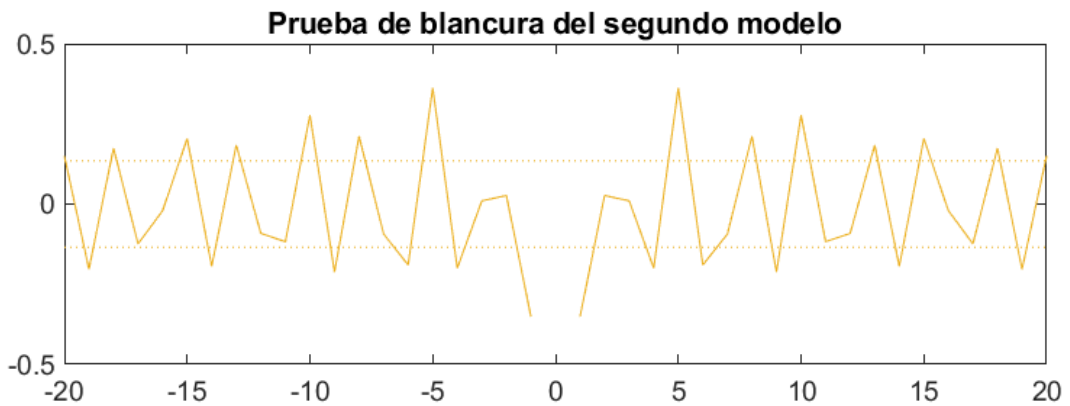
Así obtuvimos sólo 3 funciones de transferencia (Tabla 14), puesto que los modelos obtenidos de los datos en conjunto no pasaron las pruebas estadísticas de validación de modelo. Al observar el análisis de residuos de estas tres funciones (Figura 55) vemos que el modelo que no presenta ningún pico fuera del intervalo de confianza es el que corresponde a la primera parte del experimento, además de ser este el que presenta un mayor porcentaje de coincidencia con los datos experimentales (Figura 56).

Tabla 14. Funciones de Transferencia obtenida de los datos experimentales

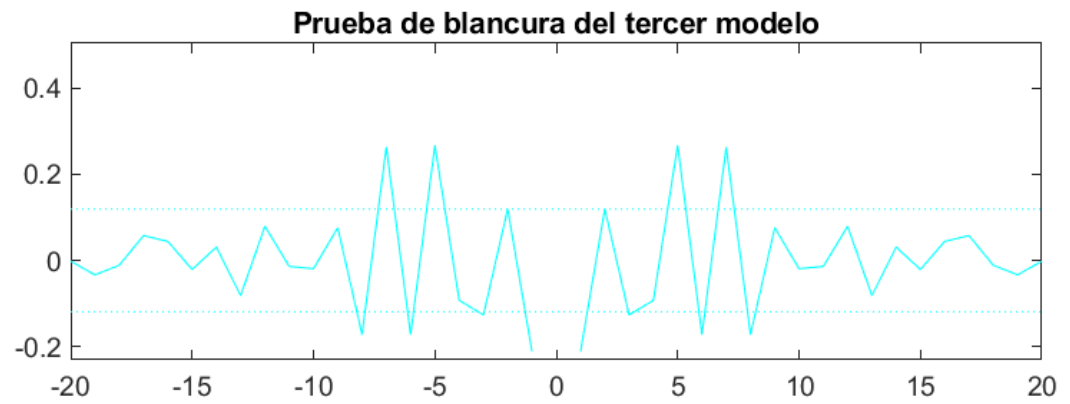
Función de Transferencia	% de Coincidencia	Grupo de datos
$\frac{1.849s^2 + 0.4532 + 0.0001168}{s^2 + 0.2401s + 0.00077}$	82.16	Primera parte del experimento
$\frac{2.067s^2 + 0.02192 + 0.000137}{s^2 + 0.01382s + 0.0001044}$	79.86	Segunda parte del experimento
$\frac{2.364s^2 + 0.0163 + 0.000013}{s^2 + 0.007651s + 0.00001}$	77.33	Tercera parte del experimento



a)



b)



c)

Figura 55. Prueba de blancura de los tres modelos seleccionados a) Modelo con los datos de la primera parte del experimento, b) Modelo con los datos de la segunda parte del experimento, c) Modelo con los datos de la tercera parte del experimento

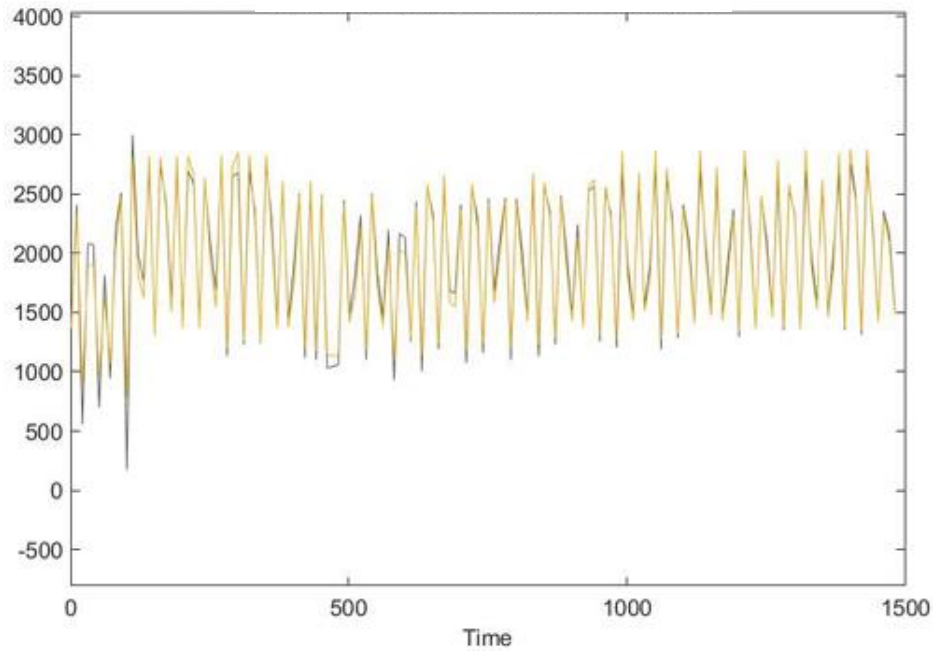


Figura 56. Apreciación visual del porcentaje de coincidencia de los modelos empíricos con los datos experimentales del modelo seleccionado

4.4 Sintonización del lazo de control de TRH

Aplicamos los criterios de CHR para la sintonización del proceso utilizando Simulink, primero en lazo abierto para observar el comportamiento del sistema (Figura 57), observando que hay un comportamiento de descenso en la señal de respuesta hasta alcanzar el valor de 66 en el estado estacionario, lo cual es de esperarse debido a que la turbidez va disminuyendo conforme avanza el tiempo.

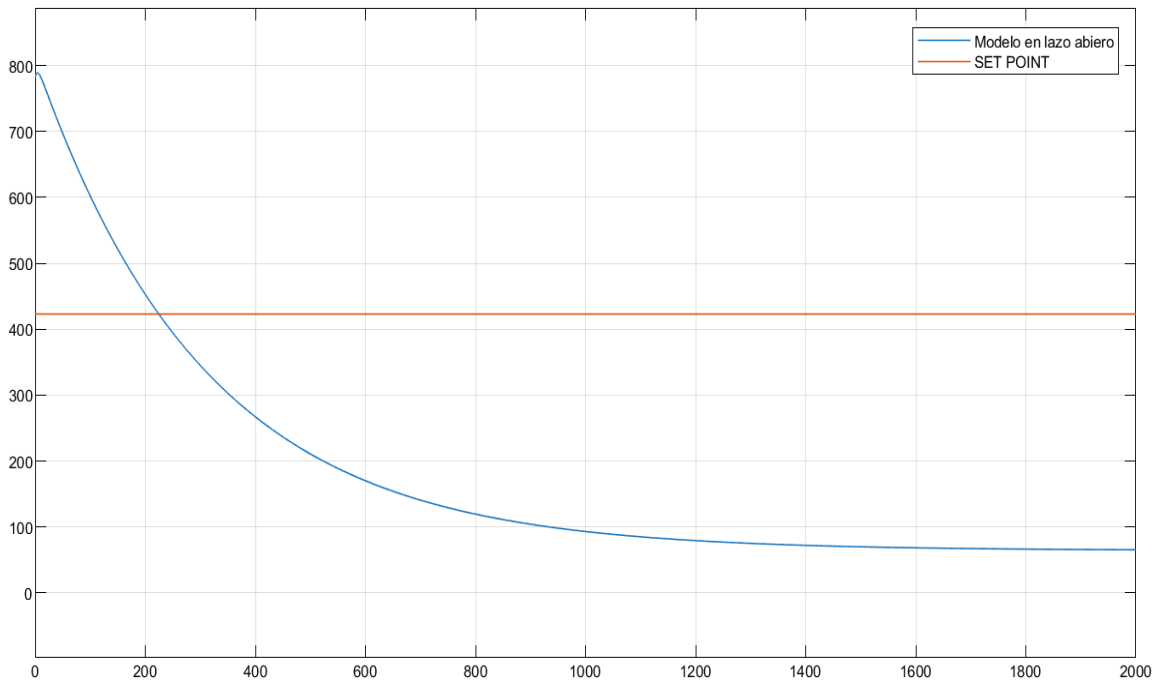


Figura 57. Comportamiento del sistema en lazo abierto.

Podría llegar a pensarse que este sistema podría quedarse en lazo abierto debido a que después de un tiempo la vinaza se clarifica y alcanza un valor menor de turbidez que el requerido, sin embargo, es importante observar la forma en que reacciona a las perturbaciones en este estado (Figura 58). Se observa que el sistema no es capaz de mantenerse estable frente a la presencia de ruido blanco, por lo cual es necesario utilizar un controlador.

