



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Configuraciones de producción de bioetanol de
segunda generación con pretratamiento de la
biomasa.**

presentada por

Ing. Ana Seli Santana Marquina

como requisito para la obtención del grado de
**Maestra en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Victor Manuel Alvarado Martínez

Codirectora de tesis

Dra. Ma Guadalupe López López

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2025.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; **18/AGOSTO/2025**

Oficio No. DIE/109/2025

Asunto: Aceptación de documentos.

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. Ana Seli Santana Marquina**, con número de control **M22CE066** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**CONFIGURACIONES DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN CON PRETRATAMIENTO DE LA BIOMASA**", y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Victor Manuel Alvarado Martínez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 8031070

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 7980045

REVISOR 1

Dr. Manuel Adam Medina
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5992003

REVISOR 2

Dr. Enrique Quintero Marmol Márquez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 10259407

C.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas, Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224,
e-mail: die@cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 22/agosto/2025
Oficio No. SAC/204/2025
Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ANA SELI SANTANA MARQUINA
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"CONFIGURACIONES DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN CON PRETRATAMIENTO DE LA BIOMASA"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"*

**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Dedicatoria

A mis padres

A Nicandra Marquina Regalado y Rogelio Santana Salgado por la confianza y el apoyo incondicional que me mostraron, por estar siempre presentes en cuerpo y alma. Por mostrarme, en no darme por vencida, en dar siempre lo mejor de mí y en trabajar arduamente a pesar de las adversidades. Por los consejos y sus regaños, así como por ser mi ejemplo a seguir.

A mi esposo

Luis Enrique Hernandez Melendez por siempre estar a mi lado, apoyarme incondicionalmente y ayudarme. Así como su amor y paciencia en todo momento. Por mostrarme que siempre podré contar con él, por ser mi amigo y compañero de vida.

A mis hermanos

Ismael Santana Marquina, Mariel Santana Marquina, Claudia Lizbeth Santana Marquina y Jose Misael Santana Marquina por sus consejos, su tiempo y su cariño. Por estar presentes en la distancia.

A mi familia

A mis abuelitos, primos y sobrinos por siempre ayudarme y apoyarme incondicionalmente.

Agradecimientos

A mi esposo

Por el cariño, el amor y ayuda incondicional todo el tiempo.

A mis padres

Por la confianza y apoyo incondicional.

A el Dr. Victor Manuel Alvarado Martínez y la Dra. Ma Guadalupe López Por la paciencia y ayuda en la realización de este trabajo.

A mis revisores Por los consejos y los valiosos comentarios durante el proceso.

Al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico por brindarme las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional, así como, por cada una de las amables atenciones que recibí durante mi estancia.

Al CONACYT por el apoyo económico que me brindaron para la realización del trabajo.

Resumen

Este trabajo de investigación muestra la comparativa de distintos enfoques en la producción de bioetanol de segunda generación (2G) utilizando bagazo de caña. Se evaluó el efecto del tamaño de partícula, temperatura de pretratamiento y tiempo de reacción en una configuración de Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF). Utilizando un reactor tipo batch instrumentado, se adaptó y se adecuó la planta donde se llevaron a cabo las experimentaciones. Se diseñó un lazo de control que mantuviera la temperatura constante dentro del reactor batch, dado que las variaciones de temperatura ambiente afectarían en la producción de bioetanol 2G. Por lo que el trabajo incluye un control de temperatura utilizando un controlador PID, mediante un sistema identificado. Se realizó pruebas experimentales leyendo la temperatura en tiempo real, siguiendo un diseño de experimentos donde se muestran las variables en cada prueba.

Los resultados nos muestran una comparativa de la producción de bioetanol 2G, observando un porcentaje de bioetanol diluido hasta la etapa de fermentación, para cada pretratamiento. Con un análisis comparativo de costos asociados.

Abstract

This research presents a comparative analysis of different approaches for second-generation (2G) bioethanol production using sugarcane bagasse. The study experimentally evaluated the effects of particle size, pretreatment temperature, and reaction time in a Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) configuration. Experiments were conducted in an instrumented batch reactor system specifically adapted for this investigation.

A control loop was implemented to maintain constant temperature within the batch reactor, as ambient temperature fluctuations were found to significantly affect 2G bioethanol production. The system incorporated a PID temperature controller based on an identified process model. Real-time temperature monitoring was performed throughout the experimental trials following a structured design of experiments methodology.

The results provide a comparative assessment of 2G bioethanol production yields, measuring the percentage of diluted bioethanol obtained at the fermentation stage for each pretreatment method. The study includes an associated cost analysis of the different pretreatment approaches.

Índice general

Índice de figuras	X
Índice de tablas	XII
Nomenclatura	XIII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Metas	5
1.4. Justificación	5
1.5. Alcances	6
1.6. Implementación de la planta piloto	6
1.7. Limitaciones	7
1.8. Organización del documento	7
2. Marco teórico y Estado del arte	9
2.1. Marco conceptual	9
2.1.1. Bioetanol de segunda generación	9
2.1.2. Lignocelulosa	10
2.1.3. Bagazo de caña	10
2.1.4. Pretratamientos	11
2.1.5. Sacarificación enzimática de la biomasa pretratada y la fermentación	13
2.1.6. Sacarificación y fermentación simultánea	13
2.2. Estado del arte	14

2.2.1.	Tecnología de bioetanol de segunda generación.	14
2.2.2.	Pretratamientos.	15
2.2.3.	Configuraciones en la producción de bioetanol	18
2.2.4.	Producción de bioetanol de segunda generación en reactores tipo Batch	19
3.	Instrumentación del sistema y control	20
3.1.	Planta piloto de producción de biodiésel	20
3.1.1.	Planta: Adaptación del biorreactor	21
3.1.2.	Motor	23
3.1.3.	Mezclador	24
3.2.	Adecuación de la planta para control de temperatura	26
3.2.1.	Lectura y registro de las temperaturas.	27
3.2.2.	Convertidor: diseño y construcción	28
3.2.3.	Planta final	33
3.3.	Sistema en lazo abierto	33
3.3.1.	Ciclo de trabajo vs Señal PWM	34
3.3.2.	Análisis del comportamiento del sistema ante excitaciones	36
3.3.3.	Diseño de una excitación con fines de identificación	40
3.3.4.	Respuesta experimental de la planta aplicando la entrada para iden- tificación	41
3.3.5.	Identificación de la planta	43
3.4.	Lazo de control	44
3.5.	Descripción del Sistema de control de temperatura dentro del reactor . . .	47
3.6.	Descripción del Sistema de control de temperatura dentro del reactor . . .	49
3.6.1.	Pretratamiento	49
3.6.2.	Hidrólisis y fermentación	50
4.	Diseño de experimentos	51
5.	Pruebas experimentales	58
5.1.	Pre-Pretratamiento	58
5.2.	Pretratamiento Biológico	60

6. Resultados experimentales del proceso de producción de bioetanol 2G con pretratamiento Alcalino y Biológico	72
6.0.1. Resultados experimentales del proceso de producción de bioetanol en la etapa de hidrólisis y fermentación utilizando diferentes tipos de pretratamiento	74
6.0.2. Costos en la producción de bioetanol	76
7. Comparativa de los resultados experimentales	81
8. Conclusiones y trabajos futuros	87
8.1. Conclusiones	87
8.2. Trabajos futuros	88
Bibliografía	92
Anexo A. Instalación del sistema operativo en la Raspberry	93
8.2.1. Actualización del sistema operativo	94
Anexo B. Programa para la lectura de la temperatura para los sensores DHT11 y termopar tipo k	94

Índice de figuras

2.1. Bagazo de caña	11
2.2. Efecto del pretratamiento de biomasa ligno- celulósica	11
2.3. Diagrama de hidrólisis y fermentación en etapas separadas (Choudhary et al., 2016).	13
2.4. Diagrama de hidrólisis y fermentación simultánea (Choudhary et al., 2016).	14
3.1. Planta piloto utilizada para la producción de biodiésel	20
3.2. Estructura sin acondicionar	21
3.3. Estructura soldada y acondicionada	22
3.4. Tres tubos soldados dentro del reactor.	22
3.5. Dimensiones del reactor en milímetros.	23
3.6. Motor empleado en el proceso de producción de biodiesel.	23
3.7. Moto-reductor	24
3.8. Mezclador utilizado para la producción de biodisel.	24
3.9. Medidas del mezclador vista lateral	25
3.10. Mezclador y reactor vista frontal	25
3.11. Mezclador y reactor vista frontal	26
3.12. Programación de los sensores	27
3.13. Diagrama del convertidor	28
3.14. Construcción del convertidor	32
3.15. Planta con los elementos necesarios para realizar los pretratamientos, así como la hidrólisis y fermentación.	33
3.16. Diagrama que muestra las entradas a la planta	34
3.17. Diagrama para generar una señal PWM en Simulink	35
3.18. Señal PWM	35
3.19. Prueba 1,Termopar K 1 y 2 con un ciclo de trabajo de 90 %.	36

3.20. Prueba 1, modificando el ciclo de trabajo al 90 %.	37
3.21. Prueba 2, modificando el ciclo de trabajo al 50 %.	37
3.22. Prueba 2, termopar K 1, modificando el ciclo de trabajo al 50 %.	38
3.23. Prueba 1, modificando el ciclo de trabajo al 10 %.	38
3.24. Prueba 1, modificando el ciclo de trabajo al 10 %.	39
3.25. Temperaturas con PWM al 90 %, 50 % y 10 %.	39
3.26. Señal PRBS.	40
3.27. Señal PRBS con amplitud y longitud aleatoria	41
3.28. Entrada de la señal al reactor.	41
3.29. Comportamiento de la temperatura dentro del reactor con señal de entrada PRBS	42
3.30. Comportamiento de la temperatura sin la temperatura ambiente dentro del laboratorio.	42
3.31. Comparación del sistema con la identificación.	43
3.32. Polos y ceros del sistema	44
3.33. Respuesta del sistema	44
3.34. Ventana de la herramienta PID Tuner	46
3.35. Sistema simulado con control de temperatura a 90 °C	47
3.36. Diagrama del sistema	47
3.37. Diagrama del proceso de pretratamiento de material lignocelulósico (bagazo de caña).	49
3.38. Diagrama del proceso de la etapa de hidrólisis y fermentación (bagazo de caña).	50
4.1. Diagrama de los factores del pretratamiento biológico.	54
4.2. Diagrama del pretratamiento alcalino con los factores.	56
5.1. Bagazo de caña tendido sobre una lona.	59
5.2. El bagazo es cernido con ayuda de la malla de 1 cm.	59
5.3. Momento donde el bagazo es clasificado.	60
5.4. Clasificación con colador para trozos grandes.	60
5.5. El bagazo cernido es colocado en la bolsa y se pesado en una bascula.	60
5.6. Medición de masa del bagazo de caña, clasificado por tamaño de partícula (1 mm a 10 cm), previo al proceso de bioetanol.	61
5.7. Pesaje del humus de lombriz con ayuda de una bascula.	61

5.8. Fotografía muestra el reactor tipo batch después de limpiarlo.	62
5.9. Carga del bagazo de caña en el reactor tipo batch.	62
5.10. Fotografía que muestra como se le agrega el humus de lombriz al reactor. .	62
5.11. Esta fotografía muestra el reactor después de sellarlo.	62
5.12. Programa del control de temperatura.	63
5.13. Bagazo de 1 cm.	64
5.14. El hidróxido es pesado en una bascula.	64
5.15. Reactor tipo batch previamente enjuagado con agua desmineralizada. . . .	64
5.16. Se agrega el bagazo de caña al reactor con agua desmineralizada.	65
5.17. Se agrega el hidróxido y se mezcla hasta incorporarse.	65
5.18. El reactor se sella con ayuda de algodón, papel aluminio y cinta de aislar o cinta térmica.	65
5.19. Programa para el control de temperatura en python.	66
5.20. Se observa el watímetro que se encuentra en la estructura y mide la energía que entra al convertidor.	67
5.21. Bagazo pretratado biológicamente en el biorreactor.	67
5.22. Cubeta con colador y manta para colar el bagazo pretratado.	67
5.23. Bagazo previamente pretratado.	67
5.24. En la fotografía muestra como se retira el exceso de agua exprimiendo. . .	68
5.25. El bagazo es secado en un horno.	68
5.26. En la fotografía muestra el bagazo después de filtrar el agua.	68
5.27. El bagazo se coloca en un plástico para retirar el agua y la humedad. . . .	68
5.28. Agua desmineralizada que ayudará a limpiar el reactor.	69
5.29. Levadura y ácido cítrico.	69
5.30. Reactor con bagazo previamente pretratado.	70
5.31. La levadura se agrega al reactor.	70
5.32. Se agrega la enzima al reactor con ayuda de la micropipeta.	70
5.33. Se mide el pH de la mezcla con ayuda del medidor hanna instruments. . .	70
5.34. El algodón es colocado entre la tapa para tratar de que el reactor sea lo mas hermético posible.	71
5.35. Puesta en marcha del control en la etapa de SSF en un reactor tipo batch.	71
5.36. Medición del pH de la mezcla después de la SSF.	71
7.1. Producción de bioetanol con pretratamiento biológico.	82
7.2. Producción de bioetanol con pretratamiento alcalino a 7870 s.	83

7.3. Consumo energético para los dos tipos de pretratamiento.	84
7.4. Consumo energético para SSF.	84
7.5. Costo de los insumos y consumo energético para SSF.	85
8.1. Programación de los sensores	93
8.2. Pantalla principal del sistema operativo de la raspberry.	93
8.3. Pestaña LXTerminal.	94

Índice de tablas

2.1. Tipos de pretratamiento (Aditiya et al., 2016)	12
4.1. Condiciones de operación fijas del reactor para el pretratamiento biológico del bagazo de caña.	52
4.2. Condiciones de operación del reactor para la producción de bioetanol 2G con pretratamiento biológico. Diseño de experimentos.	53
4.3. Condiciones de operación fijas del reactor para el pretratamiento alcalino del bagazo de caña.	55
4.4. Condiciones de operación del reactor para la producción de bioetanol 2G con pretratamiento alcalino. Diseño de experimentos.	55
4.5. Variables del proceso de SSF	56
6.1. Pruebas experimentales con pretratamiento biológico.	73
6.2. Pruebas experimentales con pretratamiento alcalino.	74
6.3. SSF con pretratamiento biológico.	75
6.4. SSF con pretratamiento alcalino.	75
6.5. Costos detallados de materiales por prueba para el pretratamiento biológico.	76
6.6. Energía consumida para pretratamiento biológico y su costo en (\$ USD).	77
6.7. Costos para la producción de bioetanol con pretratamiento alcalino.	77
6.8. Energía consumida para pretratamiento alcalino para bagazo de caña y su costo en \$ USD.	78
6.9. Costos de material para SSF.	79
6.10. El costo de la energía consumida para la etapa de SSF con bagazo pretratado mediante un proceso biológico.	79
6.11. El costo de la energía consumida para la etapa de SSF con bagazo pretratada mediante un proceso alcalino.	80

7.1. Comparativa del gasto energético.	81
--	----

Nomenclatura

SSF	Sacarificación y fermentación simultánea
UPF	Unidades papel filtro
PRBS	Señal binaria pseudoaleatoria
2G	Segunda generación

Capítulo 1

Introducción

De acuerdo con las estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en inglés), 2019 (Administration (2021)), del total de energía consumida en el mundo, 40.4 % provino del petróleo, 19.7 % corresponde al consumo de electricidad, 16.4 % provino de gas natural, 9.5 % de carbón y 3.6 % son otros tipos de energía, finalmente solo el 10.4 % de energía consumida provino de biocombustibles y residuos. Estas estadísticas ponen en evidencia el uso incesante de combustibles fósiles que ha provocado una disminución constante de estos recursos no renovables, que se estima podrían agotarse en unas cuantas décadas. Por lo tanto, a nivel mundial se están considerando nuevas fuentes energéticas que proporcionen una menor huella de carbono. La biomasa es un recurso renovable que comúnmente se quema o se desecha como basura. Algunas alternativas para aprovechar recursos naturales son producir combustibles sólidos como pellets de madera, gaseosos como el metano, o líquidos como el etanol, o el diésel. La búsqueda de nuevas fuentes de energía necesita del diseño de nuevos procesos para la transformación de biomasa en combustibles. Un ejemplo claro es la producción de bioetanol de segunda generación, obtenido a partir de desechos orgánicos Zuliani et al. (2021). El bioetanol puede ser producido a partir de distintas materias primas y con diferentes tecnologías. Una de estas, es la tecnología de bioetanol de primera generación (1G) que utiliza materia prima con alto contenido de azúcares. Tal es el caso de la fruta como la manzana o el jugo de caña, entre otros. Una alternativa es la tecnología de bioetanol de segunda generación (2G), que usa materia prima que no es competencia en el mercado de los alimentos, como los desechos orgánicos. Ejemplos de este tipo de materia prima son las hojas de los árboles, el bagazo de caña, etc. Este trabajo de tesis se centra en la idea de utilizar los residuos que se obtienen en la producción de azúcar. Uno de estos es el bagazo de caña, que comúnmente es quemado en la industria como energético; sin embargo, es posible diseñar un proceso que pueda darle

un segundo uso a este material de desecho, al generar bioetanol como biocombustible. Para producir bioetanol o alcohol etílico de segunda generación se requieren una serie de etapas: la adecuación de la biomasa, el pretratamiento, la hidrólisis y la fermentación (una configuración alternativa es llevar a cabo estas dos etapas de manera simultánea). La destilación binaria para purificar el producto, obteniendo un etanol de mayor concentración. Posteriormente se requiere un proceso de separación de mezclas no ideales para obtener etanol anhidro, es decir un alcohol con mayor pureza.