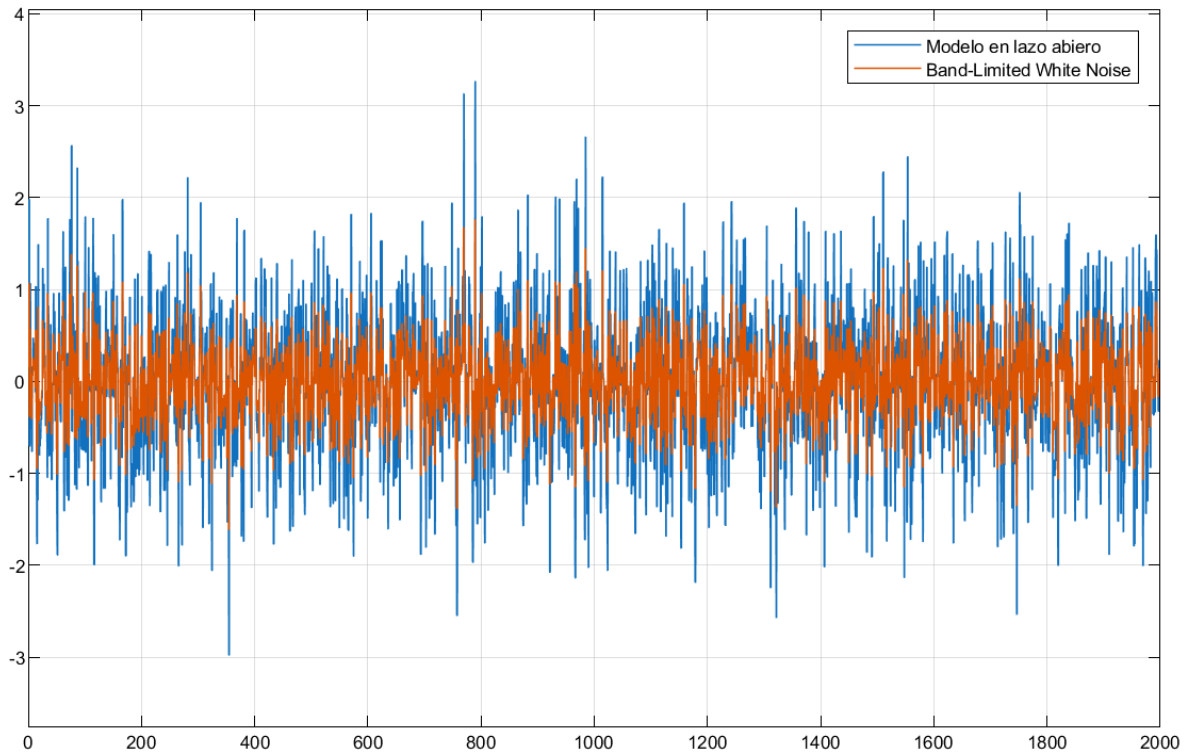


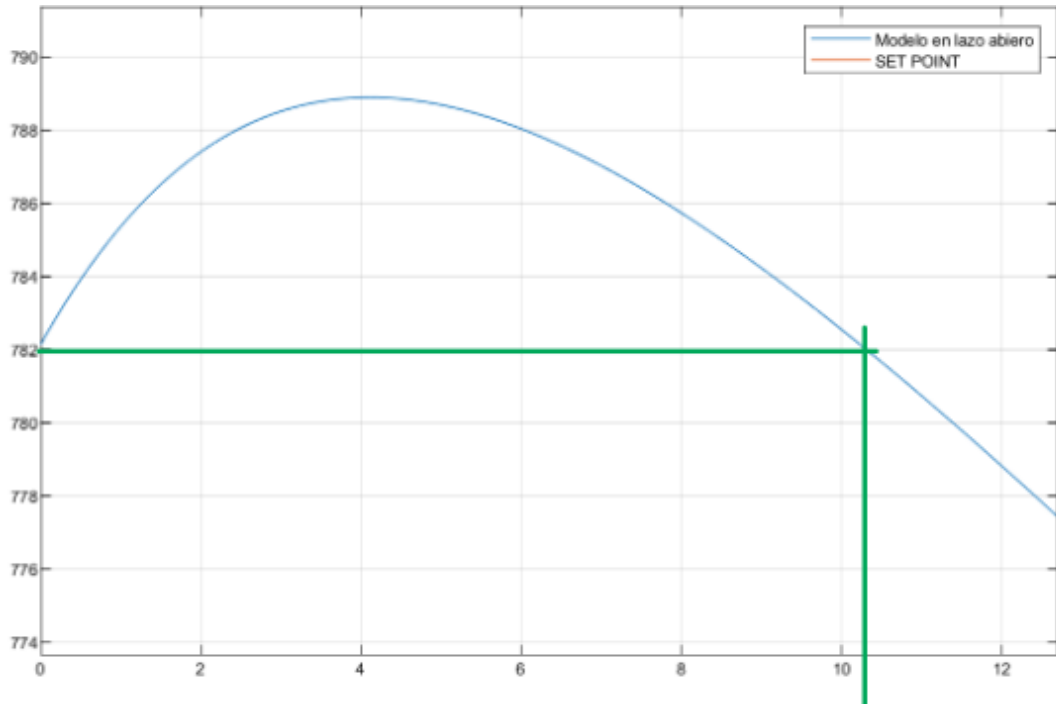
Figura 58. Comportamiento del modelo seleccionado al ruido blanco

4.4.1 Sintonización del Controlador por el método CHR

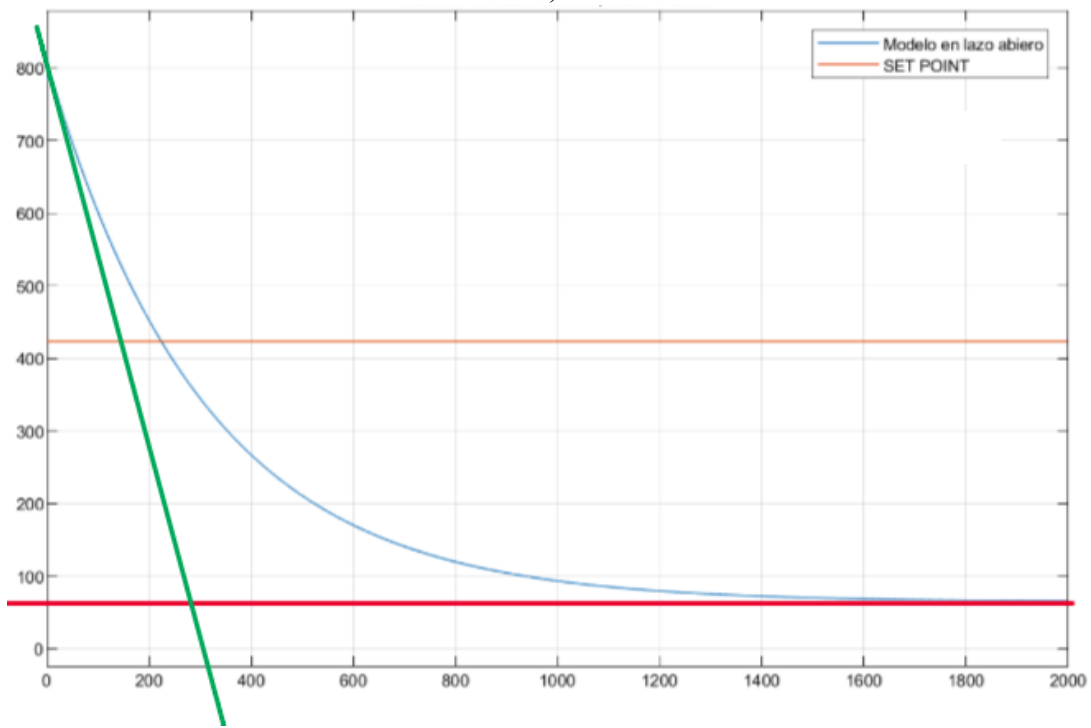
Se obtuvieron los parámetros necesarios para realizar la sintonización CHR (Tabla 15) tomando en cuenta la gráfica de Simulink (Figura 59).

Tabla 15. Valores de los parámetros necesarios para realizar la sintonización.

Parámetro	Valor
K	$\frac{790 - 66}{423 - 0} = 1.711$
θ	10
τ	230



a)



b)

Figura 59. Acercamiento de la gráfica de Simulink del sistema para obtener los valor de a) θ y b) τ

Con los parámetros del sistema se pueden realizar los cálculos necesarios para obtener las constantes de los controladores P, PI y PID (Tabla 16). Y aplicarlos al sistema por medio de Simulink para observar su comportamiento.