El uso de las energías limpias ha ido evolucionando con el paso de los años y para su aprovechamiento se buscan técnicas que proporcionen mayor rendimiento y que permitan la diversificación de esta industria. La materia prima de segunda generación incluye la materia lignocelulósica, la cual es la más abundante en nuestro planeta, ya que la lignina, la celulosa y la hemicelulosa se encuentran en la pared celular de los árboles, plantas, desechos orgánicos, entre otros. El bioetanol de segunda generación se produce de desechos orgánicos, a partir de los cuales es más difícil la extracción del azúcar en comparación con los materiales de primera generación. Para el procesamiento de los desechos orgánicos se requiere incorporar una etapa que permita obtener la mayor cantidad de azúcar, es decir es necesario aplicar un pretratamiento a la biomasa. Esta es una de las etapas importantes para la producción de bioetanol, dado que reduce la cantidad de lignina y hemicelulosa, generando una celulosa más susceptible al ataque enzimático. El pretratamiento permite romper las barreras de la lignina a través de la modificación de la estructura del bagazo. Existen distintos tipos de pretratamientos, entre los que se destacan los del tipo químico, térmico, biológico y mecánico Aditiya et al. (2016).

Después del pretratamiento, la biomasa es sometida a una hidrólisis y a una fermentación. La producción de bioetanol de segunda generación se puede llevar a cabo mediante diferentes configuraciones. Una configuración consta de una primera etapa de sacarificación enzimática de la biomasa pretratada y una segunda etapa de fermentación. Esta configuración se denomina SHF (por sus siglas en inglés). Otra configuración incluye la sacarificación y fermentación simultáneas (SSF, por sus siglas en inglés), la hidrólisis y fermentación se realizan en un mismo contenedor, convirtiendo la biomasa en azúcares fermentables y finalmente en alcohol etílico.

Este trabajo de tesis estudia los procesos de producción de bioetanol de segunda generación. El estudio abarca desde los procesos de pre-pretratamiento de la biomasa 2G, que incluyen la clasificación y limpieza del bagazo, hasta la fermentación que produce bioetanol diluido. El trabajo incluye la comparación de dos pretratamientos y se considera únicamente la configuración SSF para obtener el producto final. Los pretratamientos

considerados son uno químico (alcalino) y uno biológico (utilizando humus de lombriz). Las operación requiere tener una temperatura controlada en estas dos etapas.

Las variables del proceso que determinan la producción de bioetanol incluyen, para la etapa de pretratamiento, la temperatura, el tamaño de partícula del bagazo (grado de molienda) y el tiempo de tratamiento; mientras que para el proceso SSF se consideran la temperatura, el pH, la carga enzimática y el volumen de la mezcla. Los experimentos se realizaron secuencialmente en un reactor tipo batch, manteniendo constantes el volumen de mezcla, la carga enzimática y la masa de levadura durante el proceso SSF. Cada serie experimental se efectuó empleando una temperatura de pretratamiento (T_P) constante y una temperatura de SSF (T_S) también constante, donde $T_P \neq T_S$.

Para evaluar el efecto de las condiciones de pretratamiento de la biomasa, se diseñó una serie de experimentos considerando 2 tamaños de partícula de bagazo, tres temperaturas de pretratamiento y 2 tiempos de duración del pretratamiento. Todos los experimentos de SSF se realizaron a temperatura de 43 °C y manteniendo las condiciones del reactor batch fijas durante el proceso.

Con el fin de mantener la temperatura estable se implementaron dos controladores PID en la etapa de pretratamiento, uno para cada tipo de pretratamiento. Los controladores fueron sintonizados considerando un modelo de identificación que relaciona la temperatura del reactor batch con el voltaje aplicado a la resistencia de calentamiento. El pH se reguló utilizando una solución de ácido cítrico, midiendo tanto el pH inicial como el final en cada prueba de SSF. En cada experimento se cuantificó el contenido de bioetanol (% v/v) y se evaluaron los costos asociados al proceso.

El objetivo de esta tesis es analizar el impacto de las variables clave (tamaño de partícula, temperatura y tiempo de pretratamiento) en la producción de bioetanol a partir de desechos orgánicos (bagazo de caña), utilizando configuración SSF. Se compara la eficiencia de dos pretratamientos distintos (químico y biológico), su influencia en el rendimiento del biocombustible, y los costos de producción.

1.1. Planteamiento del problema

La producción de bioetanol 2G enfrenta desafíos técnicos y económicos derivados de la naturaleza compleja de los desechos orgánicos lignocelulósicos. A diferencia de las materias primas convencionales, estos residuos no contienen azúcares fermentables fácilmente accesibles, lo que exige etapas de pretratamiento costosas y energéticamente intensivas para liberar celulosa y hemicelulosa. Además, la poca eficiencia en la fermentación de los azúcares que se liberan baja mucho la cantidad final de etanol.

Estos problemas se ven afectados directamente por factores esenciales como el tamaño de partícula, la temperatura y el tiempo de pretratamiento, además del método de pretratamiento utilizado (biológico y alcalino). Sin embargo, pocos estudios han comparado ambos métodos en condiciones de hidrólisis y fermentación simultáneas (SSF), una configuración prometedora para reducir tiempos y costos (Arcos et al., 2022). Por ello, este estudio evalúa el impacto de estas variables en la producción de bioetanol 2G, con el fin de analizar y proponer un diseño del proceso técnicamente viable y económicamente competitivo para la producción de bioetanol.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar experimentalmente los efectos del tamaño de partícula de biomasa, temperatura y tiempo de procesamiento para dos tipos de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar, previos a la producción de bioetanol de segunda generación (2G) mediante una hidrólisis y fermentación en etapas simultáneas (SSF).

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar los experimentos para analizar los tres factores considerados, con diferentes niveles, para modificar los pretratamientos.
- Acondicionar e instrumentar un reactor tipo batch para llevar a cabo separadamente las etapas de pretratamiento y SSF.
- Diseñar e implementar un control de temperatura para operar el reactor en etapas de pretratamiento y SSF.

- Aplicar experimentalmente dos tipos de pretratamiento de biomasa: el primero de tipo biológico con humus de lombriz y el segundo de tipo alcalino usando hidróxido de sodio.
- Producir bioetanol de segunda generación por medio de una configuración SSF usando el bagazo pretratado con las condiciones definidas por el diseño de experimentos.
- Evaluar y comparar los resultados de las etapas de pretratamiento de biomasa y producción de bioetanol mediante SSF, estableciendo la relación entre rendimiento de bioetanol, consumo energético de los procesos y costo de producción.

1.3. Metas

- Acondicionamiento de un prototipo de laboratorio con control de temperatura para la producción de bioetanol a partir de bagazo de caña.
- Diseño de experimentos que permitan analizar diferentes configuraciones de pretratamiento para producir bioetanol 2G.
- Análisis de los efectos de las variables en el proceso pretratamiento-SSF, en términos de rendimiento del producto, consumo energético y costo de producción.
- Definición de una configuración pretratamiento-SSF que establece la mejor relación costo-producción.

1.4. Justificación

En la última década se han implementado nuevos métodos en la producción de energía amigables con el medio ambiente. Entre las energías limpias se encuentra los biocombustibles, que son considerados como no contaminantes. El bioetanol 2G es un biocombustible producido a partir de desecho orgánico. Un ejemplo de este tipo de biomasa es el bagazo de caña que suele ser llamada materia lignocelulósica. Ya que este tipo de biomasa es considerada basura, tiene la característica de no generar ningún inconveniente en su uso. Analizando los procesos de producción de biocombustibles, se pueden mejorar las técnicas de pretratamiento para el mayor aprovechamiento de los residuos agrícolas.

Este proyecto busca mejorar la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa lignocelulósica, probando y analizando dos métodos de pretratamiento: biológico y alcalino. El estudio se centra en determinar las condiciones más adecuadas (temperatura, tamaño de partícula y tiempo) para lograr mayores rendimientos, menores costos y un consumo energético más eficiente.

Esta investigación se justifica al abordar dos problemas críticos en la producción de bioetanol a partir de bagazo de caña. El primero es la baja eficiencia en la liberación de azúcares en la materia lignocelulósica, y la segunda los altos costos asociados a métodos convencionales de producción. Para resolver estas limitantes resulta de gran importancia el estudio de las variables como la temperatura, el tamaño de bagazo y el tiempo en el pretratamiento. Es de gran importancia conocer las ventajas de los tipos de pretratamientos para la producción de bioetanol, implementados en una configuración SSF. Estas variables y parámetros en el proceso deben compararse en función de costos y eficiencia energética, de tal forma que se pueda obtener un panorama mas completo de los beneficios de cada pretratamiento.

1.5. Alcances

1. Se llevaron a cabo experimentos cambiando variables, entre otros, la temperatura en dos pretratamientos. Como resultado se especifican las condiciones de operación que permitan obtener una mayor producción de biocombustible.
2. Se diseñó e implementó experimentalmente un lazo de control de temperatura manteniendo la operación de la planta en un rango seguro y adecuado para la producción de bioetanol.
3. Se demostró experimentalmente la producción de bioetanol a través de dos etapas combinadas, es decir, sacarificación y fermentación simultáneas, para analizar el comportamiento de las variables y la eficiencia del proceso.

1.6. Implementación de la planta piloto

Para la producción de bioetanol se enfrentaron diferentes retos. Para agitar la biomasa durante el pretratamiento se requiere un motor de alta potencia que mantenga la temperatura y las partículas homogéneas durante el pretratamiento, un motor con estas

características perturba de manera importante la lectura de la temperatura dentro del reactor, para resolver el problema se usó un motoreductor y se colocaron los sensores en una ubicación en la que el ruido no afectara la medición dentro del reactor tipo batch.

Las variaciones de temperatura ambiente impactan en la temperatura dentro del reactor. La disipación de temperatura hacia el ambiente hace que se consuma más energía, por lo que se implementó un control de temperatura que ayudó a mantener la temperatura dentro del reactor.

1.7. Limitaciones

Algunas limitaciones del trabajo fueron las siguientes:

Control del pH: Durante la experimentación, el pH solo pudo monitorearse al inicio y al final de cada prueba, sin ajustes continuos. Esto puede generar ligeras variaciones en la calidad del producto final de bioetanol 2G y el control exacto de las condiciones del reactor.

Tiempo limitado para experimentación: El tiempo disponible para realizar las pruebas fue restringido, lo que impidió ejecutar un mayor número de ensayos de pretratamiento para comparar diferentes condiciones.

Configuración SSF Aunque se optó por este método por su eficiencia, no se evaluaron otras configuraciones (como procesos separados) debido a restricciones de tiempo. Por lo tanto, los resultados obtenidos están condicionados a este único esquema operativo.

1.8. Organización del documento

La información presentada en este documento se organiza en ocho capítulos. A continuación se describe el contenido de cada capítulo brevemente.

Capítulo 2: Marco teórico y estado del arte En esta sección se integran los conocimientos en el contexto de la producción de bioetanol de segunda generación. También se presentan las investigaciones en temas como la producción de bioetanol de segunda generación, y los pretratamientos que han sido desarrollados, entre otros temas.

Capítulo 3: Instrumentación del sistema y control. En este capítulo se presenta el diseño, la instrumentación y el control de la planta.

Capítulo 4: Diseño de experimentos Se proporcionan las condiciones de operación para la producción de bioetanol, obtenidas mediante un diseño de experimentos factorial. Los resultados permitieron analizar el efecto de las condiciones de operación de los pre-

tratamientos estudiados, parte central del trabajo.

Capítulo 5: Pruebas experimentales Las pruebas experimentales son documentadas.

Capítulo 6: Resultados experimentales del proceso de producción de bioetanol 2 G con pretratamiento Alcalino y Biológico. Se presentan los resultados de las pruebas experimentales, así como los costos y el gastos energéticos.

Capítulo 7:Comparativa de los resultados experimentales Se presentan y discuten los resultados de las pruebas.

Capítulo 8:Conclusiones y trabajos futuros Se presentan las conclusiones del trabajo, además de los trabajos futuros de esta investigación.

Capítulo 2

Marco teórico y Estado del arte

2.1. Marco conceptual

A continuación se definen los conceptos claves para el tema, como bioetanol, lignocelulosa, bagazo de caña, pretratamientos, y se describen los procesos de producción de bioetanol que ayudan a comprender el trabajo desarrollado.

2.1.1. Bioetanol de segunda generación

El bioetanol es un combustible que también es conocido como alcohol etílico, y que puede ser utilizado como sustituto de gasolina, así como potenciador de esta. Este combustible es considerado ecológico, genera un ciclo que inicia con la producción del biocombustible. Al ser quemado, se libera dióxido de carbono, las plantas consumen este gas y, por último, estas plantas son utilizadas para generar más biocombustible (Castro-Martínez et al., 2012). Ya que no es un componente tóxico, ni contaminante, el alcohol etílico contiene propiedades que favorecen su uso. También es ventajosa la facilidad de producirlo en grandes cantidades mediante la fermentación de materias primas, que, entre otras, pueden ser residuos orgánicos. Su fermentación proporciona hidratos de carbono que pueden ser usados como sustitutos de gasolina en motores de encendido por chispa (Ballesteros, 2002).

Definición de conceptos

2.1.2. Lignocelulosa

Proveniente de la fotosíntesis, la lignocelulosa es uno de los componentes más abundantes y principales de la biomasa, esta forma la pared celular de las plantas. Entre las plantas, la composición y porcentajes de lignocelulosa varían dependiendo de la edad y etapa de crecimiento de las plantas (Cuervo et al., 2009). Es viable utilizar este material por su bajo costo, su alta disponibilidad y aprovechamiento variado. Como ejemplo se ha reportado su uso en la industria de los materiales compuestos (Jara Huacacolqui et al., 2022). Se han desarrollado usos alternativos para aprovechar este subproducto agroindustrial, utilizándolo en la creación de biocombustibles. La lignocelulosa está conformada por celulosa, hemicelulosa y lignina, siendo una fuente de carbono y energía renovable Portal et al. (2014).

2.1.3. Bagazo de caña

El material es recuperado de la producción de azúcar, se obtiene de un triturado después de obtener el jugo de la caña. En ocasiones, este tipo de biomasa no es aprovechada. Esta biomasa representa alrededor del 28 % en peso de la caña, y también un 45 % de fibra, 2-3 % de sólidos insolubles y otro mismo porcentaje de sólidos solubles, finalmente la mitad de este material está conformado de agua (Olmo et al., 2015). El bagazo representa el material de mayor tonelaje y volumen entre los que se generan durante la producción de azúcar de caña, obteniendo un promedio de 270 kg de bagazo por tonelada (Pérez et al., 2022).



Figura 2.1: Bagazo de caña

2.1.4. Pretratamientos

A la materia prima se le aplica un pretratamiento que ayuda a degradar la materia y producir un mayor porcentaje de concentración de biocombustible. El procesamiento de biomasa lignocelulósica complementa la hidrólisis enzimática y posibilita la obtención de altos rendimientos. Esta etapa es necesaria, ya que la lignina en las paredes celulares en la planta crea barreras contra un ataque enzimático (Riano, 2010).

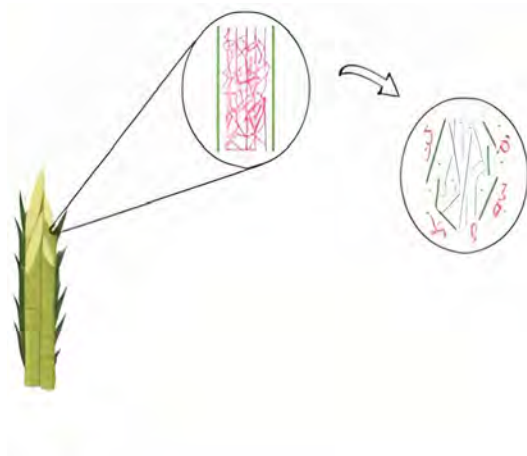


Figura 2.2: Efecto del pretratamiento de biomasa ligno- celulósica

En la Tabla 2.1 se listan los principales pretratamientos, cuya aplicación se reporta en diferentes investigaciones sobre la producción de bioetanol de segunda generación. Aditiya

et al. (2016) y Nasution et al. (2022) ofrecen dos revisiones completas sobre pretratamientos de biomasa para la producción de bioetanol.

Tabla 2.1: Tipos de pretratamiento (Aditiya et al., 2016)

Tipo de pretratamiento	Método
Ácido	Percolación de amoníaco reciclado Ácido diluido Ácido concentrado Explosión de CO ₂ Hidrólisis ácida
Térmico	Expulsión de vapor Agua caliente
Biológico	Bacterias Hongos
Alcalino	líquido iónico Hidrólisis alcalina
Químico	Ozonólisis Proceso con disolventes orgánicos Oxidación húmeda
Mecánico	Trituración Pirólisis Microondas

■ Pretratamiento alcalino

El pretratamiento con NaOH es uno de los más utilizados entre los pretratamientos alcalinos. Por un lado, genera un incremento en la hidrólisis (Espinosa Negrín et al., 2021), en cambio, produce una pérdida de celulosa y hemicelulosa que puede reducir la producción de azúcares y bioetanol. El pretratamiento utiliza hidróxido sódico, amoníaco o cal, generando menos inhibidores, lo cual permite una mayor deslignificación en comparación con tratamiento con ácidos (Valles Sáez, 2022).

■ Pretratamiento biológico

Existen pretratamientos biológicos en los que comúnmente se usan microorganismos, hongos, y enzimas que promueven la degradación de la lignina. El uso de hongos en este tipo de procesos ayuda a descomponer la lignina. En general, estos pretratamientos tienen bajo consumo energético en su implementación, (González, 2018).

2.1.5. Sacarificación enzimática de la biomasa pretratada y la fermentación

El proceso de sacarificación enzimática y fermentación (SHF) se realiza por separado debido a que la temperatura en las distintas fases es diferente. En el caso de las enzimas hidrolíticas el promedio es de 50 °C, y una temperatura más baja en el caso de la fermentación, de 30 °C a 32 °C. La producción del etanol por etapas separadas es una de las técnicas más antiguas. Se realiza un pretratado de enzimas para su hidrólisis y posteriormente una fermentación de la biomasa resultante (Choudhary et al., 2016).



Figura 2.3: Diagrama de hidrólisis y fermentación en etapas separadas (Choudhary et al., 2016).

2.1.6. Sacarificación y fermentación simultánea

En el artículo Choudhary et al. (2016) se reporta un proceso con sacarificación simultánea con la fermentación. La producción de etanol con microorganismo de importancia industrial como *Saccharomyces cerevisiae* (levaduras), no permite la utilización completa, este es incapaz de fermentar los azúcares. Se tiene la posibilidad de mantener la concentración de glucosa a un nivel bajo que permite una eficiente co-fermentación. Este se lleva a cabo en un mismo contenedor, solucionando el problema de la utilización de productos para mayor producción de enzimas, siendo un problema limitante en la Sacarificación enzimática y fermentación (SHF). Mejorando la eficiencia de la sacarificación enzimática como el rendimiento de etanol. Las enzimas hidrolíticas son adaptables al frío y las leva-

duras termófilas son importantes que se mantengan a temperatura ambiente Choudhary et al. (2016).



Figura 2.4: Diagrama de hidrólisis y fermentación simultánea (Choudhary et al., 2016).

2.2. Estado del arte

El pretratamiento es un paso muy importante para la producción de bioetanol de segunda generación, algunos de los pretratamientos que existen son: Ácido, Térmico, Biológico, alcalino, Químico, Mecánico (Aditiya et al., 2016). El pretratamiento con NaOH es uno de los más utilizados como pretratamientos alcalinos, este promueve la hidrólisis Espinosa Negrín et al. (2021). Una desventaja de este es la pérdida de celulosa y hemicelulosa, y la reducción de azúcares y bioetanol. En general, el pretratamiento alcalino genera menos inhibidores y favorece la deslignificación, en comparación con tratamiento con ácidos, según Valles Sáez (2022).

También hay pretratamientos biológicos en los que comúnmente se usan microorganismos, hongos, y enzimas que promueven la degradación de la lignina. El uso de hongos en este tipo de procesos ayuda a descomponer la lignina. En general, estos pretratamientos tienen bajo consumo energético en su implementación, González (2018).

2.2.1. Tecnología de bioetanol de segunda generación.

El bioetanol puede ser producido a partir de distintos tipos de materia prima. Cuando se utiliza la materia lignocelulósica, el bioetanol es llamado de segunda generación (2G).

En la revisión creada por Melendez (2022) muestra una investigación sobre la tecnología empleada en la producción de bioetanol 1G y 2G, donde categorizo en tres clasificaciones: Innovación en 1G, Innovación en 2G y, por último, Gestión y factibilidad industrial. Para la primera clasificación resalta los costos asociados para la producción de bioetanol, dado que se basan en esos resultados para encontrar métodos eficientes. Menciona materias primas como el jugo de caña, donde se obtienen mayores resultados. El autor ejemplifica con esquemas para la producción utilizando esta materia prima.

Para la segunda clasificación se enfoca la ventaja y desventajas de la utilización de materias lignocelulosica, dando un enfoque en los pretratamientos y así como en los acondicionamientos en la biomasa.

Para la tercera clasificación, habla sobre la adaptabilidad de los procesos en las biorrefinerías, utilizando normas y la producción, realizando así una conexión industrial-empresarial.

2.2.2. Pretratamientos.

Pretratamiento Biológico

Para la producción de bioetanol de segunda generación se realizaron investigaciones donde utilizan como materia lignocelulósica el bagazo de caña, pretratado con hongo *Pleurotus ostreatus*, donde esta investigación tiene el propósito el evaluar la eficacia del pretratamiento, observando la reducción del contenido de fibra. El bagazo de caña pretratado es comparado con bagazo sin pretratar para obtener los resultados ya que se desea evaluar el impacto del biotransformación. Como conclusión la investigación muestra que el hongo *Pleurotus ostreatus* muestra una reducción significativa de la fibra, siendo beneficioso, dado que enriquece el bagazo con nutrientes (Faviana (1 12)) .

Pretratamiento Alcalino

El pretratamiento alcalino consiste en sumergir un material lignocelulósico en una solución alcalina bajo ciertas condiciones de temperatura, concentración, y tiempo de tratamiento. Los álcalis más usados son hidróxido de sodio (NaOH), de potasio (KOH) o de amonio (NH₄OH). Estos compuestos rompen los enlaces entre la lignina y los carbohidratos, o solubilizan parcialmente la lignina (Galbe and Zacchi, 2012). Enseguida se describen algunas investigaciones sobre pretratamientos alcalinos como medio para favorecer la hidrólisis enzimática de la biomasa, que para la actual revisión es el bagazo de

caña.

Nasution et al. (2022) presentó una revisión de los pretratamientos más usados en los últimos años. Como pretratamiento alcalino se destaca el uso del NaOH. Comúnmente se recomienda manejar una concentración al 2 % de NaOH, una relación de agua destilada de 1:10 solido-liquido, y una temperatura de operación de 80 °C, así como un tiempo de tratamiento de 2h.

En un estudio afín, Arcos et al. (2022) utilizó como biomasa bagazo de caña para producir bioetanol con dos modos diferentes de producción: sacarificación enzimática y fermentación en etapas separadas (SHF), y sacarificación y fermentación simultáneas (SSF). Se probaron 4 tipos de pretratamientos de la materia prima, entre estos se aplicó un pretratamiento alcalino usando como base NaOH al 2 % p/v y una carga de bagazo del 4 % p/v. El pretratamiento se llevó a cabo a 97 °C durante un tiempo de 90 minutos. Al finalizar este tiempo, la biomasa tratada se acondicionó mediante etapas de enjuagado, filtrado y secado para después ser procesada por cada modo de producción, SHF o SSF. Comparando el porcentaje de alcohol obtenido a partir de cada proceso (SHF o SSF), se concluyó que el proceso SHF obtuvo un producto más concentrado, con 15 % de alcohol, mientras que el producto del proceso SSF tenía un contenido de alcohol menor de 11 %. En contra parte se concluyó que el proceso SSF reduce en un 80 % el tiempo consumido por el proceso SHF.

Otros pretratamientos

Pretratamiento ácido

El pretratamiento ácido se realiza impregnando en un ácido diluido el material lignocelulósico. Comúnmente se usan ácidos minerales como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que fragmenta los componentes de la biomasa en moléculas más pequeñas (Galbe and Zacchi, 2012). Como ejemplo se citan los siguientes estudios. Regresando al trabajo de Arcos et al. (2022), entre los pretratamientos que se presentaron está también uno con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y agua destilada. Para este caso se efectuaron experimentos con 3 porcentajes de carga de biomasa (4 %, 6 %, 8 %) a temperatura máxima de 97 °C y con duración de 60 minutos. Para el proceso SSF se obtuvo un producto con 7 % de alcohol, es decir un rendimiento menor que el obtenido con el pretratamiento alcalino desarrollado en el mismo trabajo para bagazo de caña.

Otro trabajo sobre producción de bioetanol con bagazo de caña pretratado con ácido es el de Tantayotai et al. (2022), quienes compararon la efectividad de dos ácidos, uno

orgánico y otro mineral. Como resultado, se concluyó que el pretratamiento con ácidos orgánicos fue más efectivo porque se logró mayor rendimiento.

Rojas (2010) y sus colaboradores también expusieron sus resultados para 3 pretratamientos de bagazo de caña, incluido uno ácido. Su objetivo fue comparar el impacto ambiental de los tres pretratamientos. Al igual que en los trabajos antes citados, el pretratamiento se hizo con H_2SO_4 . Se usó el ácido al 1.5 % en peso y se procesó a 160°C . Se obtuvo como resultado la degradación del 90 % de la hemicelulosa y una completa solubilidad de la lignina. Después del pretratamiento se efectuaron la fermentación, la destilación y la purificación del producto. La etapa de SSF se concluyó con un rendimiento de 85 % de la sacarificación y fermentación de la celulosa, mientras que el rendimiento del proceso SHF fue de 75 % con respecto a la fermentación de azúcares. Finalmente, se concluyó que al comparar los tres tipos de pretratamientos efectuados, el ácido no se encuentra entre los mas contaminantes.

Pretratamiento térmico

Regresando al trabajo de Rojas (2010), otro de los pretratamiento probados para el bagazo de caña fue un pretratamiento térmico en condiciones de temperaturas y presiones elevadas, de 220°C y 22.9 atm. Al analizar los niveles de contaminación de los pretratamientos se concluyó que dada la cantidad de energía que se requiere para llegar a altas temperaturas, el pretratamiento térmico resultó ser el más contaminante.

El trabajo de Moonsamy et al. (2022) tuvo como objetivo lograr una producción autosustentable, para lo cual se propusieron distintos escenarios. Un aspecto esencial de su análisis fue explorar la viabilidad de combinar procesos de primera y segunda generación a partir de melazas y material lignocelulósico provenientes de la caña de azúcar. El pretratamiento propuesto fue el de explosión de vapor. Este consiste en hacer pasar una corriente líquida de hemicelulosa con una parte sólida de celulosa y lignina. Posteriormente, dependiendo del escenario se realizó una SSF o una SHF. La conclusión fue que la ventaja del proceso combinado es su factibilidad económica, el reto es evitar la inhibición o supresión de la glucosa.

2.2.3. Configuraciones en la producción de bioetanol

Sacarificación enzimática de la biomasa pretratada y la fermentación separadas

En el artículo de Gomes-da Silva et al. (2022) se analizaron tres configuraciones para fermentación de bagazo de caña ante diferentes condiciones de operación, en modo por etapas separadas. Con un primer análisis se evaluó la influencia de la humedad, comparando la efectividad del proceso para humedades de la biomasa del 40 % y 60 %. Se concluyó que con menor humedad, el rendimiento de bioetanol aumenta. En un segundo análisis se evaluó el efecto de la velocidad de dilución durante la fermentación. El resultado fue que a mayor velocidad, el producto tiene mayor concentración de etanol. Por último se implementó una SSF, en la que se alcanzó un rendimiento bioetanol/bagazo del 12.5 %.

Sacarificación y fermentación simultáneas

En la tesis publicada por Cortés Ocampo (2022), desarrollada en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, se investigó la producción de etanol a partir de rastrojo de maíz utilizando una configuración de sacarificación y fermentación simultánea (SSF, por sus siglas en inglés). El estudio incluyó un pretratamiento termoquímico del residuo lignocelulósico, empleando ácido sulfúrico a una temperatura de 130 °C, en condiciones de laboratorio.

La etapa de SSF se llevó a cabo con temperaturas máximas de 50 °C, con tiempos de reacción que variaron entre 6 y 48 horas, durante los cuales se realizaron muestreos en línea para el monitoreo del proceso. Posteriormente, se aplicó un tratamiento a los sólidos remanentes.

Para el análisis final, se cuantificaron glucosa, carbohidratos liberados y compuestos solubles mediante HPLC, así como los carbohidratos presentes en los sólidos remanentes. Los resultados mostraron que, a las 24 horas posteriores al inicio del pretratamiento, se alcanzó la mayor producción de etanol, así como una temperatura de 45 °C. La sepa con mayor producción de etanol es la llamada TT23 *S. Cerevisiae*.

2.2.4. Producción de bioetanol de segunda generación en reactores tipo Batch

En la tesis de Verdejo (2024) se realizó un proceso de hidrólisis y fermentación simultáneas. El trabajo tuvo como objetivo diseñar un biorreactor para la producción de 2,3 -butanodiol a partir de zanahoria, mencionando que el diseño del biorreactor tiene un sistema de agitación. Uno dato que se menciona es que mediante el agitado, la glucosa es más abundante en el proceso. El reactor usado tenía una capacidad de 2 L, fue operado con una carga enzimática de 5 FPU/g y 10 FPU/g con temperaturas de 37°C. Otra conclusión obtenida fue que la carga enzimática no afectó la producción. En otra investigación, la producción de bioetanol se llevó a cabo utilizando la cáscara de piña como biomasa. En este caso se empleó un reactor tipo batch con tanque agitado, elegido por su facilidad de manejo. Como conclusión, se destaca que factores como la temperatura han influido positivamente en el aumento del rendimiento del proceso. Ver el artículo Segura et al. (2018)

Capítulo 3

Instrumentación del sistema y control

3.1. Planta piloto de producción de biodiésel

En el laboratorio de procesos se encuentra una planta piloto que en 2008 fue utilizado para la producción de biodiésel, en la Figura 3.1 se puede observar como se encontraba antes la estructura.



Figura 3.1: Planta piloto utilizada para la producción de biodiésel

El biorreactor consta de 8 elementos: reactor, recipiente contenedor de aceite, recipiente contenedor de metóxido, motor agitador, válvula solenoide, resistencia eléctrica de calentamiento, mezclador y armadura de soporte (Torres del Carmen, 2008). Dado que se requiere adaptar el biorreactor, por el momento solo se utilizaron 6 de los 8 elementos para realizar los experimentos. En este reactor se llevaron a cabo los pretratamientos de

la biomasa y la producción en una etapa de hidrólisis y fermentación.

3.1.1. Planta: Adaptación del biorreactor

La planta piloto utilizada para producción de biodiésel fue modificada y adaptada para la producción de bioetanol



Figura 3.2: Estructura sin acondicionar

La estructura se reforzó con barras angulares en forma de "L" que inicialmente se encontraban superpuestas. Para garantizar una mayor estabilidad, estas se soldaron entre sí y se añadieron refuerzos adicionales. Además, se soldó en una parte de la estructura una base para servir como soporte fijo del biorreactor, ya que originalmente este solo estaba colocado sobre él sin ningún soporte. En la Figura 3.2 se puede observar cómo se encuentra el reactor sobrepuesto. El acondicionamiento de la estructura se puede observar en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Estructura soldada y acondicionada

El tanque tiene una capacidad de 10.38 L, equivalente a un volumen de $10.38 \times 10^6 \text{ mm}^3$. Dentro de este reactor se llevaron a cabo, en un primer tiempo, los pretratamientos, y en una segunda fase, el proceso que incluye la hidrólisis y la fermentación. En la Figura 3.5, se pueden observar las dimensiones del reactor. Dentro del tanque agitado se soldaron unos tubos que tienen el propósito de mantener los termopares K en su lugar, de tal forma que estos no se enreden con el mezclador. Son tres tubos con diámetro de 1 cm, distribuidos dentro del reactor como lo muestra la Figura 3.4.



Figura 3.4: Tres tubos soldados dentro del reactor.

Al tanque se le integró una resistencia para calentar la solución, la estructura que se soldó y modificó para adaptar correctamente los sensores tipo K, y un agitador que mantiene la temperatura y la mezcla homogéneas, la Figura 3.3 muestra la estructura.

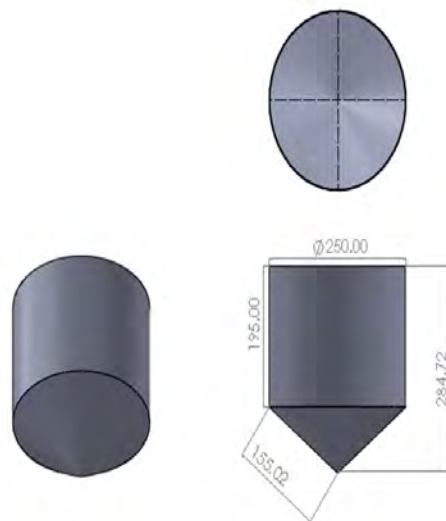


Figura 3.5: Dimensiones del reactor en milímetros.

3.1.2. Motor

El tercer elemento que fue modificado dentro del biorreactor fue el motor. El motor original del prototipo era de corriente alterna, 127 V, 50 Hz-60 Hz, y 133 rpm. El motor nuevo que se instaló contaba ya con el torque necesario para mover los 6 L de agua con bagazo de caña, como lo muestra la Figura 3.6 .

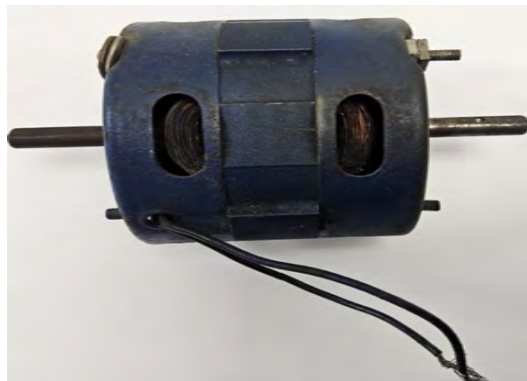


Figura 3.6: Motor empleado en el proceso de producción de biodiesel.