Tabla 16. Valores de las constantes para los controladores según el método CHR

Tipo de controlador	Ganancia proporcional K_c	Tiempo integral τ_i	Tiempo derivativo τ_D
P	$\frac{0.3 * 230}{1.711 * 10} = 4.0328$	—	—
PI	$\frac{0.6 * 230}{1.711 * 10} = 8.065$	$4 * 10 = 40$	—
PID	$\frac{0.95 * 230}{1.711 * 10} = 12.77$	$\frac{2.375 * 10}{= 23.75}$	$0.421 * 10 = 4.21$

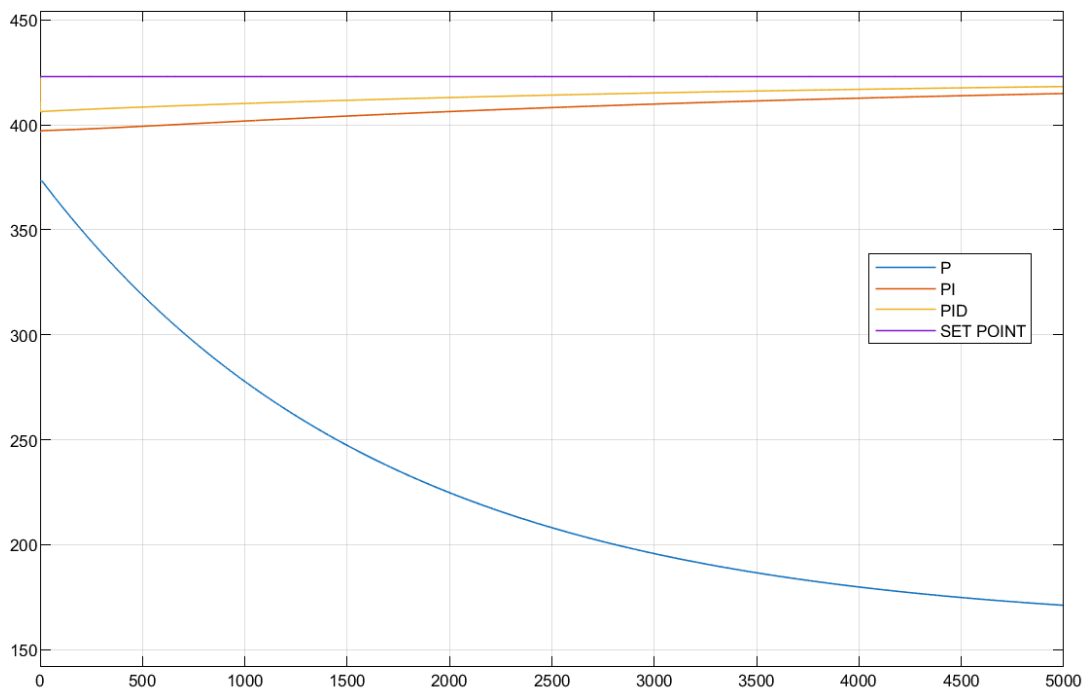


Figura 60. Desempeño de los controladores con la técnica de sintonización CHR

En la Figura 60 se observa que el control P produce un error de offset muy grande, sin embargo, eso se puede corregir al aumentar la ganancia proporcional (Figura 61); no obstante, esto provoca que el proceso no sea capaz de rechazar las perturbaciones del ruido blanco (Figura 62).

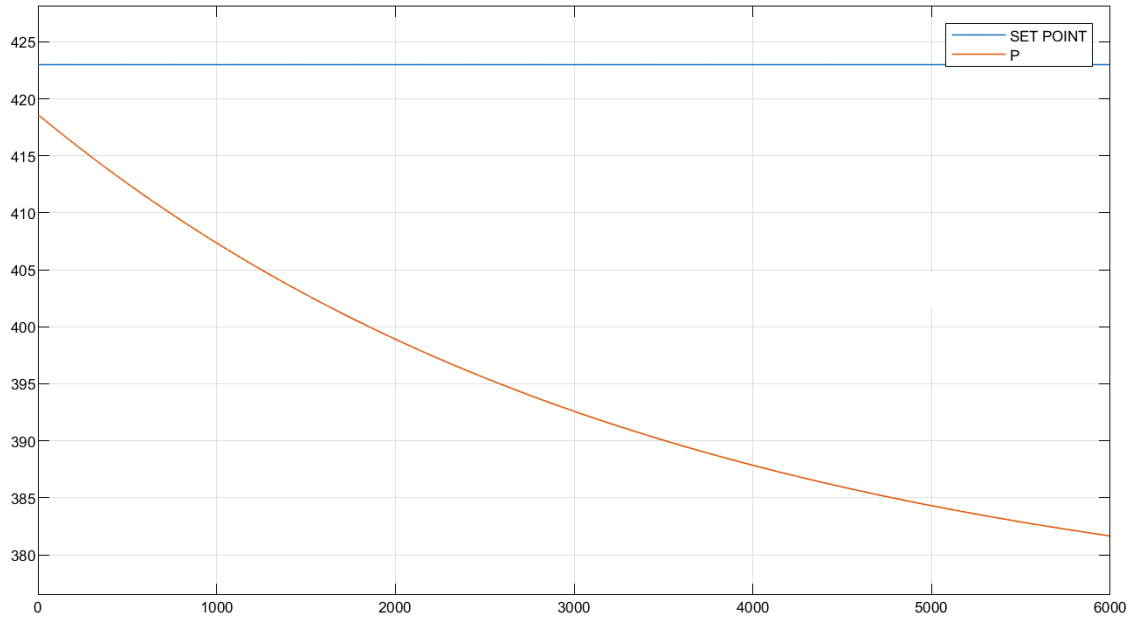


Figura 61. Respuesta del Control Proporcional con una ganancia de 50

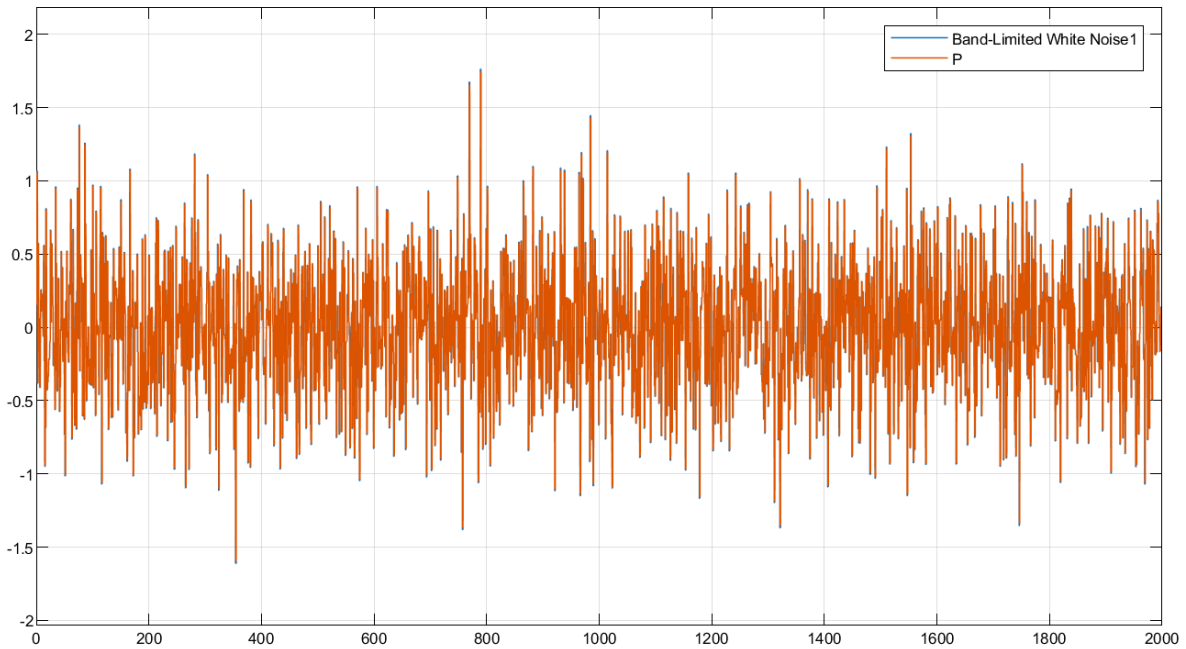


Figura 62. Desempeño del Controlador P frente a la entrada de ruido blanco

En cuanto a los controladores PI y PID, se mantienen durante todo el tiempo dentro del margen de 5% que permiten las heurísticas para considerar que el sistema ha alcanzado el valor del set-point, de manera que a primera vista se puede los controladores PI y PID tienen una respuesta instantánea al proceso (Figura 63). Debido a que el sensor de Turbidez tiene una cantidad importante de ruido, se opta por utilizar el controlador PI, puesto que los controladores PID son

muy sensibles al ruido de los sensores, además de que el controlador PI tiene un desempeño muy parecido al PID y se considera aceptable.

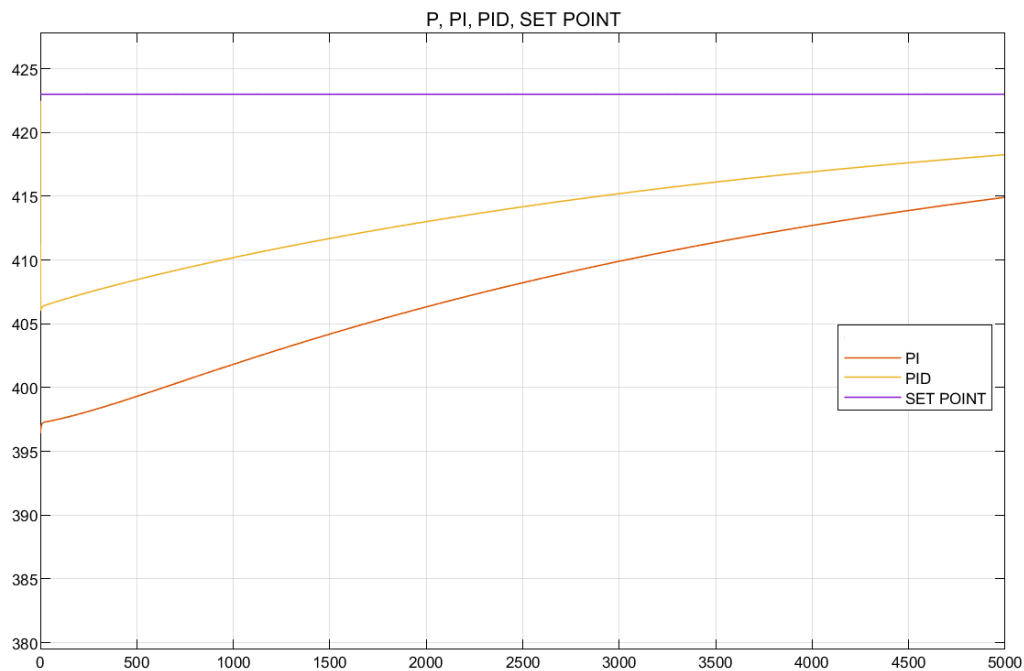


Figura 63. Desempeño de los controladores PI y PID con la sintonización CHR

4.4.2 Señales de entrada de prueba.

Al Lazo con el controlador PI se le aplicó primero la señal de entrada del ruido blanco (Figura 64), y de nuevo se observa que tiene poca capacidad de rechazar las perturbaciones, por lo tanto, para poder dar más robustez al lazo de control se disminuirá la ganancia proporcional como indican las heurísticas. Después de probar varios valores, se optó por reducir la ganancia proporcional hasta el valor de 0.1, con lo cual se obtuvo un mejor rechazo para las perturbaciones (Figura 65).

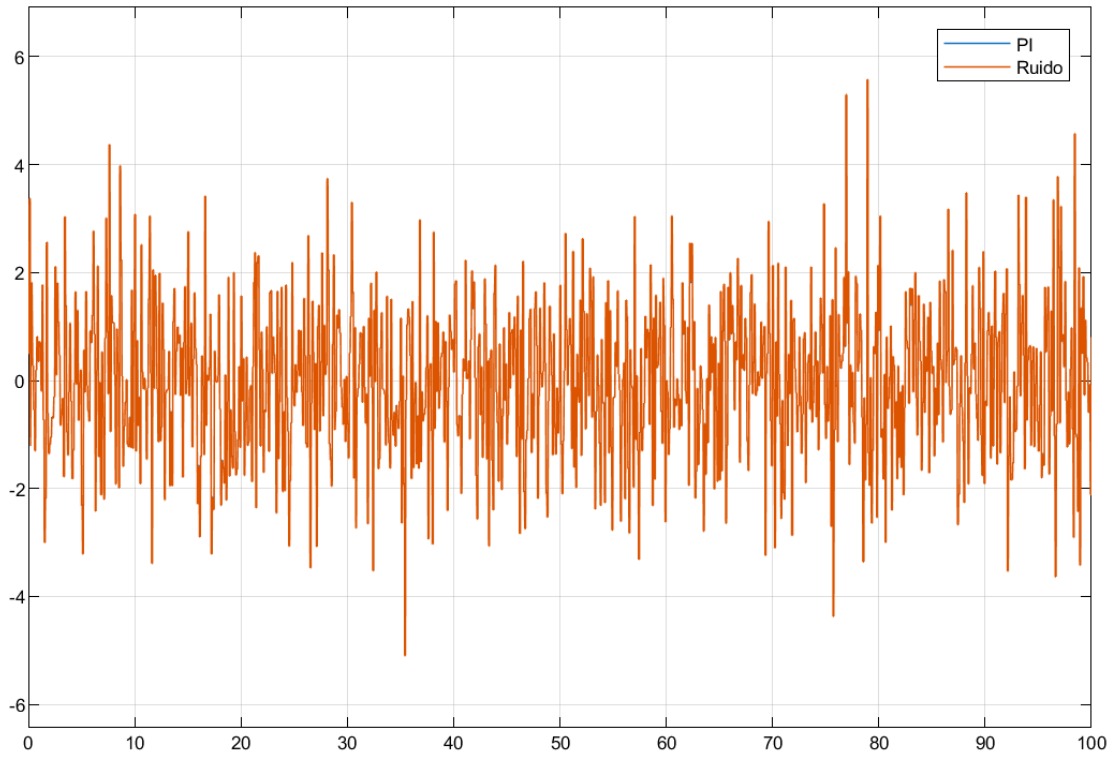


Figura 64. Comportamiento del controlador PI a la entrada de ruido blanco

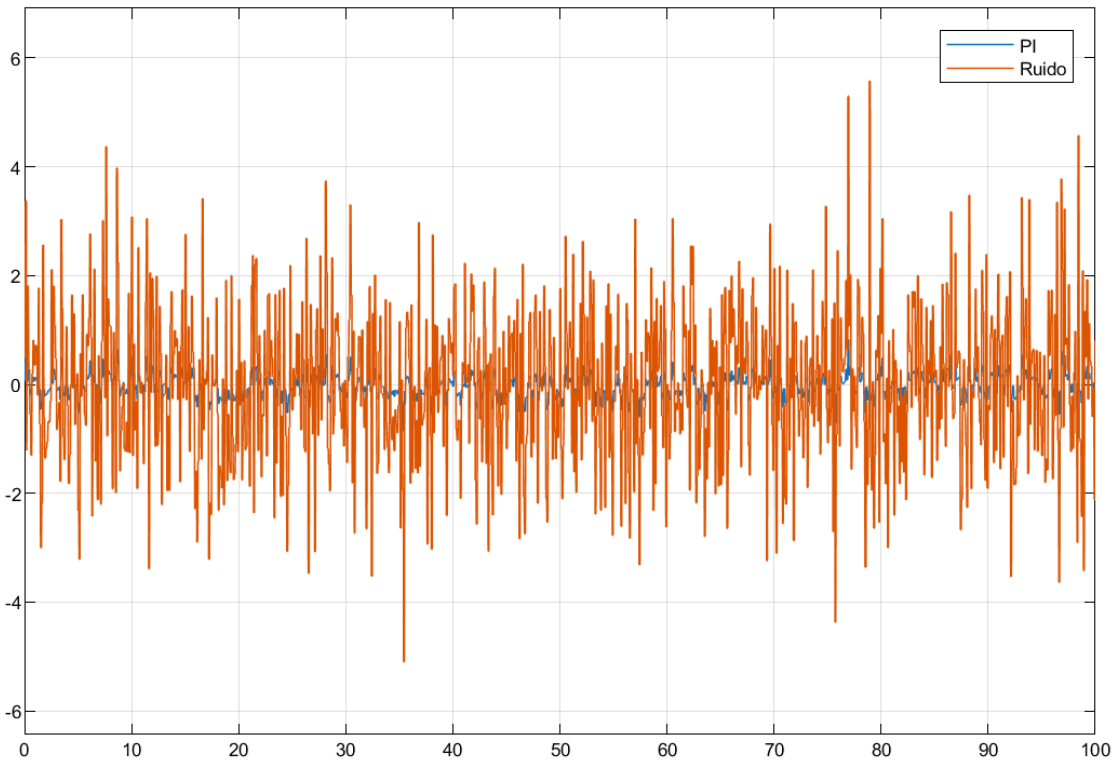


Figura 65. Respuesta del controlador PI a la entrada de ruido blanco con una ganancia proporcional de 0.1

En cuanto a la señal pulso unitario (Figura 66), se buscó realizar una diferencia tan grande como la esperada en el sistema real, en este caso, considerando que el set-point es de 453 NTU y los valores reportados por el turbidímetro al caracterizar la vinaza fue de 2707 NTU se escogió una magnitud de 6 unidades para el pulso y tomando en cuenta que el área de la función por definición es la unidad se tomó un tiempo de 1/6 de segundo para que esta perturbación suceda. Así, se observa que el sistema se tarda en estabilizarse 30 segundos aproximadamente después de la perturbación, aunque el sistema alcanza el valor de la unidad, sin embargo, este comportamiento termina después de provocado el pulso.

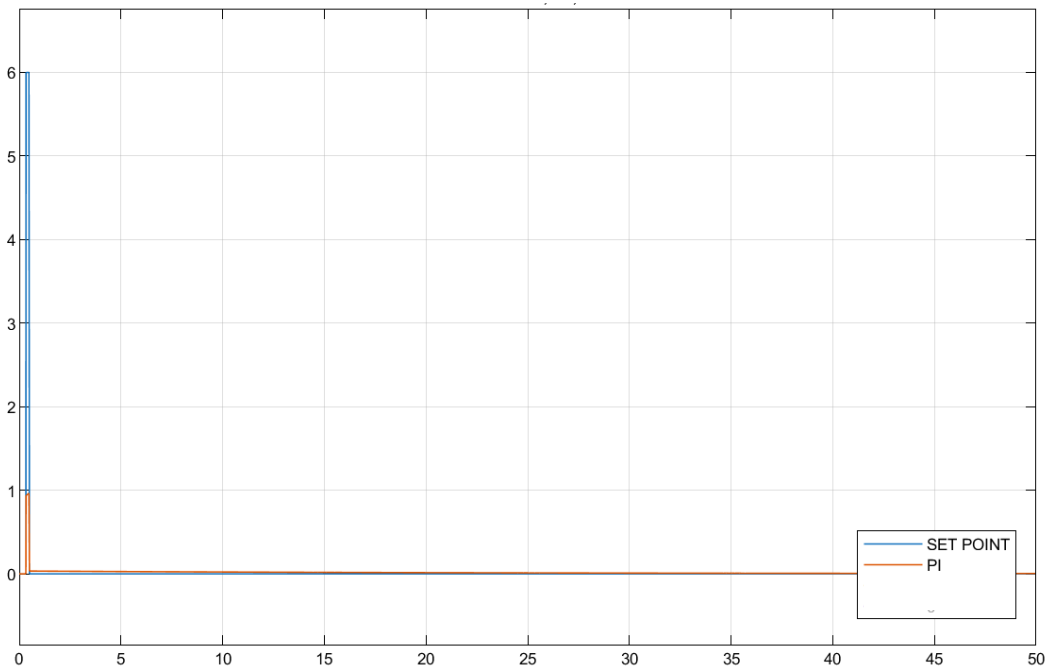


Figura 66. Señal de Respuesta del Controlador PI a la entrada impulso unitario

Finalmente se simularon incrementos y decrementos sostenidos en el sistema que se pueden esperar durante el proceso de clarificación de vinaza (Figura 67), provocados por diferentes perfiles de concentración dentro del tanque de almacenamiento así como el fenómeno de arrastre de partículas. De manera general se observa que el controlador no presenta retrasos en la respuesta a la señal de entrada, que no hay sobreenergaciones y no presenta oscilaciones durante el periodo de asentamiento, es decir, una vez más se observa que el controlador tiene robustez.