Se buscó un motor que tuviera esa capacidad, por lo que se utilizó un motor-reductor. como el que se muestra en la Figura 3.7. Con este elemento se alcanza el torque necesario,



Figura 3.7: Moto-reductor

El motor tiene una velocidad nominal de 142 rpm y un voltaje de operación de 24 V, trabaja con un torque nominal de 3.9 kN/m. Se utiliza un relé programable para ciclos de encendido/apagado, donde el motor se mantiene 10 s encendido y otros 10 s apagado, con el propósito de no mantenerlo en un esfuerzo constante.

3.1.3. Mezclador

En el proceso de pretratamiento y en la etapa de hidrólisis y fermentación, se requiere mantener una temperatura uniforme dentro del reactor, así como lograr una mezcla homogénea. Por ello, es esencial contar con un mezclador que posea las características necesarias para homogeneizar todo el compuesto. Anteriormente, el biorreactor contaba con un mezclador, pero lamentablemente se encontraba oxidado y en malas condiciones, como se muestra en la Figura 3.8.



Figura 3.8: Mezclador utilizado para la producción de biodisel.

Por este motivo, se procedió a su rediseño (en las imágenes 3.9 se presentan las dimensiones del nuevo mezclador), y se encargó su construcción a un profesional especializado.

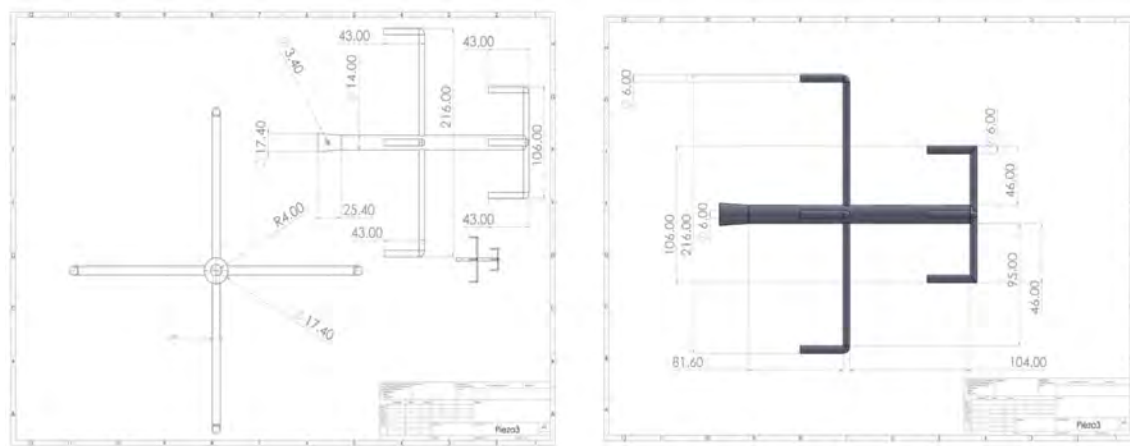


Figura 3.9: Medidas del mezclador vista lateral

El mezclador y el reactor fueron replicados en el software SolidWorks con el objetivo de obtener una comprensión más clara de la ubicación del mezclador dentro del reactor, tal como se ilustra en la Figura 3.10.



Figura 3.10: Mezclador y reactor vista frontal

El agitador se construyó en acero inoxidable, conforme con las especificaciones, el elemento resultante se puede observar en la figura 3.11



Figura 3.11: Mezclador y reactor vista frontal

3.2. Adecuación de la planta para control de temperatura

Dado que la temperatura es una variable importante durante los pretratamientos y en la etapa de hidrólisis y fermentación, se requiere tomar un registro de la temperatura durante todo el proceso. En los siguientes apartados se reporta la programación de los sensores DHT11, que leen la temperatura y la humedad ambiental, así como la requerida para un termopar tipo K que mide la temperatura dentro del biorreactor.

La temperatura ambiente es un elemento importante, dado que puede impactar en la temperatura dentro del reactor. Para tener un mejor control, es necesario que sea monitoreada constantemente durante todo el tiempo que dure el experimento.

Material:

- Termopar tipo K
- Sensor DHT 11
- Monitor
- Cable HDMI
- Raspberry pi 3

La Raspberry Pi es una mini computadora con un sistema operativo tipo Linux. La ventaja de esta es que puede interactuar con el mundo exterior. Para poder realizar el programa que lea los datos y se grafiquen, se configura la Raspberry Pi 3 en dos pasos: instalación del sistema operativo(Raspberry Pi OS, anteriormente llamado como Raspbian) e instalación de las librerías (Pandas, Numpy, entre otras). Después de la instalación, se inicia la programación de los sensores. Para conocer cómo se instaló y actualizó el sistema operativo de la Raspberry Pi 3, así como las librerías que se utilizaron para programar los sensores se puede consultar el anexo A.

3.2.1. Lectura y registro de las temperaturas.

El termopar K es uno de los sensores mas utilizados, es fabricado de dos materiales distintos y leen en un amplio rango de temperaturas, llegando hasta 1200 °C. El programa que lee los sensores DHT11 y el termopar tipo K se detalla en el anexo B, donde se menciona el programa completo en lenguaje python, realizado en Raspberry Pi OS. Para obtener más información sobre el programa, se presenta el diagrama en la figura 3.12.

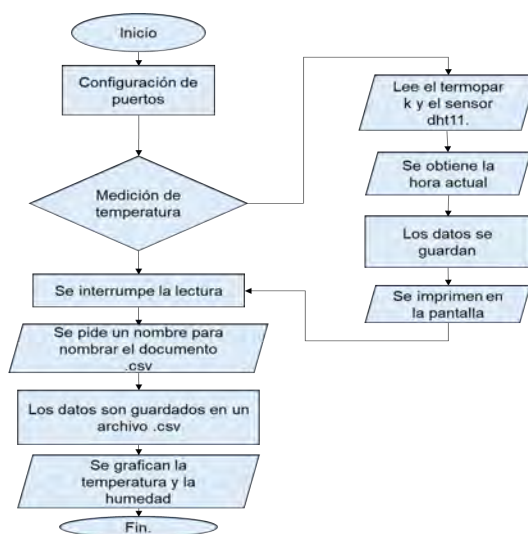


Figura 3.12: Programación de los sensores

El programa lee la señal mandada por los termopares K, posteriormente esta señal es convertida en un valor de temperatura. De la misma forma, la fecha y la hora son leídas y guardadas en una tira de datos dentro de un documento con formato CSV. El conteo y guardado se generan cada 5 segundos. Cada vez que los datos son guardados pueden ser mostrados en la pantalla. Finalmente, cuando se interrumpe manualmente el programa,

finalizando el tiempo de pretratamiento, el programa muestra una gráfica con los valores y es posible ver el archivo guardado. El archivo CSV es un archivo que puede visualizarse en Excel.

3.2.2. Convertidor: diseño y construcción

Para el calentamiento del tanque se cuenta con una resistencia con potencia de 600 W, por lo que se busca que cuando ingrese la señal de entrada sea suficiente para utilizar la resistencia por lo que se optó por realizar un convertidor que ayuda a aumentar la potencia de entrada. El diseño del convertidor se puede observar en la Figura 3.13.

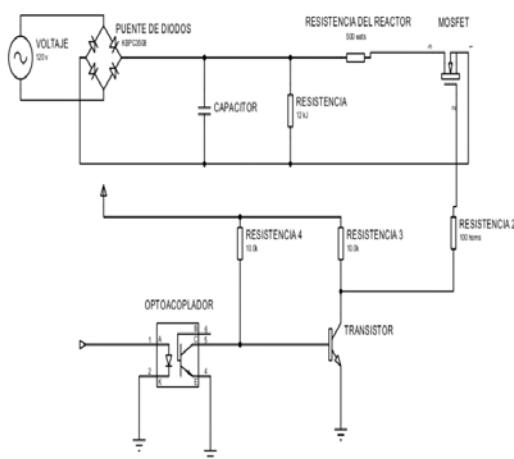


Figura 3.13: Diagrama del convertidor

El convertidor tiene diferentes etapas, primero toma un voltaje externo de corriente alterna (CA) y lo rectifica, convirtiéndolo en corriente directa (CD). Posteriormente, mediante un MOSFET, el voltaje proveniente del ciclo de trabajo es regulado y potenciado. El ciclo de trabajo de la señal PWM es generado por un Arduino, al cual se le incorporaron protecciones para garantizar un funcionamiento seguro y estable. Finalmente, el convertidor entrega un voltaje variable en el rango de 0 a 147 V CD, el cual es aplicado a la resistencia del biorreactor. Este diseño permite uso preciso de la energía mientras protege los componentes electrónicos involucrados.

Material:

- MOSFET
- Puente de diodos

- Capacitor
- Opto acoplador
- Resistencias
- Transistor

Para obtener el valor de cada uno de los componentes primero se calcula el voltaje pico, utilizando la siguiente ecuación.

$$V_{\text{pico}} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \quad (3.1)$$

donde

V_{pico} Es el voltaje pico

V_{rms} Es el voltaje cuadrático medio

Sabiendo que tenemos una entrada de voltaje de 120 V, los valores se sustituyen en la ecuación 3.2

$$V_{\text{pico}} = \sqrt{2} (120) \quad (3.2)$$

$$V_{\text{pico}} \approx 168.6V \quad (3.3)$$

Posteriormente se obtiene el valor de la caída de tensión utilizando la fórmula

$$V_I = V_{\text{pico}} - 2V_D \quad (3.4)$$

donde

V_{pico} Es el voltaje pico.

V_I Representa el voltaje que proporciona la fuente de energía al circuito.

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 3.3, resulta que

$$V_I = 168.6V - 2(0.7) \quad (3.5)$$

$$V_I \approx 168.6V \quad (3.6)$$

Obteniendo el valor de la caída de tensión se calcula el capacitor que se requiere, resolviendo la ecuación 3.7

$$C = \frac{V_I}{2fRV_r} \quad (3.7)$$

Donde

C Es el valor de capacitancia

V_I Representa el voltaje del circuito

f Es la frecuencia

V_r Representa el voltaje de rido

R Es la resistencia.

Si se cuenta con una resistencia de 24.8Ω , proponiendo un porcentaje de risado de $\%V_r = 34 \%$, utilizando una frecuencia de $60Hz$ y sustituyendo el valor de la ecuación 3.6, obtenemos como resultado la ecuación 3.8

$$C = \frac{168.6}{2(57)(60)(24.8)} \quad (3.8)$$

$$C \approx 1.011 \times 10^{-3} \quad (3.9)$$

Dado el resultado, se puede utilizar un capacitor de $330 \mu f$. Se desea calcular el ángulo de conducción para conocer la corriente que circula por el puente de diodos, y así calcular cuál puede ser utilizada, teniendo la ecuación

$$w\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} \quad (3.10)$$

donde

$w\Delta t$ Es el angulo de conducción

V_r Representa el voltaje de rido

V_p Voltaje pico

resolviendo con los datos obtenidos de V_r y de $V - p$ obtenemos

$$w\Delta t \approx \sqrt{\frac{2(57)}{168.6}} \quad (3.11)$$

$$w\Delta t \approx 0.82 rad \quad (3.12)$$

Aplicando la formula 3.13 para obtener el porcentaje de conducción

$$\%w\Delta t = \frac{w\Delta t}{2\pi} * 100 \quad (3.13)$$

sustituyendo el valor del ángulo de conducción

$$\%w\Delta t \approx \frac{0.82rad}{2\pi} * 100 \quad (3.14)$$

$$\%w\Delta t \approx 13\% \quad (3.15)$$

Calculando la corriente promedio que pasaría por el puente de diodos utilizamos la formula 3.16.

$$I_{Dprom} = I_L(1 + \pi\sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}) \quad (3.16)$$

donde

I_{Dprom} Corriente

I_L Representa el voltaje de riso

Para obtener el valor de I_L aplicamos la ecuación

$$I_L \approx \frac{V_1}{R} \quad (3.17)$$

sustituyendo los valores en la ecuación 3.17, obtenemos

$$I_L \approx \frac{168.6}{24.8} \quad (3.18)$$

$$I_L \approx 6.79 \quad (3.19)$$

dado el valor, se sustituye en la ecuación 3.16

$$I_{Dprom} \approx (6.79)(1 + \pi\sqrt{\frac{2(168.6))}{(57)}} \quad (3.20)$$

y de esta forma se obtiene el valor de la corriente promedio que pasa por el puente de diodos

$$I_{Dprom} \approx 58.67A \quad (3.21)$$

Posteriormente se calcula la corriente máxima (I_{max}) que puede pasar por el puente de diodos, utilizando la ecuación 3.22.

$$I_{max} \approx I_L(1 + 2\pi\sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}) \quad (3.22)$$

donde

I_{max} Es la corriente máxima

V_r Representa el voltaje de rido

V_p Voltaje pico

Sustituyendo los valores de I_L , V_r y V_p , obtenemos

$$I_{max} \approx (6.79)(1 + 2\pi\sqrt{\frac{2(168.6))}{(57)}} \quad (3.23)$$

$$I_{max} \approx 110.55A \quad (3.24)$$

Con ese resultado fue posible elegir el puente de diodos que se requiere. Asimismo, conociendo la corriente se buscó un MOSFET que pudiera soportar esa corriente.

Se propuso usar una resistencia que ayudara a descargar el capacitor posterior a su uso. Con respecto al control, dado que la señal de voltaje puede ir de 0 a 5 V, los componentes se eligieron buscando que fueran capaces de resistir ese voltaje.

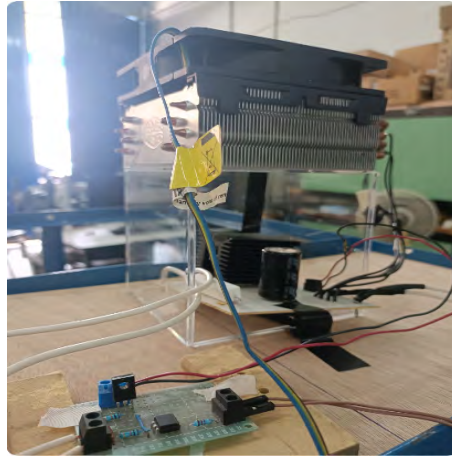


Figura 3.14: Construcción del convertidor

Una vez finalizado el diseño del convertidor, se procedió a su implementación física. Durante la etapa de construcción, se realizó el ensamble de los componentes electrónicos, la soldadura cuidadosa de las conexiones y el aislamiento adecuado de los elementos críticos para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema. El resultado final

de este proceso de fabricación puede observarse en la figura 3.14, donde se aprecia el convertidor completamente ensamblado y listo para su puesta en marcha.

3.2.3. Planta final

Gracias a las modificaciones realizadas, la planta ahora cumple con las especificaciones requeridas para llevar a cabo tanto los pretratamientos, como la etapa en conjunta de hidrólisis y fermentación, tal como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15: Planta con los elementos necesarios para realizar los pretratamientos, así como la hidrólisis y fermentación.

3.3. Sistema en lazo abierto

La planta tiene integrada una resistencia para calentamiento con potencia de 600 W. Dado que la resistencia requiere una potencia de esa magnitud, se necesita un convertidor que aporte la energía necesaria, obteniendo el voltaje externo de la corriente alterna. De esta forma, se obtiene la entrada necesaria para la resistencia.

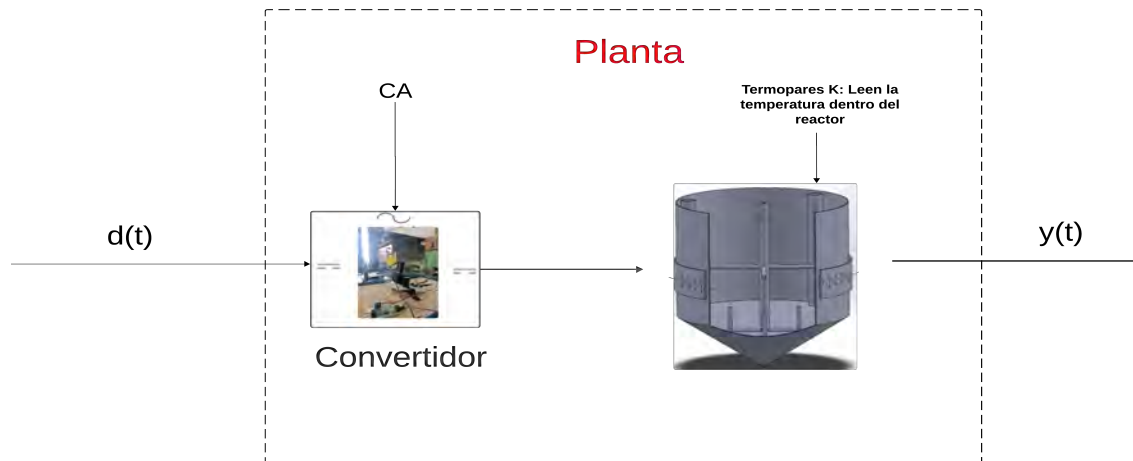


Figura 3.16: Diagrama que muestra las entradas a la planta

En la Figura 3.16 se ilustra el proceso completo del sistema: una señal de ciclo de trabajo $d(t)$ (que varía del 0 % al 100 %) es convertida a un voltaje de 0 a 5 V, el cual sirve como referencia para el convertidor. Este voltaje, con ayuda de una señal externa de corriente alterna (CA), que es rectificadora y amplificada mediante un arreglo de transistores MOSFET, llamado convertidor, genera un voltaje de salida variable que se mete a la resistencia del reactor. Finalmente, la respuesta del sistema se mide a través de la señal de salida $y(t)$, que corresponde a valores de temperatura registrados mediante termopares tipo K, obteniendo así el comportamiento de la planta.