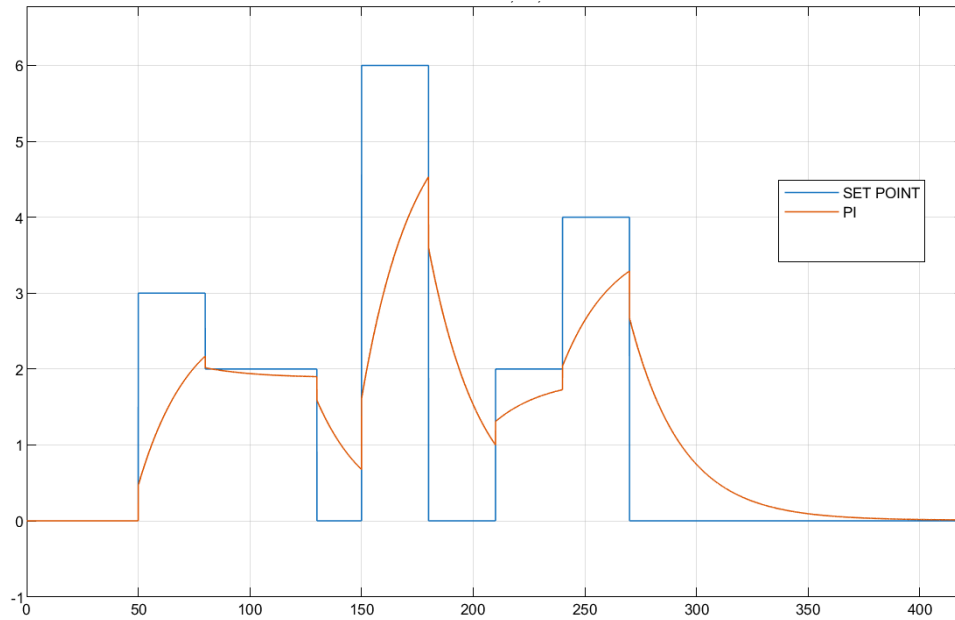


Figura 67. Prueba de cambios sostenidos al lazo de control

Se muestra en la Figura 68 el comportamiento del controlador PI y PID, ambos con la ganancia proporcional de 0.1, y se observa un comportamiento muy parecido al que se tenía con la configuración anterior de los controladores, con un tiempo de asentamiento semejante y sin sobre impulsos ni oscilaciones.

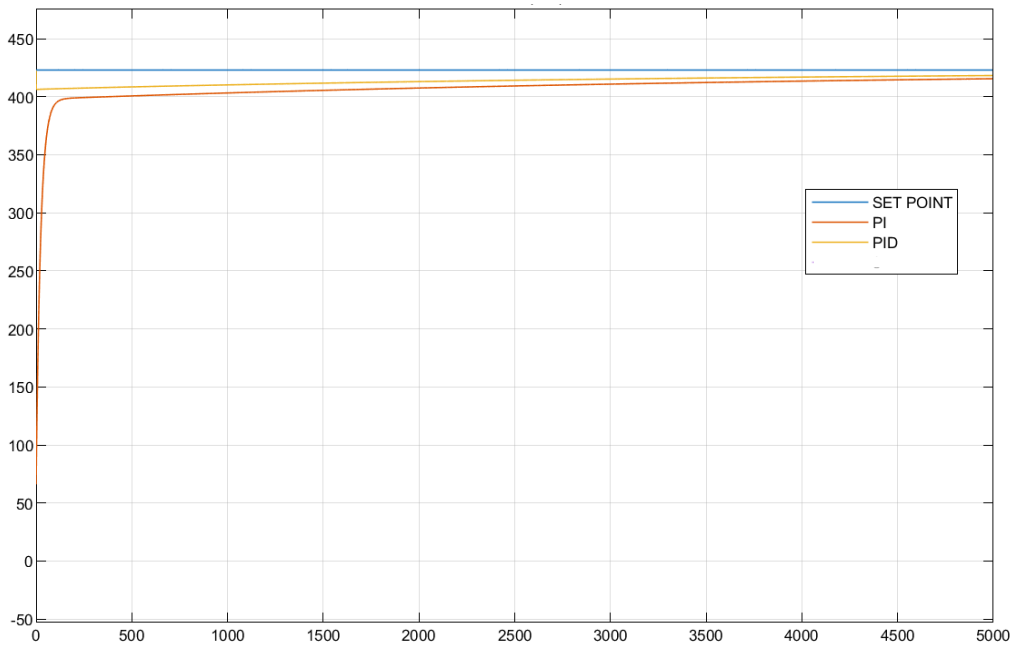


Figura 68. Comportamiento de los controladores PI y PID con una ganancia proporcional de 0.1

4.5 Interfaz de Control

Se realizó un aplicación de una sola ventana con tres secciones diferentes, la primera la principal donde se puede ver todo el sistema del RAFA, colocados de manera análoga a como están ubicadas las partes del sistema en el laboratorio de la Facultad (Figura 69). Luego se realizaron las dos secciones aparte de los dos lazos de control.

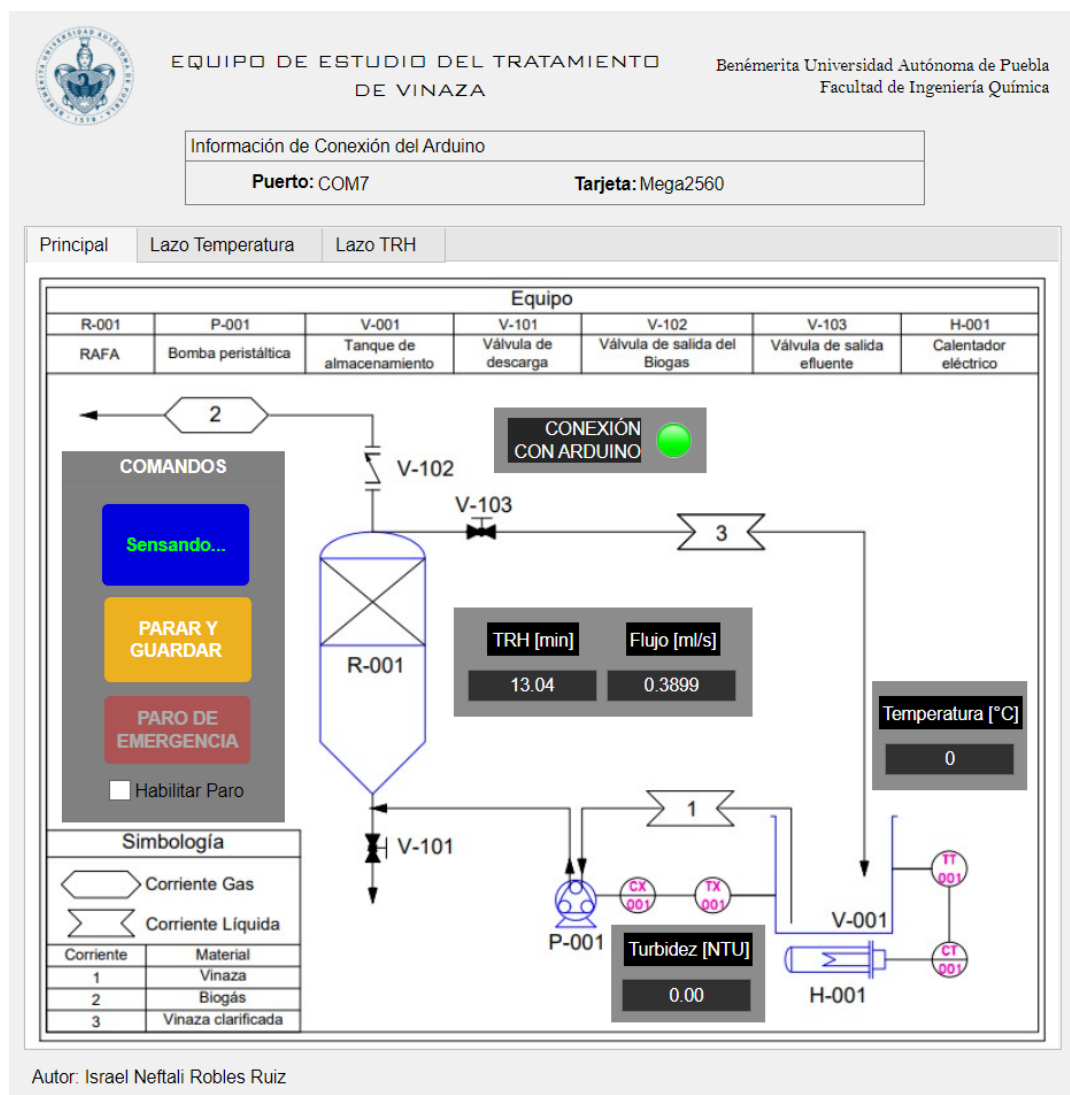


Figura 69. Pestaña principal de la interfaz de control donde se observa todo el sistema de digestión de vinaza

La interfaz fue creada para conectarse directamente con Arduino, y de hecho muestra la información de dicha conexión para que el usuario confirme el puerto y la tarjeta que está utilizando. Al apretar el botón de “CAPTURAR DATOS” empieza a graficarse lo valores de las variables y el botón cambia a color azul y el texto a “SENSANDO...” y un color verde, al tiempo que se enciende la lámpara del módulo “CONEXIÓN CON ARDUINO”.

4.5.1 Lazo de Temperatura

En el caso del lazo de control de temperatura (Figura 70), se colocó una gráfica que registra los cambios en la temperatura con respecto al tiempo. También se indica cuando la resistencia está encendida o apagada, de manera que el operador pueda conocer el estado del sistema sin tener que verlo directamente, sino sólo observando los datos de la pantalla y se agregó la opción de un encendido y apagado “manual” del calentador de pecera desde la interfaz.

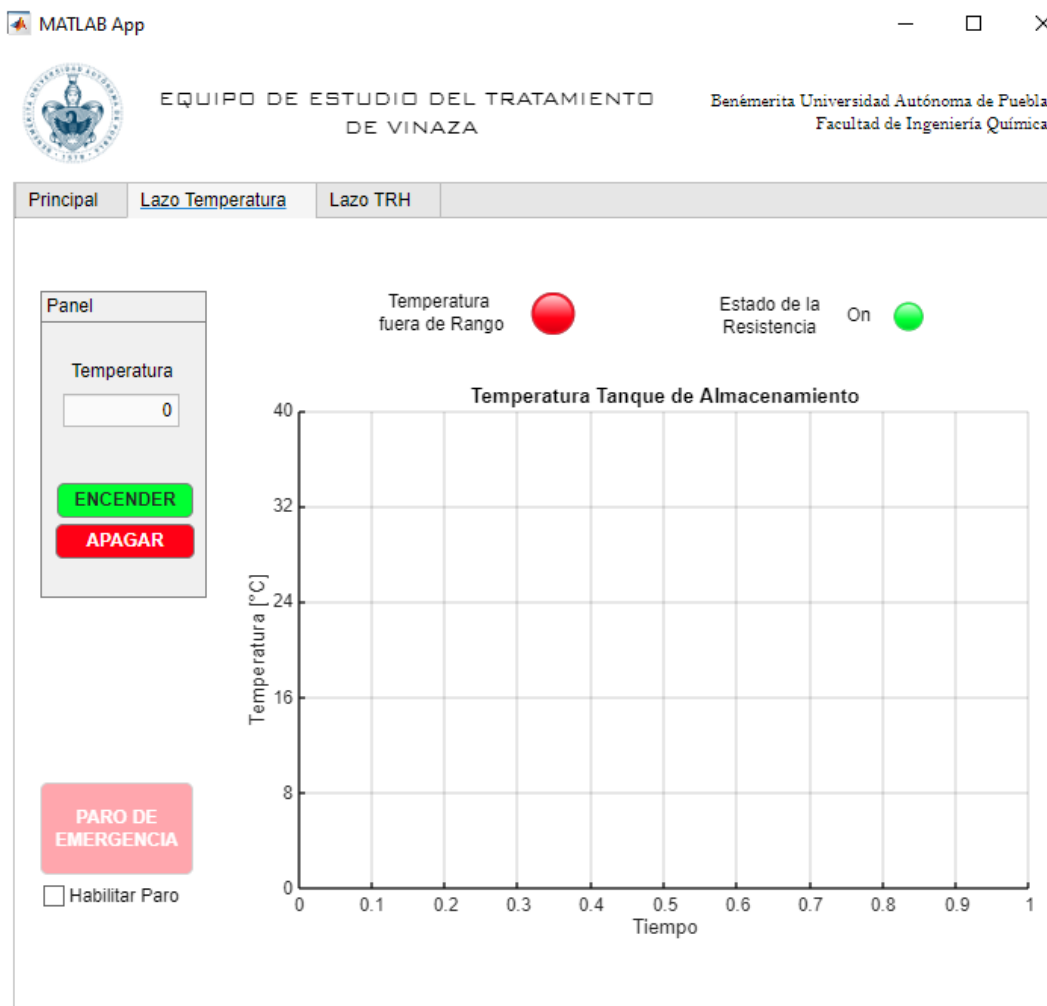


Figura 70. Pestaña del lazo de control de Temperatura

Siguiendo con la variable de temperatura, en caso de que la temperatura pase el valor de 35 °C se activa una alarma tanto en la pantalla principal (Figura 71), como en la sección del lazo de Temperatura, buscando que el operador pueda fácilmente observar esta alarma y realice las acciones necesarias, ya que es imperativo para este proceso que la temperatura no pase de este margen.

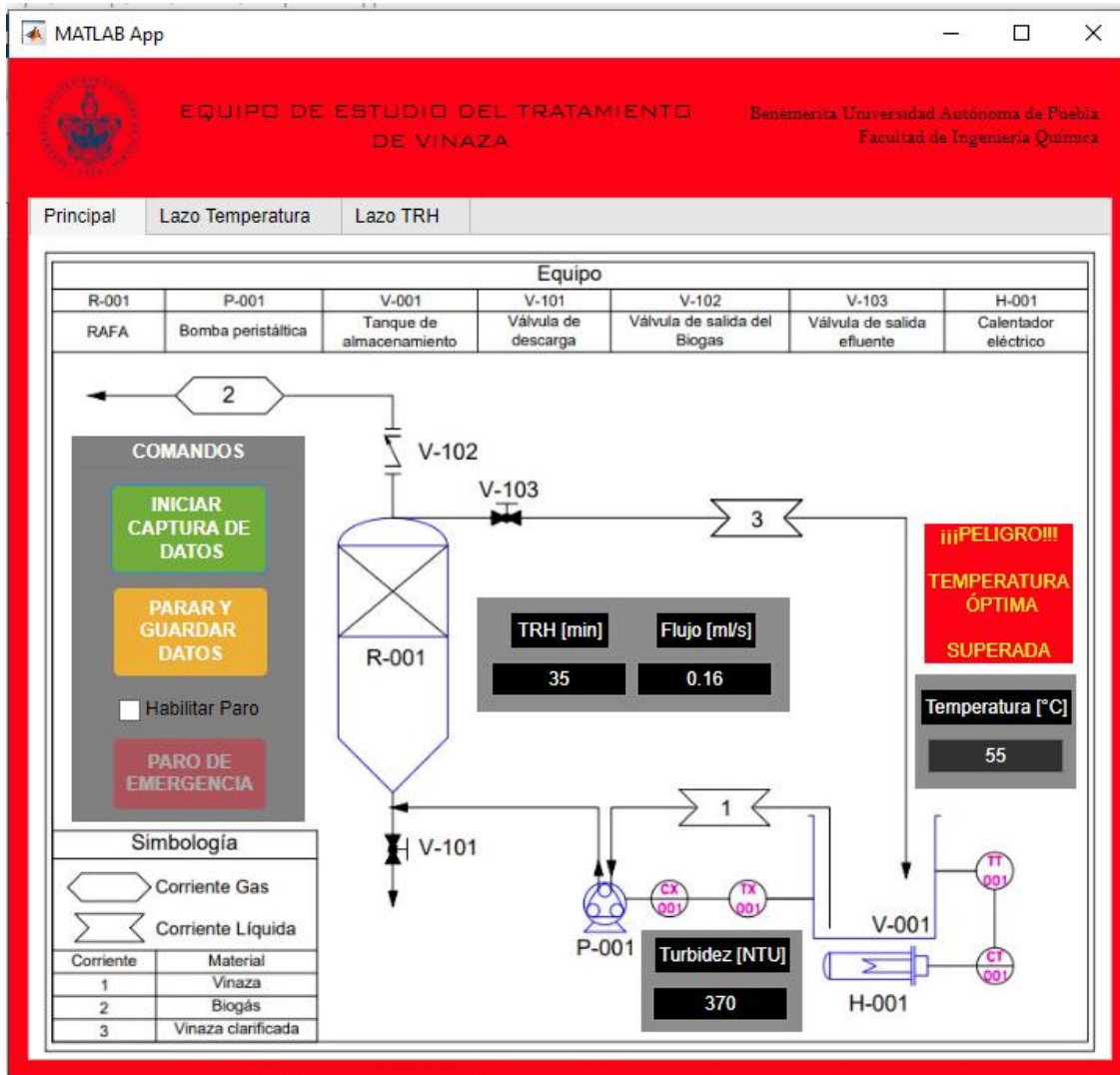


Figura 71. Alarma activada por temperatura alta en el sistema

4.5.2 Lazo de TRH

En cuanto al lazo de TRH, se puede observar en la pestaña correspondiente una gráfica con respecto al tiempo de la Turbidez y el valor del TRH (Figura 72), cada uno con su gráfica independiente. Igualmente en esta pestaña se encuentra la posibilidad para poder ingresar los parámetros de las acciones correctivas Proporcional e Integrativa, para realizar los ajustes de sintonización in situ. Así mismo, es posible controlar manualmente el valor del flujo de la bomba por medio de un botón rotatorio.

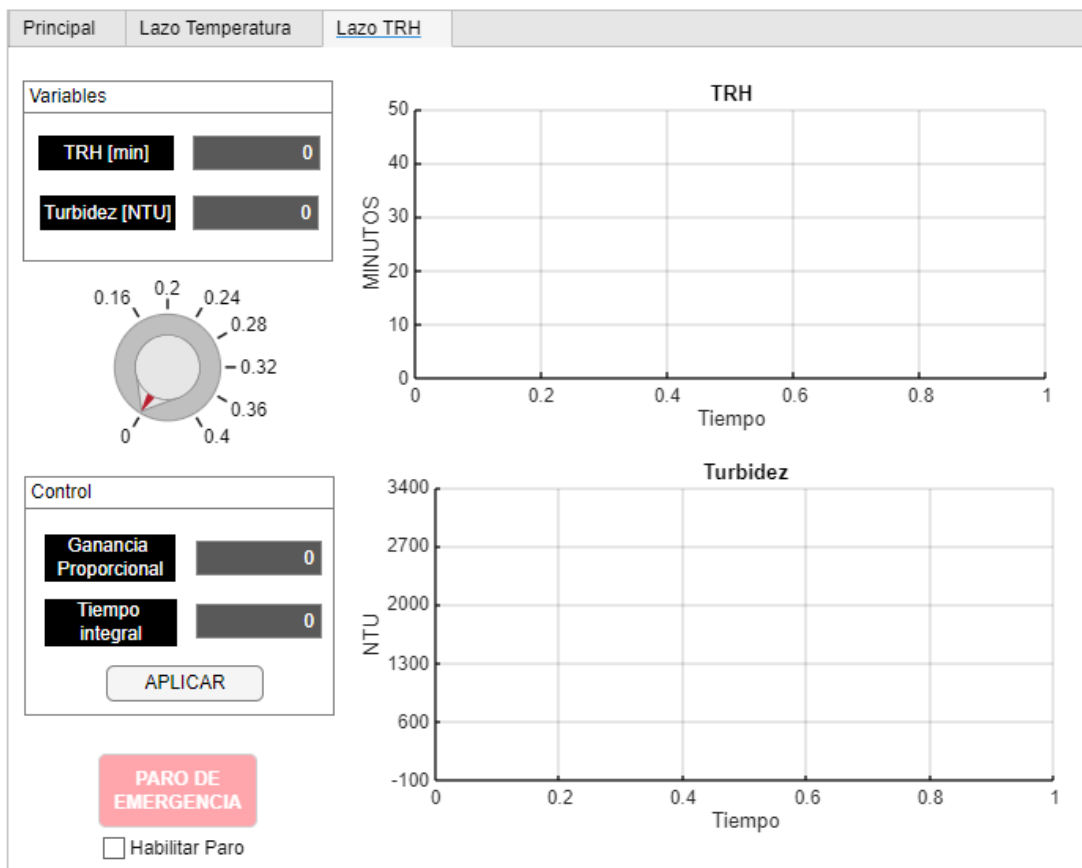


Figura 72. Pestaña del lazo de control del TRH

Para poder detener la transmisión de datos y guardarlos en hojas de Excel, se agregó el botón de “PARAR Y GUARDAR DATOS” en la pestaña principal, de manera que los datos obtenidos se puedan almacenar en caso de ser necesarios más tarde o para su posterior análisis.