3.3.1. Ciclo de trabajo vs Señal PWM

Para entender cómo se comporta el sistema en general, se debe generar una señal PWM (Pulse Width Modulation), una señal PWM es una técnica de modulación escalar, donde muestran valores de 0 a 1 generalmente, produciendo un tren de pulsos con un ancho específico (Posada Contreras, 2005), esta es una técnica de modulación de ancho de pulso de una señal donde se modifica el ciclo de trabajo de la señal periódica. El ciclo de trabajo de una señal periódica $d(t)$ se define como la relación entre la duración de su parte positiva W y el período total de la señal T , (Cortés et al., 2011). Con ayuda de Simulink se puede generar y configurar esta señal para poder ser ingresada al sistema, ver Figura 3.17

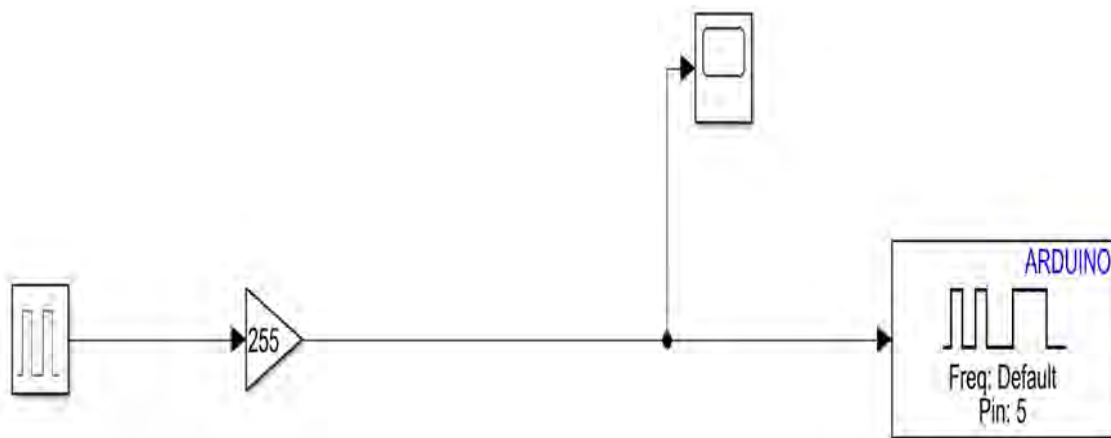


Figura 3.17: Diagrama para generar una señal PWM en Simulink

Esta señal PWM entrara al sistema modificando los ciclos de trabajo (0, 100 %), para saber el comportamiento de la temperatura dentro de la planta, así como observar la linealidad de nuestro sistema, con los resultados obtenidos se configurara una señal PRBS que ayude a identificar el sistema, para obtener una identificación que lo modele. Para conocer comportamiento de una señal PWM podemos observar la figura 3.18, la cual nos muestra una señal con una frecuencia de 60 hz al 50 % del ciclo de trabajo..

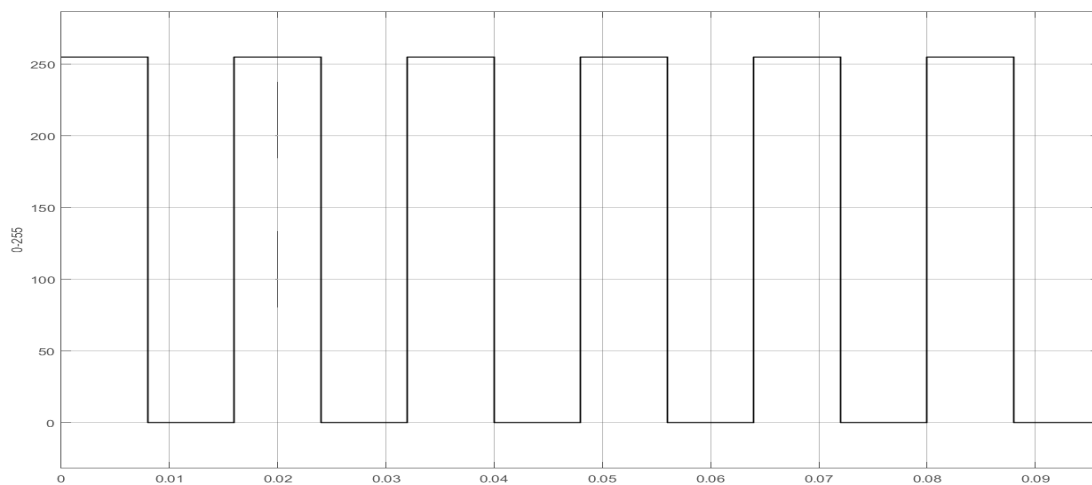


Figura 3.18: Señal PWM

3.3.2. Análisis del comportamiento del sistema ante excitaciones

Se observa el comportamiento de la temperatura dentro del biorreactor, realizando distintas pruebas con señales PWM modificando el ciclo de trabajo $d(t)$ que, con ayuda del convertidor, ingresa a la resistencia.

Ciclo de trabajo al 90 %

Inicialmente se modificó el ciclo de trabajo de la señal PWM al 90 %. Los resultados de esta prueba se muestran en la Figura 3.19.

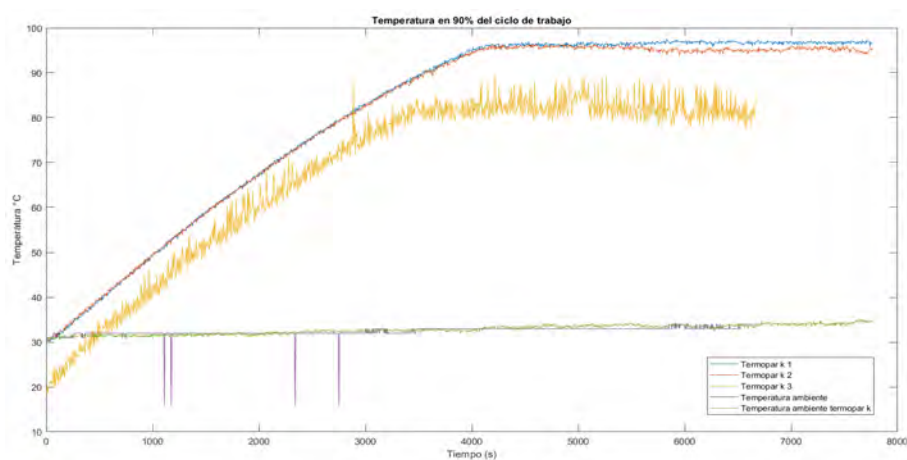


Figura 3.19: Prueba 1, Termopar K 1 y 2 con un ciclo de trabajo de 90 %.

Se encuentran tres sensores termopar tipo K dentro del reactor. En la Figura 3.19 se pueden observar las tres señales. Sin embargo, el termopar K1 y el termopar K2 convergen a 97°C, como se muestra en la Figura 3.20, lo cual es un poco más alto que la temperatura de evaporación del agua en Cuernavaca (94°C-95°C). No obstante, el sensor termopar K muestra un error de 10°C en comparación con los otros dos sensores termopar K3, debido al ruido en el sensor y una falla en el mismo. En cuanto a la temperatura ambiente, osciló en un rango de 30°C a 34°C.

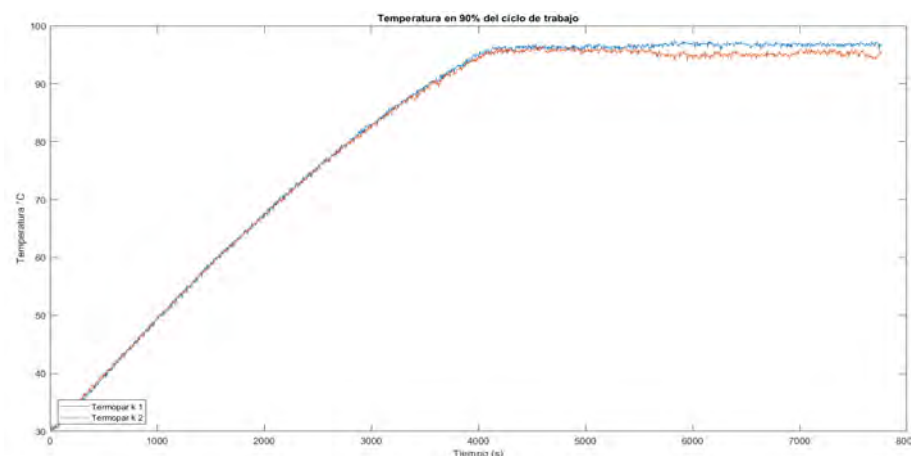


Figura 3.20: Prueba 1, modificando el ciclo de trabajo al 90 %.

Ciclo de trabajo al 50 %

Para observar el comportamiento de la temperatura dentro del biorreactor con la mitad del ciclo de trabajo, se modificó al 50 %. Dado esto, se puede observar el comportamiento de la temperatura en el biorreactor, como se muestra en la Figura 3.21.

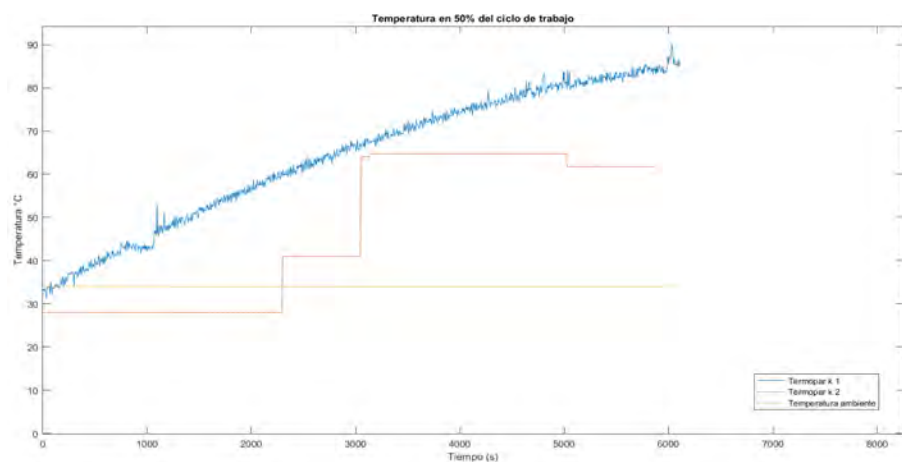


Figura 3.21: Prueba 2, modificando el ciclo de trabajo al 50 %.

Como se muestra en la Figura 3.21, dos de los 3 termopares que se encuentran dentro del biorreactor se dañaron, mostrando temperaturas que no correspondían. Uno de ellos funcionó correctamente; sin embargo, contiene mucho ruido, como se muestra en la Figura 3.22, esta señal fue la elegida por tener una mejor dinámica en comparación con las otras pruebas.

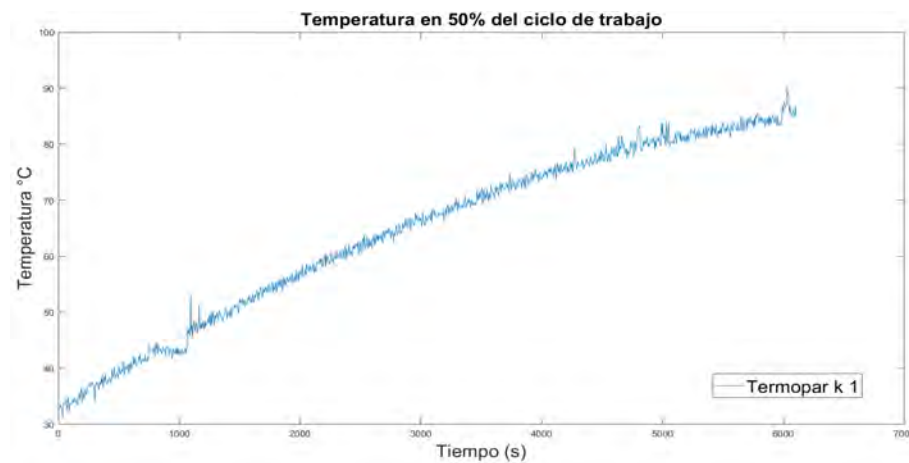


Figura 3.22: Prueba 2, termopar K 1, modificando el ciclo de trabajo al 50 %.

Ciclo de trabajo al 10 %

Por último, se realizaron pruebas con el ciclo de trabajo al 10 % para comparar con los dos porcentajes anteriores. En esta prueba se consideraron los 3 sensores; sin embargo, dos de ellos mostraron un decremento y posteriormente se regularizaron, como se muestra en la Figura 3.23.

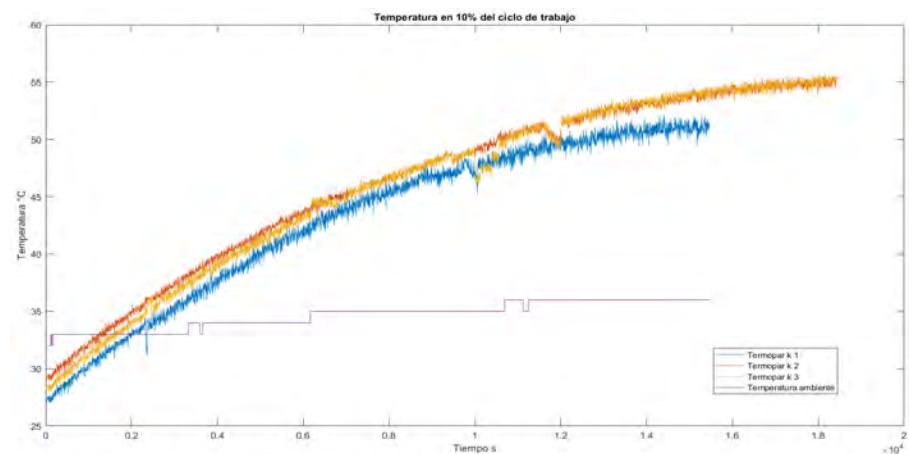


Figura 3.23: Prueba 1, modificando el ciclo de trabajo al 10 %.

En la Figura 3.24 se muestra la temperatura registrada por el termopar 2.

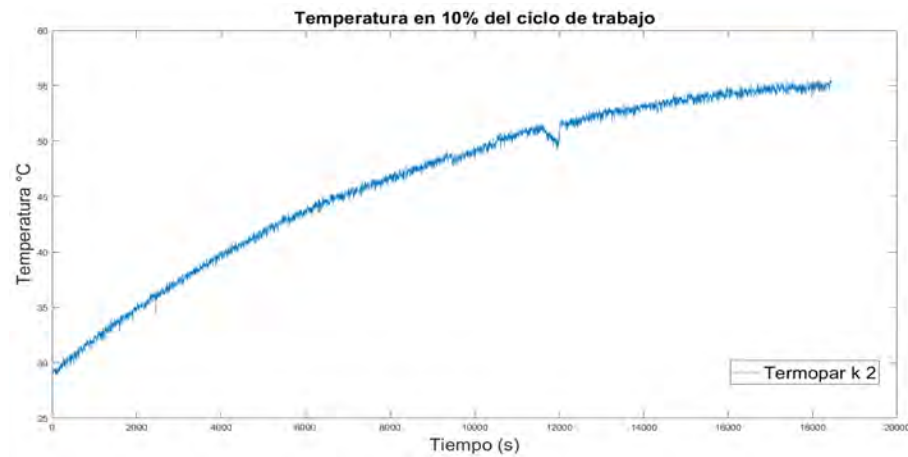


Figura 3.24: Prueba 1, modificando el ciclo de trabajo al 10 %.

Resolución de las pruebas

Al comparar las pruebas realizadas con un PWM con ciclo de trabajo $d(t)$ al 90 %, 50 % y 10 %, se puede observar que existe una diferencia significativa entre la temperatura con una señal al 10 % del ciclo de trabajo $d(t)$ y la temperatura con una señal al 50 % del ciclo de trabajo $d(t)$. Sin embargo, entre la temperatura con un PWM al 50 % del ciclo de trabajo y la temperatura con un PWM al 90 % del ciclo de trabajo, no se observa una diferencia muy marcada. Esto podría indicar una no linealidad en el sistema, y se trabajaría en un rango de 50 % a 90 %. También nos dice que nuestro sistema puede iniciar a estabilizarse en un tiempo estimado de 0.4×10^4 .

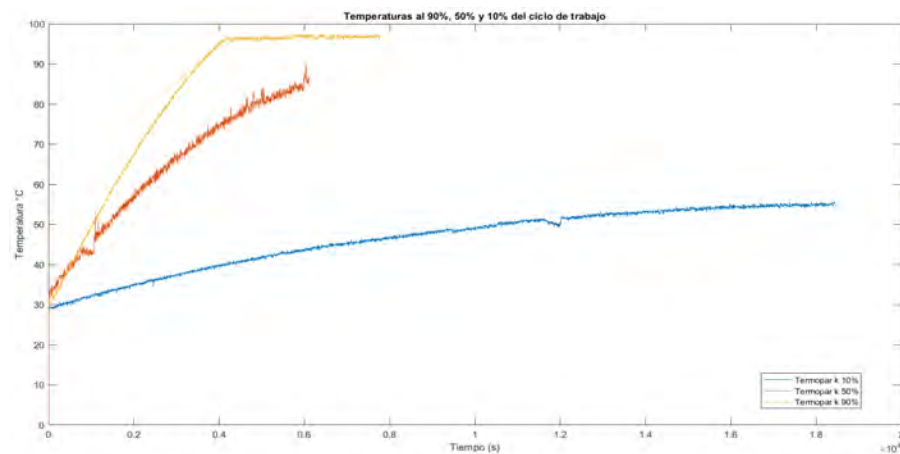


Figura 3.25: Temperaturas con PWM al 90 %, 50 % y 10 %.