Finalmente, el botón de paro de emergencia se encuentra en cada una de las tres pestañas, para que en caso de ser necesario se pueda acceder a él fácilmente sin que sea necesario moverse entre pestañas, sin embargo, no se encuentra habilitado, sino que para evitar errores de dedo es necesario seleccionar una “check box” para habilitarlo y poder oprimirlo. Esta acción de paro de emergencia consiste en apagar la bomba y la resistencia de forma inmediata, sin embargo, para guardar los datos es necesario usar el botón correspondiente a dicha acción.

4.5.3 Prueba de la Interfaz de Control

En cuanto al lazo de Control de temperatura Lamentablemente no se pudieron conectar el hardware a la interfaz debido a que este era difícil de conectar a Matlab directamente, sin embargo, es importante resaltar que este lazo de control no era la razón principal de este trabajo de investigación, y que se conoce el funcionamiento de este tipo de lazo por la sencillez de su comportamiento y programación.

Para el lazo de control de TRH, se utilizó el estado manual (Figura 73). La experimentación de la interfaz nos permitió observar que al encenderse la bomba peristáltica se produce inestabilidad en las medidas de Turbidez, generada por el funcionamiento del motor de la bomba, lo cual provoca subidas y bajadas de voltaje en la tarjeta de Arduino, provocando más ruido en las mediciones de Turbidez que de por sí ya presenta el turbidímetro y lo cual impacta negativamente en el rendimiento del lazo de control.

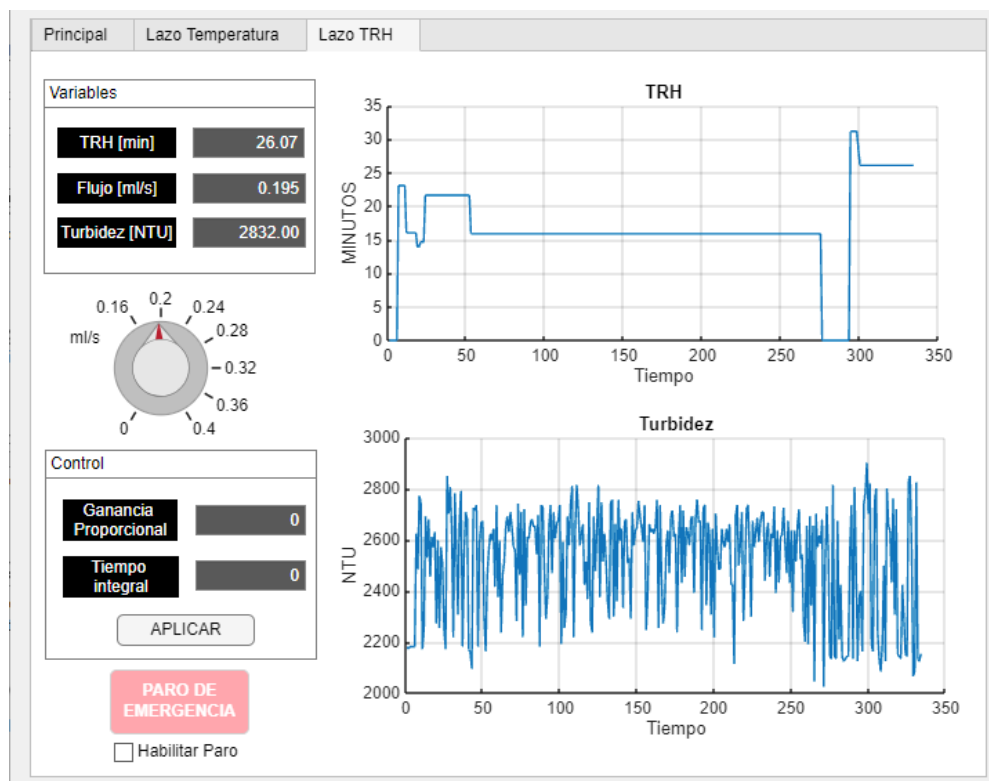


Figura 73. Funcionamiento manual de la interfaz del lazo de TRH

En cuanto al funcionamiento automático del lazo de control se encontró un buen funcionamiento (Figura 74), sin embargo, el turbidímetro estaba mal colocado y al hacer la prueba in situ de la interfaz no reportaba la turbidez del efluente y sólo daba el valor de 0 NTU. Fue necesario mover

el sensor lo cual generó cambios en las mediciones de turbidez para observar la respuesta del controlador, de aquí uno se percata que presenta rendimiento, aunque le hace falta robustez todavía, debido a que, los valores de TRH dependen mucho de los cambios en la turbidez.

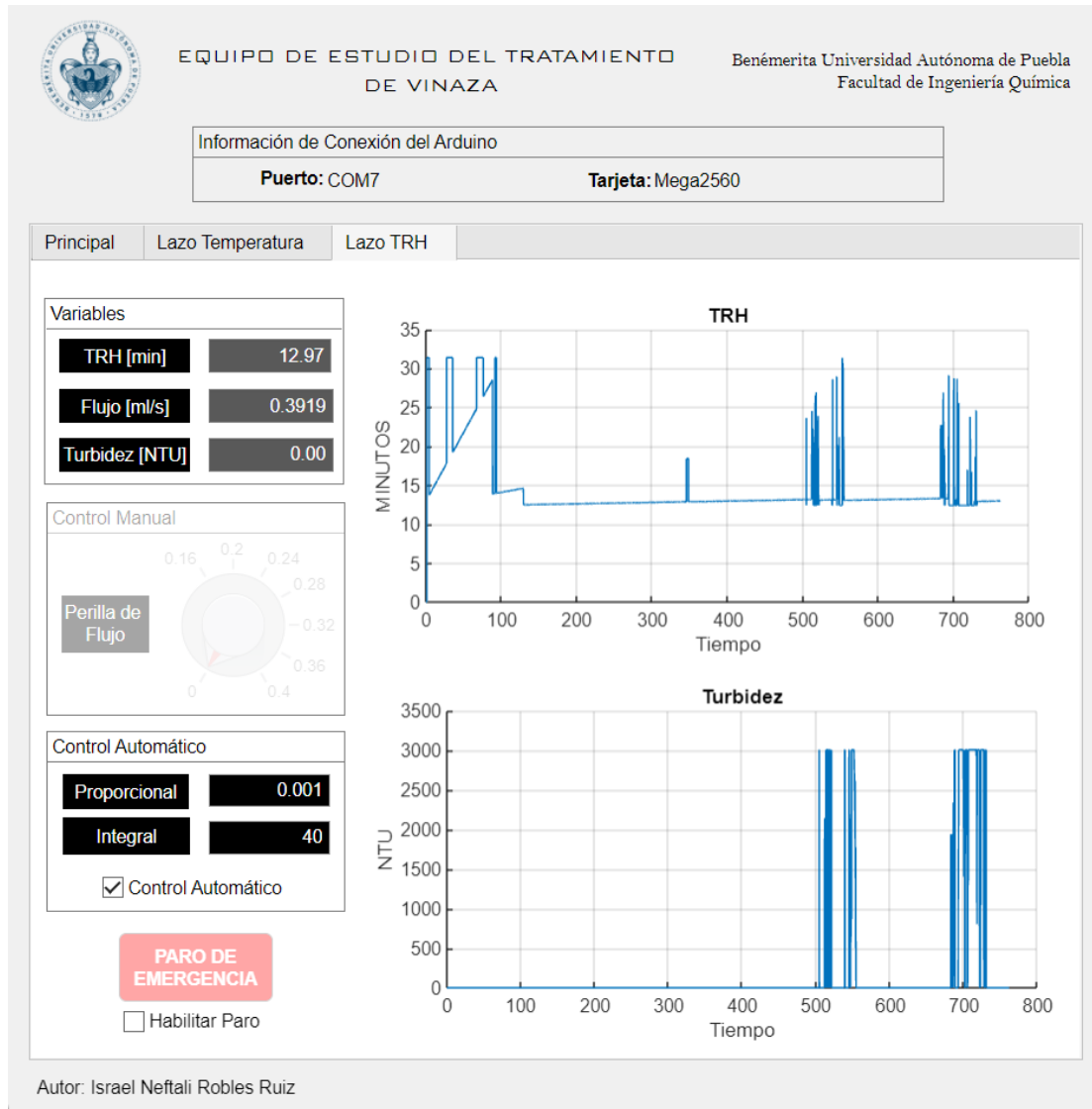


Figura 74. Funcionamiento de la interfaz de control en modo automático

En cuanto a los valores de los parámetros que se obtuvieron a través de la simulación en Simulink, se encontró que el valor de la ganancia proporcional provocaba respuestas muy rápidas en el TRH, por lo cual se observó su comportamiento al disminuir hasta 0.001 el valor de la ganancia proporcional, es decir, 100 veces menor a la estimada en el Simulink.