3.3.3. Diseño de una excitación con fines de identificación

Una PRBS (Pseudorandom binary sequence) es una señal binaria pseudoaleatoria. Esta utiliza números binarios en una secuencia de bits que aparecen de manera aparentemente aleatoria. Tiene la ventaja de ser sencilla y controlable, Zhu et al. (2024). La señal tiene una forma cuadrada, como se muestra en la Figura 3.26.

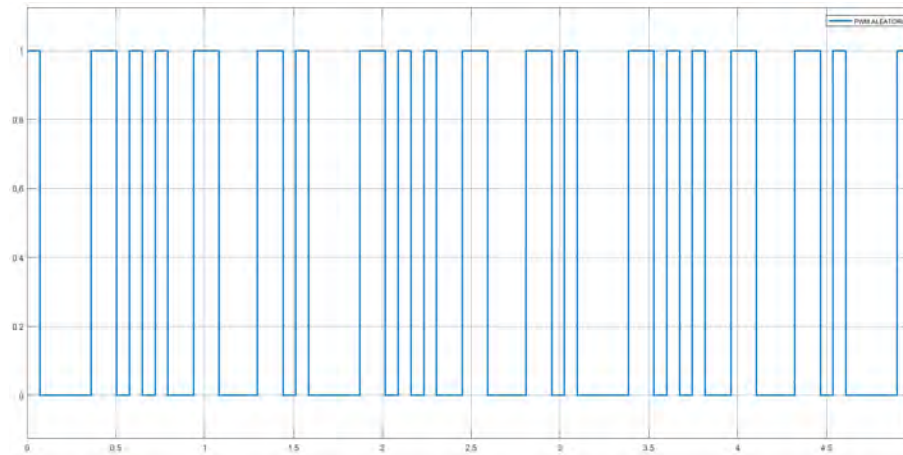


Figura 3.26: Señal PRBS.

Esta señal, con ayuda del convertidor, entra a la resistencia y es utilizada para modular la potencia. Se mide la temperatura dentro del reactor para poder realizar una identificación del sistema. Dado que se realizó una prueba de linealidad, se puede observar que es necesario modificar la amplitud de la señal PRBS en caso de que el sistema presente no linealidad. Dado que se realizaron las pruebas con la PWM modificando el ciclo de trabajo, se puede configurar la señal PRBS de tal manera que trabaje en el rango que sea necesario para tener mayor variación en el sistema. Esta información se puede observar en la conclusión de las variaciones del PWM, obteniendo como resultado una señal PRBS con amplitud y longitud variable, como se muestra en la Figura 3.27.

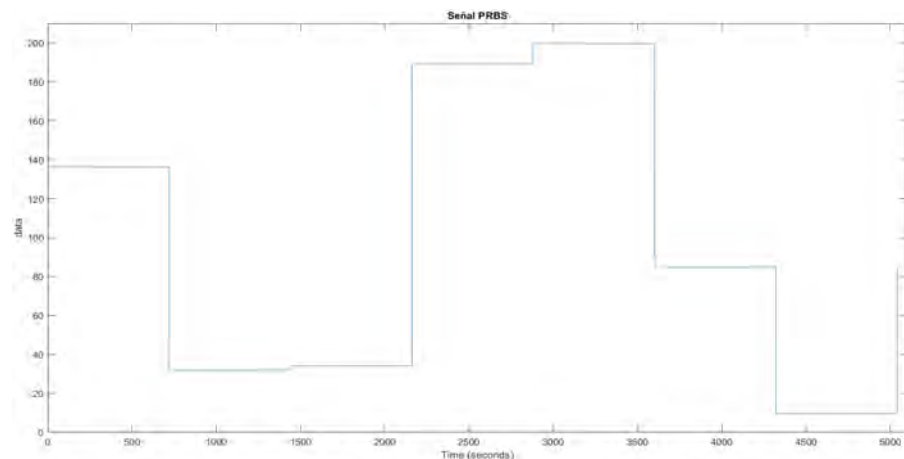


Figura 3.27: Señal PRBS con amplitud y longitud aleatoria

3.3.4. Respuesta experimental de la planta aplicando la entrada para identificación

La señal PRBS entra mediante la salida PWM del Arduino a un convertidor, pasando después a la resistencia como se muestra en el diagrama de la Figura 3.28

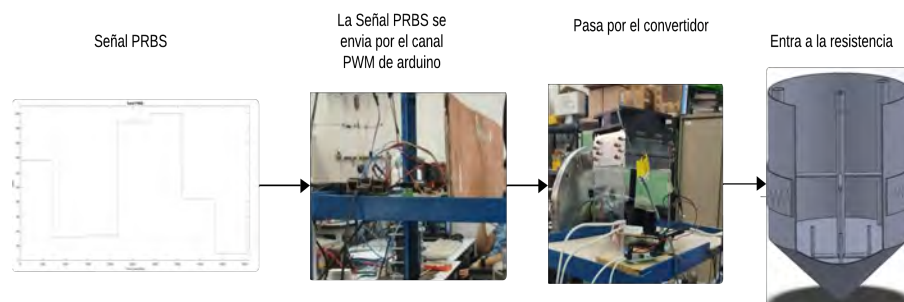


Figura 3.28: Entrada de la señal al reactor.

En el reactor, la temperatura se mide mediante los termopares tipo K. Este valor, obtenido como resultado de ingresar la señal PRBS, tiene la forma que muestra la Figura 3.29.

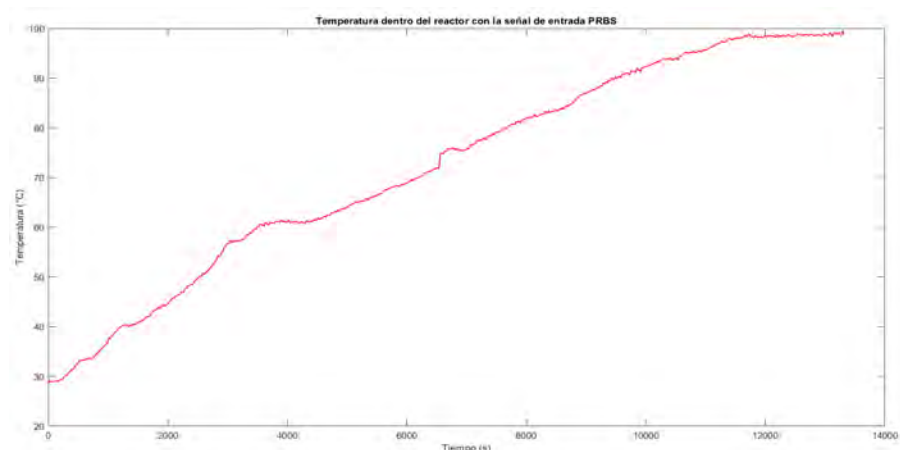


Figura 3.29: Comportamiento de la temperatura dentro del reactor con señal de entrada PRBS

Como se puede observar en la Figura 3.29, la temperatura sufre variaciones que ayudan a obtener la identificación del sistema con precisión. Para obtener la temperatura neta del sistema, es decir, la temperatura sin la influencia de la temperatura ambiente, se resta la temperatura ambiente dentro del laboratorio, menos la temperatura dentro del biorreactor.

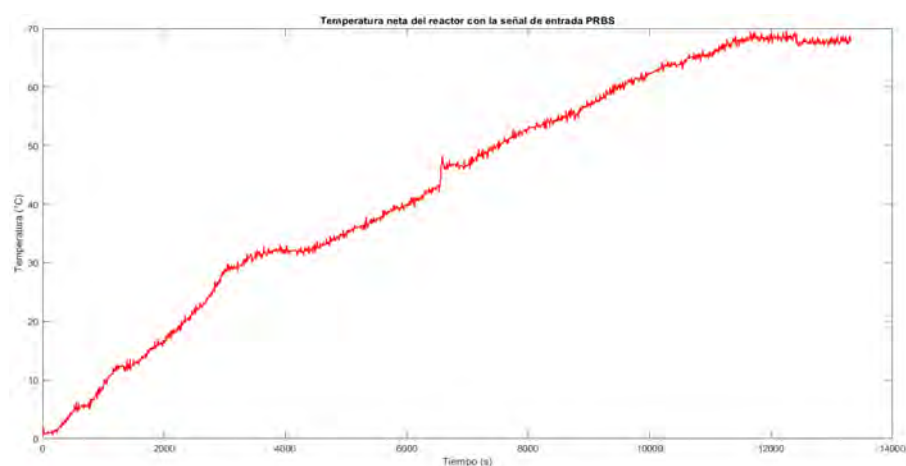


Figura 3.30: Comportamiento de la temperatura sin la temperatura ambiente dentro del laboratorio.

La gráfica de la Figura 3.30 muestra la temperatura dentro del reactor neta. Esta temperatura resta la temperatura leída, menos la temperatura ambiente.

3.3.5. Identificación de la planta

Una identificación del sistema permite obtener un modelo matemático de la planta utilizando una entrada que excite al sistema. Como salida se obtiene una señal de temperatura. Se necesita un sistema que modele el comportamiento de la temperatura de la planta, por lo que se usó la técnica de identificación OE (error de salida por sus siglas en ingles). Se obtiene el sistema discreto, pasándolo a un sistema continuo se obtuvo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.005369 s^2 + 0.003022 s + 8.207 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.3314 s^2 + 0.002728 s + 2.707 \times 10^{-7}} \quad (3.25)$$

Esta función de transferencia produce la respuesta que se muestra en la figura 3.31, se trata de un sistema de tercer orden.

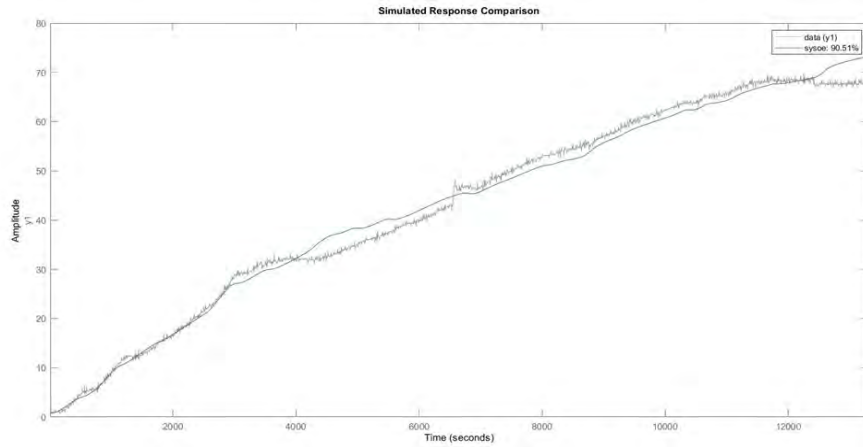


Figura 3.31: Comparación del sistema con la identificación.

Para observar el comportamiento del sistema se pueden analizar los polos y ceros del sistema en la figura 3.32.

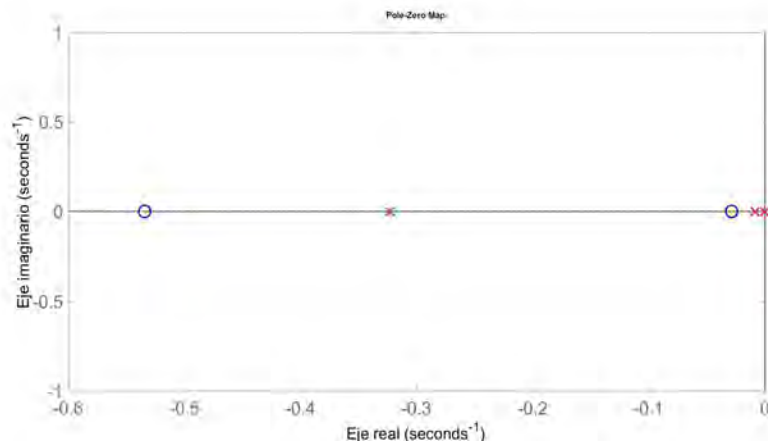


Figura 3.32: Polos y ceros del sistema

Como se puede observar, en la colocación de polos se obtiene un polo en -0.323 , otro polo en -0.00834 y por ultimo se tiene un polo en -0.0001 . Los ceros son -0.534 y -0.0286 . Esto significa que el sistema es estable, con una respuesta exponencial convergente, como se muestra en la figura 3.33

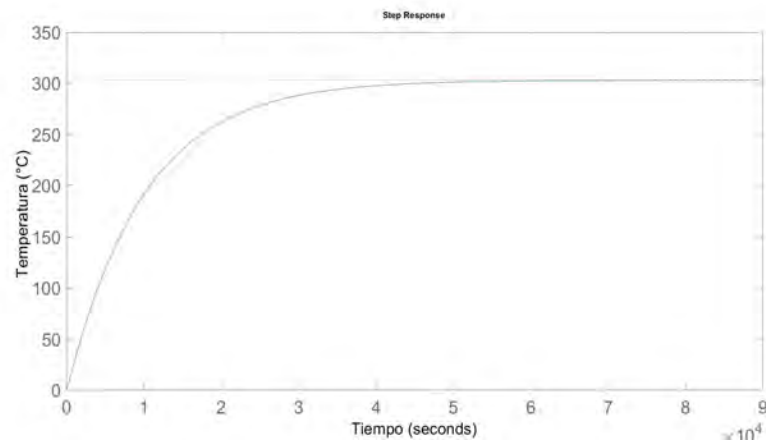


Figura 3.33: Respuesta del sistema

La respuesta sistema tiene un tiempo de establecimiento de 9×10^4 segundos, sin sobre-tiros.

3.4. Lazo de control

Después de representar el comportamiento de la temperatura dentro de la planta por medio de un modelo dinámico identificado, se diseña el control de temperatura. El lazo

se cierra retroalimentando la temperatura de salida. y comparando esta señal con la señal de referencia. Un control PID (control proporcional integral derivativo) es una técnica de control que ayuda a reducir el error de la entrada. Este controlador consta de tres partes:

1. **Proporcional (P)**: Responde proporcionalmente al error actual.
2. **Integral (I)**: Se toma como la suma de los errores pasados.
3. **Derivativo (D)**: Este reacciona a la tasa de cambio del error.

Un control PID puede ser calculado con la siguiente ecuación

$$C(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.26)$$

dónde

- K_p Es el valor la ganancia proporcional P.
- $e(t)$ Es el error en la entrada.
- K_i Es el valor para la ganancia integral I.
- k_d Es el valor de la ganancia derivativa D.
- $C(t)$ Señal de control

Con los valores correspondientes se sintonizó el controlador que permite mantener la temperatura homogénea dentro del reactor.

Para calcular el control PID se utilizó la herramienta de MATLAB que tiene por nombre PID TUNER (Transfer function Based). En la configuración de la herramienta de MATLAB se configuran los parámetros del PID, observando el comportamiento de la respuesta.

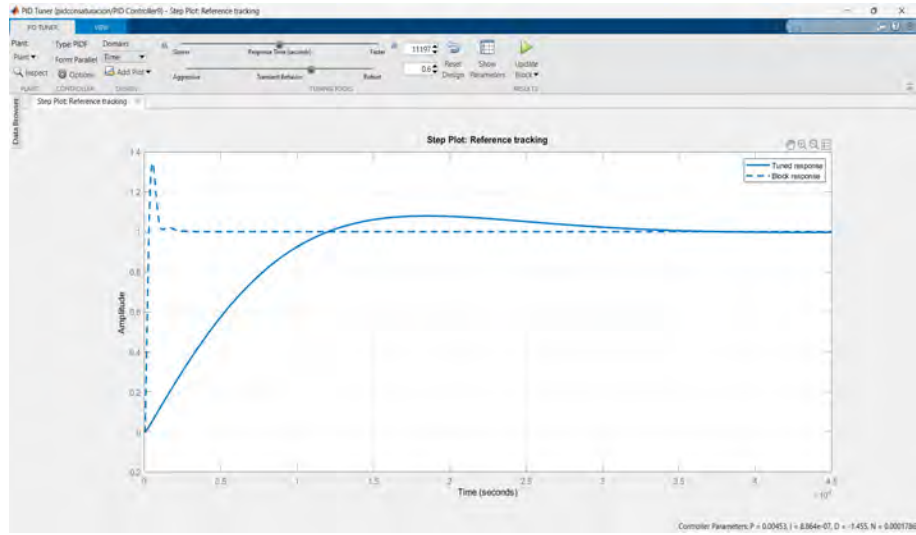


Figura 3.34: Ventana de la herramienta PID Tuner

Se obtienen como resultado los valores de cada ganancia del controlador PID:

$$P = 0.00724555643948787 \quad (3.27)$$

$$I = 9.60342545392904 \times 10^{-07} \quad (3.28)$$

$$D = 5.63241452981354 \quad (3.29)$$

Para un mejor funcionamiento en la práctica se ajustaron los valores de la controlador, estableciendo como nuevos valores lo siguientes

$$P = 0.19779 \quad (3.30)$$

$$I = 2.835 \times 10^{-04} \quad (3.31)$$

$$D = -1.72 \quad (3.32)$$

Con estos valores se observa el control en las variables en el reactor, utilizando la herramienta MATLAB como lo muestra la Figura 3.35

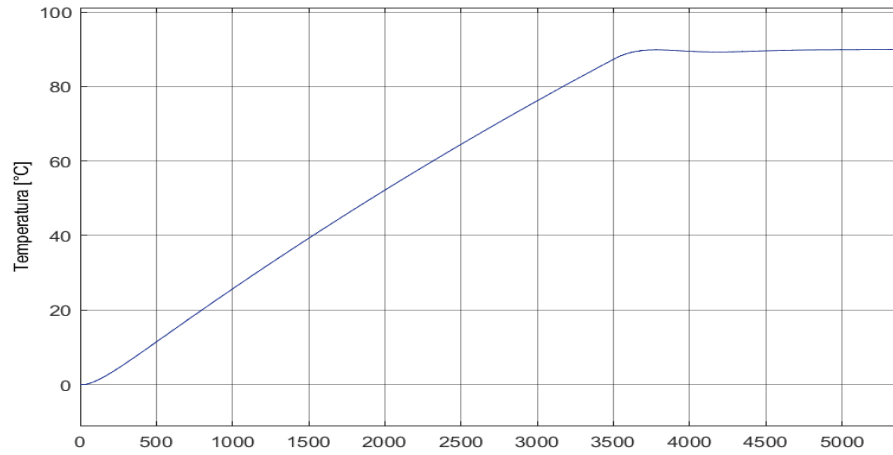


Figura 3.35: Sistema simulado con control de temperatura a 90 °C

3.5. Descripción del Sistema de control de temperatura dentro del reactor

A continuación se describe la etapa de pretratamiento mediante un diagrama que representa el control de temperatura dentro del reactor (Figura 3.36).

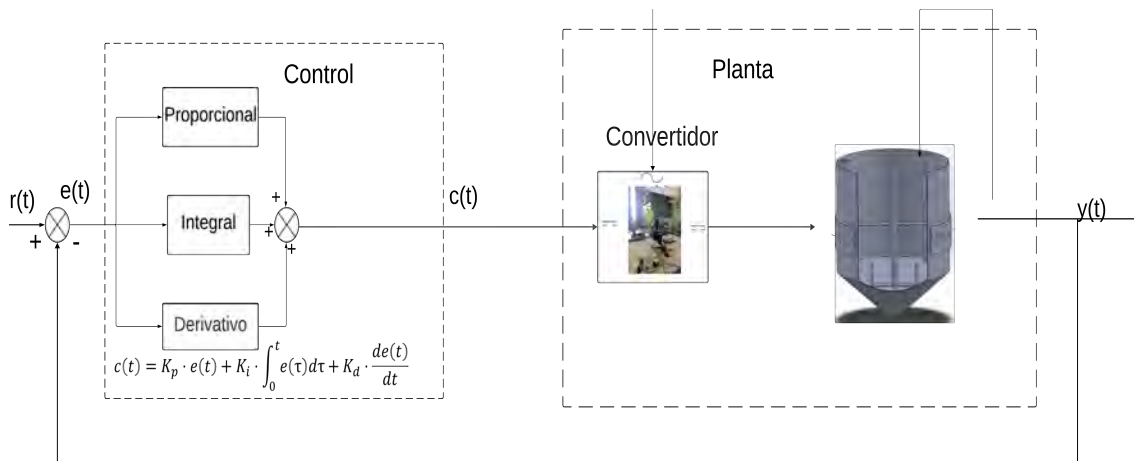


Figura 3.36: Diagrama del sistema

El diagrama del sistema muestra una señal de error que ingresa al controlador PID. El controlador ajusta la señal de control según el error detectado. Luego, a través de un convertidor, la señal convertida en voltaje entra a la planta. Esta alcanza la temperatura de referencia y es leída por sensores termopar tipo K, que convierten el voltaje en temperatura.

Esta temperatura medida se compara con la referencia para obtener la señal de error que entra al controlador.

El esquema del sistema, representado en la Figura 3.36, detalla el flujo de señales y el control que se aplicó en los experimentos de pretratamiento. A continuación, se explica el funcionamiento del sistema según los resultados obtenidos.

1. **Entrada de Referencia $r(t)$** : El proceso comienza con la entrada de referencia $r(t)$, que representa la temperatura deseada para el sistema. Esta temperatura se compara con la temperatura real del sistema $y(t)$.
2. **Cálculo del Error $e(t)$** : La discrepancia entre la referencia $r(t)$ y la salida del sistema $y(t)$ se evalúa como la señal de error $e(t)$. Este error resulta fundamental para identificar las modificaciones requeridas con el fin de lograr la temperatura deseada.
3. **Controlador PID** : El Controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) modifica la señal de control $c(t)$ en base al error detectado.
4. **Convertidor** : La señal de control $c(t)$ se convierte en una señal de voltaje $u(t)$ a través de un convertidor. Esta señal de voltaje es la que se aplica a la planta, específicamente como entrada para modificar la resistencia para mantener la referencia.
5. **Planta**: La planta consta de elementos físicos en donde se lleva a cabo el pretratamiento, así como la hidrólisis y fermentación. Aquí, la señal de voltaje $u(t)$ modifica la resistencia para alcanzar la temperatura deseada. La temperatura real del sistema $y(t)$ se mide continuamente.
6. **Sensores Termopar Tipo K**: Los sensores termopar tipo K son utilizados para medir la temperatura real de la planta, dentro del reactor. Estos sensores convierten la temperatura en una señal de voltaje, que luego se retroalimenta al sistema.
7. **Realimentación** : La temperatura medida $y(t)$ se compara nuevamente con la referencia $r(t)$ para generar una nueva señal de error $e(t)$, cerrando así el ciclo de control.

El diagrama también demuestra la importancia de la retroalimentación en sistemas de control, permitiendo correcciones continuas y mejorando la estabilidad del proceso. La integración de sensores precisos como los termopares tipo K asegura que las mediciones de temperatura sean exactas, contribuyendo a la precisión del control del sistema.

3.6. Descripción del Sistema de control de temperatura dentro del reactor

3.6.1. Pretratamiento

En la producción de bioetanol se lleva a cabo la etapa de pretratamiento, a continuación se presenta el diagrama del sistema general de la producción.

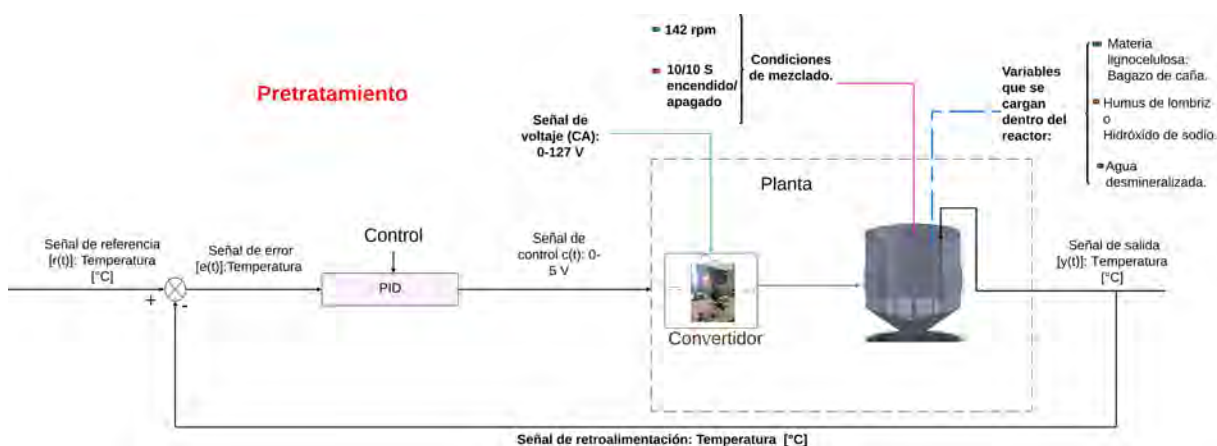


Figura 3.37: Diagrama del proceso de pretratamiento de material lignocelulósico (bagazo de caña).

El sistema general del proceso de la etapa del pretratamiento se muestra en la imagen 3.37. Donde inicia ingresando los insumos dentro de un tanque agitado de 10.38 L, con 6 litros de capacidad de trabajo, tales como el agua desmineralizada, la materia lignocelulósica (el bagazo de caña) y finalmente el humus de lombriz o hidróxido de sodio. Durante el pretratamiento se mezclan los compuestos, por lo que tenemos condiciones de mezclado, es decir, 142 rpm por parte del motor, encendiendo y apagando el motor cada 10 segundos, con el propósito de observar el comportamiento en la producción de bioetanol, y el efecto del consumo energético. También durante el proceso de pretratamiento se lee la temperatura dentro del biorreactor (o tanque agitado, llamado así por el mezclado durante el pretratamiento), esa señal de temperatura se le llama señal de salida. Esta señal se registra en una tira de datos, al mismo tiempo es una señal que se retroalimenta y compara con una señal de referencia. La diferencia de las temperaturas (señal de error) se ingresa al control PID, el control PID genera un valor que es traducido con ayuda de un arduino, manejado a un voltaje de 0 a 5 V. Si la resistencia de calentamiento del reactor necesita una potencia mayor, es necesario utilizar más voltaje, el convertidor toma energía alterna

del tomacorriente (0-127 V) y la convierte en corriente directa para posteriormente con ayuda de un mosfet potenciar la energía saliente del PID (señal de control convertida a voltaje), para finalmente entrará a la resistencia de calentamiento en el reactor. El ciclo de medición y calentamiento se lleva a cabo durante el tiempo que dure el pretratamiento.

3.6.2. Hidrólisis y fermentación

Para mostrar la etapa de hidrólisis y fermentación se presenta el sistema que describe el proceso y la obtención de los datos.

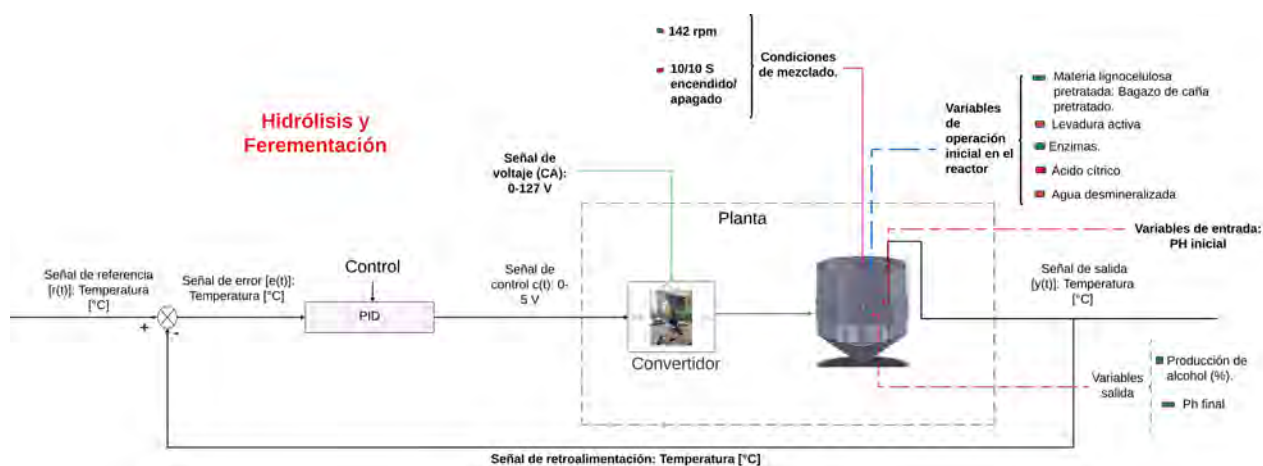


Figura 3.38: Diagrama del proceso de la etapa de hidrólisis y fermentación (bagazo de caña).

A continuación se presenta cada una de las características del sistema que muestra la etapa de hidrólisis y fermentación, así como cada una de las variables que intervienen en el proceso: La planta está conformada por un tanque agitado, un motor y un agitador que ayuda a mezclar la reacción durante el pretratamiento. El mezclado se hace con 142 rpm y el tiempo de agitación se establece considerando 10 segundos de encendido y 10 segundos de apagado. Los insumos como el bagazo de caña pretratado, la levadura activa, las enzimas, el agua desmineralizada y finalmente el ácido cítrico, se ingresan al biorreactor, antes de sellar el biorreactor se lee el pH inicial de 5.

Capítulo 4

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos define las pruebas experimentales para estudiar el efecto de las variables de operación de la etapa de pretratamiento de la biomasa para la producción de bioetanol de segunda generación utilizando biomasa lignocelulósica, específicamente bagazo de caña . En esta sección se describen los experimentos para pretratar el bagazo de caña a diferentes condiciones.

La producción de bioetanol de segunda generación involucra distintos procesos y variables. Después de los pretratamientos se acondiciona la biomasa pretratada y con esta se realiza una SSF.

Variables

En esta sección se describe el diseño experimental para evaluar el efecto de variables críticas en la etapa de pretratamiento de biomasa para la producción de bioetanol de segunda generación. Entre los múltiples factores que influyen en este proceso, este estudio se centra en tres factores principales, temperatura, tiempo de pretratamiento y tamaño de partícula de la biomasa (bagazo de caña), analizados bajo dos pretratamiento distintos.

Temperatura: Es un factor crítico en el tratamiento de microorganismos, ya que estos pueden morir si se exponen fuera de su rango térmico tolerable.

Tiempo de pretratamiento: Este factor afecta directamente la disponibilidad de azúcares fermentables y la integridad de los microorganismos, siendo este una etapa donde se rompe la barrera de la lignina.

Tamaño de partícula: Se evalúan dos tamaños de bagazo de caña con diferentes granulados, con el objetivo de observar su efecto tanto con la concentración final de bioetanol como con los costos de producción, buscando una ventaja en este último aspecto.

Para el pretratamiento alcalino se considera el análisis del tiempo de pretratamiento. Dado que necesita menos tiempo que el pretratamiento biológico, se consideró evaluar este aspecto.

Después del pretratamiento, se lleva a cabo la etapa de SSF bajo condiciones fijas para los dos pretratamientos de biomasa considerados, tomando el artículo de ? como base. Durante estas etapas, se monitoreó el pH (al inicio y al final de cada experimento), debido a su influencia directa en el rendimiento del bioetanol.

Diseño experimental del pretratamiento Biológico

El diseño de experimentos para la producción de bioetanol pretratado con humus de lombriz especifica los datos a considerar para las experimentación, los cuales se muestran la Tabla 4.1. Esta información incluye los insumos y las cantidades para cada experimentación. Uno de los factores que se menciona es el tiempo que dura la experimentación, este factor no se modifica en este pretratamiento. También se dan a conocer las condiciones de mezclado del reactivo dentro del reactor tipo Batch, que nos ayuda a mantener la temperatura constante dentro del reactor, así como mantener la mezcla homogénea durante todo el proceso.

Tabla 4.1: Condiciones de operación fijas del reactor para el pretratamiento biológico del bagazo de caña.

Cantidad de bagazo de caña	Cantidad de humus de lombriz	Volumen de la carga (l)	Tiempo del pretratamiento Carga de humus (Días)	Condiciones de agitación agitación
3% p/v	5% p/v	6	5	10 s encendido/apagado
				142 rpm

El diseño de experimentos contempla los factores que son importantes para la configuración en la producción de bioetanol 2G. Los factores en este caso son las variables que modificamos (temperatura y tamaño de bagazo de caña). Los niveles son los valores en que los factores fueron utilizados en las experimentaciones, modificando en 1, 2 o 3 niveles.

Para el pretratamiento biológico, específicamente se tomó un nivel 1 de tiempo de pretratamiento, es decir las experimentaciones se realizaron en 5 días. Para el factor A (tamaño de bagazo de caña), se plantearon dos niveles siendo estos Tamaño No Uniforme de Bagazo (TNUB) y bagazo con partículas de 1 cm. La idea es saber que impacto tiene

modificar el tamaño de partícula, en el caso del factor B, el cual es la temperatura, se plantearon 3 niveles: 45 °C, 40 °C y 30 °C. La Tabla 4.2 muestra el detalle de los 6 experimentos resultantes de la combinación de factores y niveles seleccionados para el pretratamiento biológico.

Tabla 4.2: Condiciones de operación del reactor para la producción de bioetanol 2G con pretratamiento biológico. Diseño de experimentos.

Núm de experimento	Tamaño de partícula del bagazo de caña	Temperatura °C
1	TNUB *	45
2		40
3		30
4	1 cm	45
5		40
6		30

* Tamaño no uniforme de bagazo.

En la Figura 4.2 se puede observar un diagrama que plantea a detalle los factores y niveles que se modifican en cada prueba. El factor A del tamaño de partícula y en factor B la temperatura dentro del reactor tipo Batch de para las experimentaciones, con sus respectivos niveles cada uno.