Estos cambios se deben a que el rango de TRH estaba bastante limitado por los flujos que podía proporcionar la bomba con la fuente de poder a la que estaba conectada, provocando saturación

en el actuador, así que para evitar esta saturación se disminuyó drásticamente la ganancia proporcional. Lamentablemente no se pudo realizar una segunda prueba cambiando las condiciones de localización del sensor y el suministro de voltaje de la bomba por falta de disposición de tiempo y recursos para realizar los cambios pertinentes.

5.CONCLUSIONES

1. Los datos de la simulación del lazo de control de TRH muestran que la turbidez es un parámetro que permite dar robustez a un sistema de clarificación de efluentes en detrimento del rendimiento, lo cual es útil debido a la presencia de perturbaciones en el sistema por los cambios bruscos en los valores de la turbidez por la presencia de partículas suspendidas en la vinaza y a la posibilidad de que suceda el fenómeno de arrastre de partículas. Esta afirmación no se pudo comprobar de manera experimental debido a las limitaciones de los elementos de control que se utilizaron para llevar a cabo este lazo de control.
2. No obstante, es posible elaborar un sistema útil de control completo (sensores, actuadores, algoritmo de control e interfaz) para un reactor a nivel escala laboratorio donde se llevan a cabo estudios de un proceso utilizando herramientas intuitivas y económicas de utilizar como es el microcontrolador de Arduino.
3. El software de Matlab tiene herramientas para realizar las tareas primordiales de la elaboración de un lazo de control, desde la identificación del sistema, pasando por las pruebas necesarias para validar modelos empíricos y la construcción de una interfaz de control.
4. La conductividad eléctrica no es un parámetro conveniente para monitorear el proceso de clarificación del fluido debido a que los cambios en esta no reflejan el cambio en la coloración del efluente ni el nivel de degradación de este.
5. Hacen falta más pruebas experimentales para poder evaluar completamente el funcionamiento del lazo de TRH desarrollado en este trabajo de investigación, sin embargo, con la información actual se puede afirmar que el área principal a mejorar es el hardware, es decir, los sensores y su interacción entre ellos, por ejemplo, colocar una segunda fuente de alimentación para la bomba peristáltica de manera que esta no provoque oscilaciones en el voltaje de los otros pines de la placa y así la información que proporcionen el resto de componentes electrónicos sea lo más precisa posible.

REFERENCIAS

AL Gonçalves JCM Pires , M. Simões A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment [Journal] // Algal Research. - [s.l.] : Elsevier, 2017. - Vol. 24. - págs. 403-415.

American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation Physical and Aggregate Properties [Sección de libro] // Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater / ed. Lips William C., Baxter Terry E. y Braun-Howland Ellen B.. - 2022. - 24.

Batstone D.J., Gernaey K.V. y Steyer J.P Instrumentation and control in anaerobic digestion [Journal] // 2nd IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Treatment Technologies / ed. Loosrecht Mark Van y Clement Jonathan. - 2004. - págs. 173-182.

Bratby John Turbidity: Measurement of Filtrate and Supernatant Quality? [Sección de libro] // Progress in Filtration and Separation / ed. Tarleton Steve. - 2015.

Caputo Maricel Estudio de la composición orgánica de la vinaza y metodologías para eliminar sus efectos contaminantes // Estudio de la composición orgánica de la vinaza y metodologías para eliminar sus efectos contaminantes. - 2020.

De Oliveira Lima V. [y otros] Anaerobic digestion of vinasse and water treatment plant sludge increases methane production and stability of UASB reactors [Journal] // Journal of Environmental Management. - Febrero de 2023. - Vol. 327.

Deng Lijuan [y otros] Biofouling and control approaches in membrane bioreactors [Journal] // Bioresource Technology. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - Vol. 2016. - págs. 656-665.

Doran Pauline M. Bioprocess Engineering Principles [Libro]. - [s.l.] : Elvieser Ltd., 2013.

Duc Nguyen, Venkataramana Gadhamshetty y Saoharit N Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review, Bioresource Technology [Journal] // Bioresource Technolingu. - [s.l.] : Elsevier, 2015. - Vol. 193. - págs. 513-522.

Field Jim UASB [En línea]. - 2003. - http://www.uasb.org/discover/anaerobic_biotechnologies.htm.

García L EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE ACOPLAR UN SISTEMA FOTOCATALÍTICO BIOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE VINAZAS MEDIANTE ESTUDIOS DE TOXICIDAD [Journal]. - 2012.

García Salazar Michelle Stefany [y otros] Evaluación de la producción de metano de vinazas mediante digestor anaerobio tipo batch [Journal] // Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad. - 27 de Diciembre de 2019. - págs. 79-88.

Ibarra Camacho Roberto y León Duharte Leandro CARACTERIZACIÓN QUÍMICO-FÍSICA DE VINAZAS DE DESTILERÍAS [Journal] // Ciencia en su PC. - 2018. - págs. 1-13.

IWA PUBLISHING, The International water association [En línea]. - 05 de 05 de 2024. - Up Flow - Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB).

Jamal Ali Kawan [y otros] Effect of Hydraulic Retention Time on the Performance of a Compact Moving Bed Biofilm Reactor for Effluent Polishing of Treated Sewage [Journal]. - [s.l.] : MDPI, 2022. - 0 : Vol. 14.

Kosseva Maria R y Kent C. A. Modeling, Monitoring, and Process Control for Intelligent Bioprocessing of Food Industry Wastes and Wastewater [Sección de libro] // Food Industry Wastes / ed. Webb Colin y Kosseva Maria R. - 2013.

Leicester Daniel D. [y otros] Optimising the Hydraulic Retention Time in a Pilot-Scale Microbial Electrolysis Cell to Achieve High Volumetric Treatment Rates Using Concentrated Domestic Wastewater [Journal] // Molecules. - 2020. - 12 : Vol. 25. - págs. 2945.

Lettinga G. [y otros] Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. [Journal]. - [s.l.] : Biothechnology And Bioengineering, 1980. - 22 (4).

Ljung L. System Identification: Theory For The User [Libro]. - [s.l.] : Prentice Hall, 1999. - Segunda.

Marafon A. C. [y otros] Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production [Journal] // Elvieser eBooks. - 2020. - págs. 179-194.

Méndez-Acosta HG [y otros] Anaerobic treatment of Tequila vinasses in a CSTR-type digester [Journal] // Biodegradation. - 2009.

Mendiola-Rodriguez Tannia A. y Ricardez-Sandoval Luis A. Robust control for anaerobic digestion systems of Tequila vinasses under uncertainty: A Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm [Journal] // Digital Chemical Engineering. - 2022. - 3.

Mostafa Parsaee, Mostafa Kiani y Karimi Keikshoro A review of biogas production from sugarcane vinasse [Journal] // Biomass and Bioenergy. - 2019. - Vol. 122. - págs. 117-125.

Mullai P. [y otros] Methane production and recovery from wastewater [Journal] // Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. - 2020. - págs. 17-36.

Newell R. N y Lee O. L. Applied Process Control [Libro]. - Brookvale : Prentice-Hall of australia, 1989.

Ogata K. Ingeniería de Control Moderna [Libro]. - [s.l.] : PRENTICE HALL, 2010. - Quinta.

Ollero Pedro y Fernandez Camacho Control por Realimentación: Controladores PID [Sección de libro] // Control e Instrumentación de Procesos Químicos. - Sevilla : SINTESIS, 2006.

Pind Peter F. [y otros] Monitoring and Control of Anaerobic Reactors/Biomethanation II [Sección de libro] // Biomethanation II. Advances in Biochemical Engineering / aut. libro Birgitte K. Ahring B. K. Ahring, I. Angelidaki, J. Dolfing, L. EUegaard, H. N. Gavala, F. Haagensen, A. S. Mogensen, G. Lyberatos, P. F. Pind, J. E. Schmidt, I. V. Skiadas, K. Stamatelatu. - Berlin, Heidelberg : Springer, 2003. - Vol. 82.

Robles-González V. [y otros] Treatment of mezcal vinasses: a review [Journal] // Journal of Biothechnology. - 2012. - págs. 524-546.

SAGARPA VINAZAS: ALTERNATIVAS DE USO [Informe]. - Ciudad de México : [s.n.], 2016.

Scaife R. Control system interface design [Sección de libro] // Human Factors in the Chemical and Process Industries / ed. Edmonds Janette. - 2017.

Seborg Dale E. [y otros] Dynamic behavior of firts-order and secon-orden processes [Libro]. - [s.l.] : Wiley, 2011. - Tercera : págs. 73-91.

Seborg Dale E. [y otros] Feedback Controlllers [Sección de libro] // Process Dynamics and Control / aut. libro Seaborg Dale E. [y otros]. - 2011.

Sillero L., Solera R. y Pérez M. Thermophilic-mesophilic temperature phase anaerobic co-digestion of sewage sludge, wine vinasse and poultry manure: Effect of hydraulic retention time on mesophilic-methanogenic stage [Journal] // Chemical Engineering Journal. - 2023. - 451.

Stanbury Peter F., Whitaker Allan y Hal Stephen J. Principles of Fermentation Technology [Libro]. - [s.l.] : Elsevier, 2016.

Statista Statista [En línea]. - 2024. - <https://es.statista.com/estadisticas/1092130/produccion-tequila-mexico/>.

Vanous Richar D., Larson P. E. y Hach C. C. THE THEORY AND MEASUREMENT OF TURBIDITY AND RESIDUE [Sección de libro] // Inorganic Species / ed. Minear Roger A. y Keith Lawrence H.. - 1982.

Weather Spark Weather Spark [En línea]. - 2023. - Mayo de 2024. - <https://es.weatherspark.com/y/2214/Clima-promedio-en-Puebla-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>.

Wei Tuo [y otros] A combined process model for wastewater treatment based on hydraulic retention time and toxicity inhibition [Journal]. - 2023. - Vol. 329. - pág. 138660.