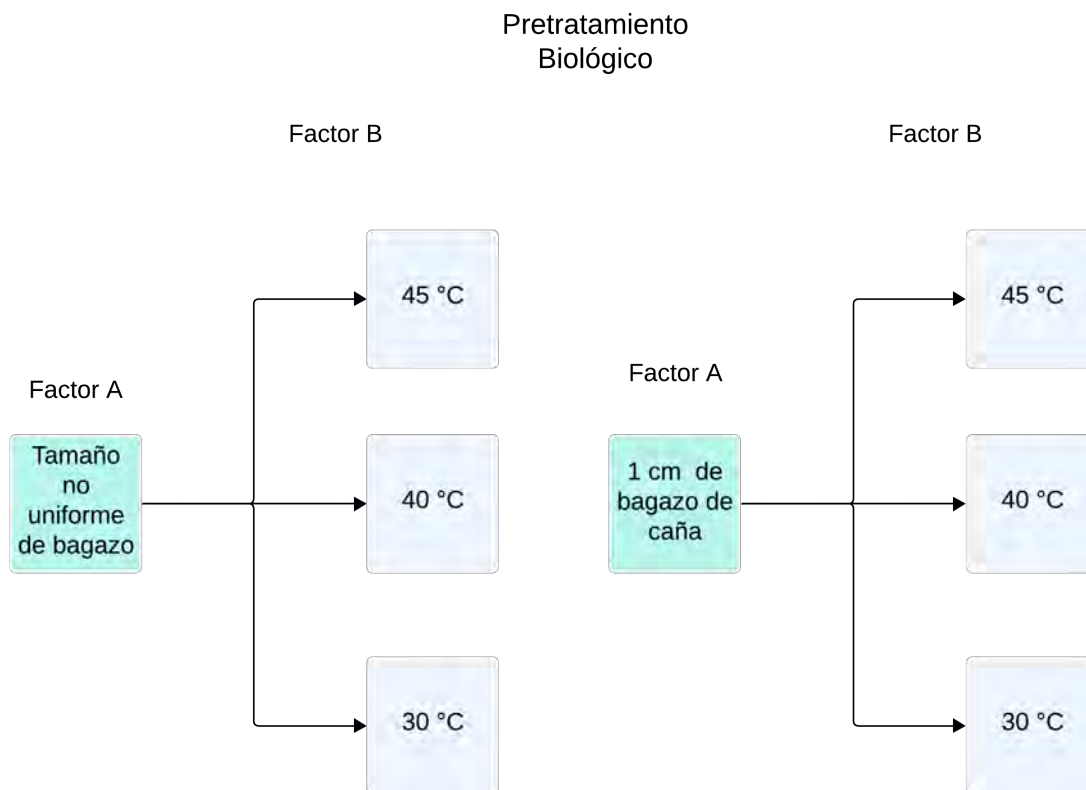


Figura 4.1: Diagrama de los factores del pretratamiento biológico.

Diseño experimental del pretratamiento Alcalino

Para el caso del pretratamiento alcalino con hidróxido de sodio las temperaturas que se trabajaron fueron 80 °C, 90 °C y 95 °C. También se modificó el tamaño de las partículas de bagazo y el tiempo de producción. En la Tabla 4.3 se mencionan las cantidades por insumo que se utilizaron para las pruebas con pretratamiento alcalino. El mezclado del reactivo es importante dado que nos ayuda a mantener la mezcla y la temperatura homogénea dentro del reactor tipo Batch, por lo que también menciona las condiciones de mezclado.

Tabla 4.3: Condiciones de operación fijas del reactor para el pretratamiento alcalino del bagazo de caña.

Cantidad de bagazo de caña (% p/v)	Cantidad de Hidróxido de sodio (% p/v)	Volumen de la carga L	Tiempo del pretratamiento (s)	Condiciones de agitación	
4	2	6	5400	10 s encendido/apagado	142 rpm
			7870		

De la misma forma, cada pretratamiento fue realizado modificando tres factores. El factor A es el tamaño de partícula, para el cual se consideraron dos niveles: TNUB y 1 cm. El factor B es la temperatura, y para este se consideraron tres niveles: 95 °C, 90 °C y 80 °C. Por último, el factor C que es el tiempo de pretratamiento, tiene dos niveles: 5400 s y 7870 s. En total se realizaron 12 experimentos para el pretratamiento alcalino, como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Condiciones de operación del reactor para la producción de bioetanol 2G con pretratamiento alcalino. Diseño de experimentos.

Núm de de experimento	Temperatura °C	Tamaño de bagazo	Tiempo (s)
1	95	TNUB*	5400
2			7870
3		1 cm	5400
4			7870
5	90	TNUB*	5400
6			7870
7		1 cm	5400
8			7870
9	80	TNUB*	5400
10			7870
11		1 cm	5400
12			7870

* Tamaño no uniforme de bagazo.

A continuación se presenta un diagrama donde se clasifica por factores cada variable

a considerar, esto solo para el caso del pretratamiento alcalino, ver Figura 4.2.

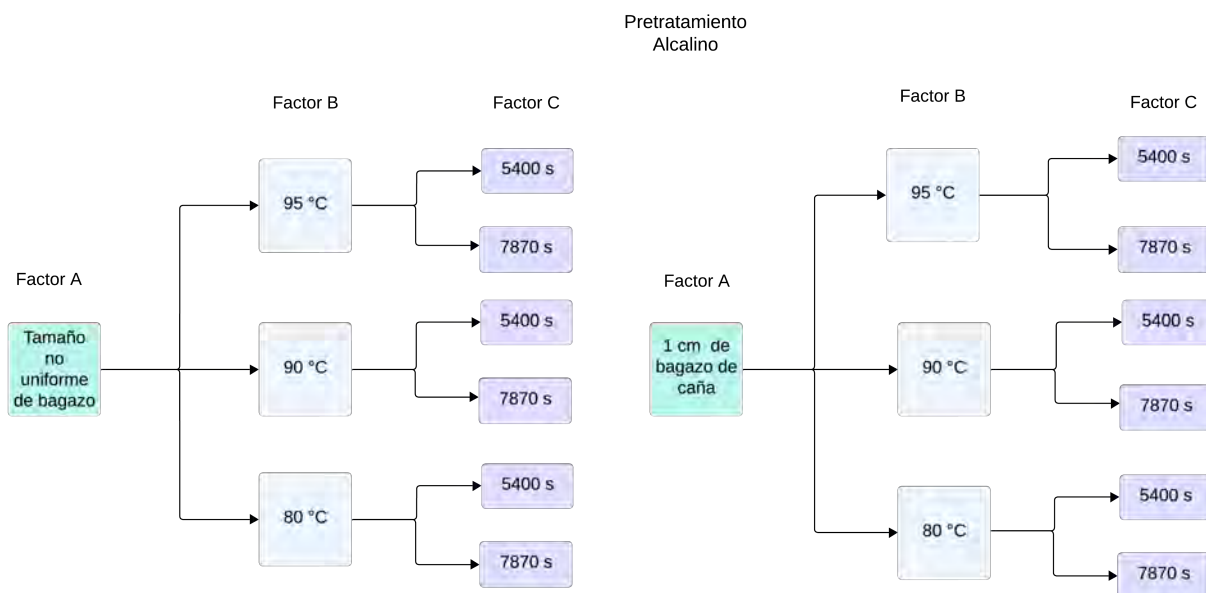


Figura 4.2: Diagrama del pretratamiento alcalino con los factores.

Diseño de experimentos para la configuración: sacarificación y fermentación simultáneas (SSF)

La producción de bioetanol fue realizada usando la configuración de hidrólisis y fermentación simultáneas. Las condiciones de operación corresponden al diseño del proceso presentado en la tesis de Arcos et al. (2022). Se debe precisar la carga de biomasa, que es la cantidad de bagazo previamente pretratado con alguno de los dos métodos considerados, la levadura necesaria para una buena fermentación, el pH de la solución dentro del reactor, la carga enzimática que es un elemento clave para llevar cabo la hidrólisis, y por último la temperatura de la SSF. En la Tabla 4.5, se muestran los valores de cada uno de los elementos a tomar en cuenta para la implementar el proceso SSF.

Tabla 4.5: Variables del proceso de SSF

Biomasa	Volumen L	Carga de biomasa (%)	Carga enzimática (UPF/g)	Inoculo de levadura (%)	pH	Temperatura °C	Tiempo h
Bagazo de caña	2	5	20	10	5	43	48

- Carga enzimática

La carga enzimática se refiere a la cantidad de enzimas que se introduce durante el proceso SSF y está dada en unidades de papel filtro por gramo de sustrato (UPF/g). UPF es una medida de laboratorio para expresar la actividad enzimática. La ecuación 4.1 permite calcular la carga enzimática en unidades de ml, en función de la cantidad de unidades de papel filtro (UPF), Arcos et al. (2022)).

$$\text{carga enzimática (ml)} = \frac{3.7}{UPF} \quad (4.1)$$

Capítulo 5

Pruebas experimentales

En esta sección se describen las pruebas experimentales, indicando en primera instancia los materiales necesarios en cada pretratamiento, y posteriormente, se mencionan los pasos que conlleva realizar cada prueba.

5.1. Pre-Pretratamiento

El pre-pretratamiento ayuda clasificar el tamaño de bagazo que se va a utilizar, así como secar el bagazo en caso de tener humedad. El material y compuestos para poder limpiar y clasificar el tamaño de bagazo

Compuestos

El pre-pretratamiento es un preprocesamiento de la biomasa para someterla posteriormente al pretratamiento del tipo seleccionado para activar la producción de azúcares fermentables. El pre-pretratamiento incluye clasificar el tamaño de bagazo por tamizado, y secarlo en caso de tener humedad. El material y compuestos para poder clasificar y limpiar el bagazo son los siguientes

Compuestos

- *Bagazo de caña*

Materiales

- | | | |
|------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| • <i>Lona</i> | • <i>Malla cuadrada 1 cm</i> | • <i>Bolsa plástica de 30×40 cm</i> |
| • <i>Báscula</i> | • <i>Cubeta con capacidad de 10 L</i> | |

Procedimiento

1. Se implementó una barrera de protección usando una lona impermeable extendida sobre el piso, evitando el contacto directo del bagazo de caña con superficies contaminantes. Sobre esta superficie aislante, se distribuyó uniformemente el bagazo de caña para facilitar el secado pasivo y la eliminación controlada de su humedad residual. El proceso se muestra en la Figura 5.1

2. La clasificación por tamaño se efectuó usando un arreglo de dos mallas metálicas de 1 cm, montadas en serie sobre un recipiente de 10 L. Mediante agitación rítmica del bagazo colocado en la malla superior (Figura 5.2), las fracciones menores a 1 cm fueron seleccionadas por gravedad hacia la cubeta, mientras que las partículas mayores se retuvieron en el tamiz.



Figura 5.1: Bagazo de caña tendido sobre una lona.



Figura 5.2: El bagazo es cernido con ayuda de la malla de 1 cm.

3. El bagazo se sometió a dos ciclos adicionales de cribado utilizando el mismo sistema de doble malla (abertura de 0.01 m), aplicando un movimiento armónico controlado en cada repetición (Figura 5.3). Este proceso iterativo permitió obtener una fracción de partículas con tamaño significativamente reducido, optimizando la homogeneidad del material resultante.

4. Para garantizar un tamaño de partícula uniforme, el bagazo de caña se sometió a un cribado adicional mediante un cedazo de malla más fina, con el objetivo de obtener un material final con una granulometría controlada de 1 cm, lo que optimiza su posterior aprovechamiento en procesos industriales. Ver Figura 5.4.



Figura 5.3: Momento donde el bagazo es clasificado.



Figura 5.4: Clasificación con colador para trozos grandes.

5. El bagazo cernido fue pesado en una báscula hasta alcanzar la masa requerida (240 g o 180 g, según el pretratamiento asignado) y posteriormente se introdujo en una bolsa de plástico, la cual fue sellada herméticamente para evitar alteraciones en su contenido de humedad durante el almacenamiento o transporte.



Figura 5.5: El bagazo cernido es colocado en la bolsa y se pesado en una bascula.

5.2. Pretratamiento Biológico

Para la ejecución del pretratamiento biológico se requirió el siguiente conjunto de materiales y reactivos estandarizados. Posteriormente se mencionan los pasos para la experimentación.

Compuestos

- *Humus de Lombriz*
- *Bagazo de caña*

Materiales

- Agua desmineralizada
- Algodón
- Bolsa plástica 20x30
- Báscula
- Cinta aislante
- Cinta de teflón

Procedimiento

1. La dosificación del bagazo fue realizada mediante pesaje con una báscula digital utilizando una bolsa plástica de 3 kg como recipiente, hasta alcanzar los 0.18 kg requeridos. Este procedimiento se aplicó únicamente cuando no se empleó la medida estándar de 1 cm de longitud de partícula, en cuyo caso se utilizó directamente el material previamente clasificado y calibrado. Ver Figura 5.6.

2. Mediante báscula digital (± 0.002 kg) y material de vidrio calibrado (vaso de precipitado de 0.5 L) se pesó exactamente 0.35 kg de humus de lombriz grado técnico, siguiendo el procedimiento ilustrado en la Figura 5.7.



Figura 5.6: Medición de masa del bagazo de caña, clasificado por tamaño de partícula (1 mm a 10 cm), previo al proceso de bioetanol.

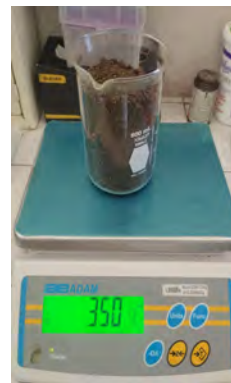


Figura 5.7: Pesaje del humus de lombriz con ayuda de una bascula.

3. Previo a su uso, el reactor se sometió a un proceso de limpieza exhaustiva (Figura 5.8), seguido de la aplicación estratégica de cinta de teflón en la zona roscada inferior para garantizar un sellado hermético. Finalmente, se procedió al ensamblaje mediante el apriete controlado del tornillo, asegurando así la integridad del sistema.

4. Se cargó el reactor con 6.0 L de agua desmineralizada, dosificados mediante un vaso de precipitado de 1 L, calibrado. Posteriormente, se incorporaron los 0.18 kg de bagazo de caña previamente pesados y contenidos en la bolsa de 3 kg, siguiendo el procedimiento ilustrado en la Figura 5.9.



Figura 5.8: Fotografía muestra el reactor tipo batch después de limpiarlo.



Figura 5.9: Carga del bagazo de caña en el reactor tipo batch.

5. Se adicionaron 300 g de humus de lombriz al reactor que ya contenía agua desmineralizada y bagazo de caña (Figura 5.10).

6. Se procedió a sellar el reactor utilizando una tapa que incorpora el motor. Se colocaron los sensores de tipo termopar K en los tubos de un centímetro de diámetro, asegurando que estuvieran correctamente posicionados. Para evitar fugas de vapor, se utilizó algodón para sellar adecuadamente los tubos. Además, se emplearon láminas de aluminio y cinta aislante o térmica para garantizar un cierre hermético tanto alrededor de la tapa como en la zona de los sensores, tal como se observa en la Figura 5.11.



Figura 5.10: Fotografía que muestra como se le agrega el humus de lombriz al reactor.



Figura 5.11: Esta fotografía muestra el reactor después de sellarlo.

7. Se procedió a conectar las Raspberry Pi y los monitores, así como las fuentes de alimentación y el sistema de respaldo (no-break). Se conectaron los contactos múltiples necesarios, se configuraron los dispositivos y se programó el control para mantener la tem-

peratura conforme al diseño experimental descrito en el apartado 4. El proceso se mantuvo durante el tiempo estipulado para el pretratamiento. El diseño del control de temperatura se reporta en el capítulo 3. La Figura 5.12 muestra el programa que implementa el control de temperatura.

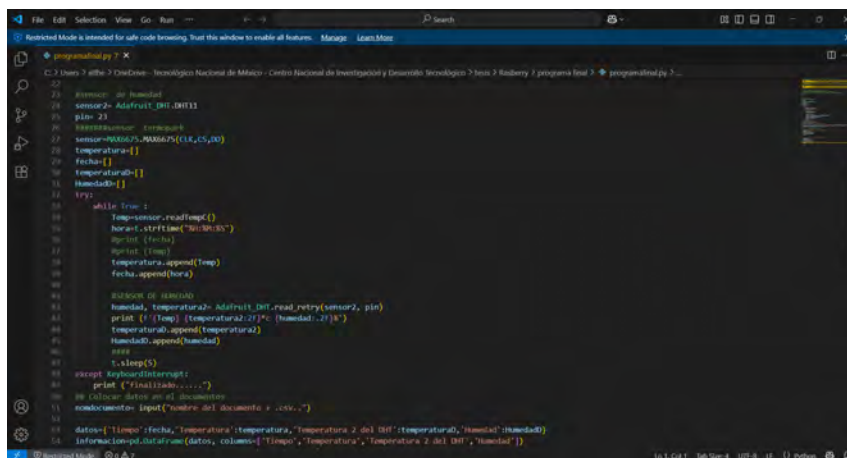


Figura 5.12: Programa del control de temperatura.

Pretratamiento Alcalino

El pretratamiento alcalino de la biomasa se implementó usando Hidróxido de Sodio. A continuación se muestran los insumos y los pasos para llevar a cabo las pruebas experimentales.

Compuestos

- *Hidróxido de sodio*
- *Bagazo de caña*

Materiales

- *Agua desmineralizada*
- *Algodón*
- *Bolsa plástica de 30×40 cm*
- *Báscula*
- *Cinta aislante*
- *Cinta de teflón*

Procedimiento

1. La cantidad de bagazo se determinó mediante pesaje con báscula digital (precisión ± 0.002 kg) usando una bolsa plástica de 30×40 cm como contenedor, hasta alcanzar 0.18 kg. Alternativamente, cuando se requirió la medida de 1 cm, se utilizó directamente el material preclasificado y calibrado, según se ilustra en la Figura 5.13.

2. Mediante una báscula digital (precisión ± 0.2 g) y vaso de precipitado de vidrio, se pesaron exactamente 0.12 kg de hidróxido de sodio en pellets, asegurando la exactitud requerida para el proceso. Ver Figura 5.14.



Figura 5.13: Bagazo de 1 cm.



Figura 5.14: El hidróxido es pesado en una bascula.

3. El reactor y su mezclador fueron enjuagados minuciosamente con agua desmineralizada para garantizar su limpieza óptima antes de ser usado, eliminando cualquier residuo que pudiera afectar el proceso.



Figura 5.15: Reactor tipo batch previamente enjuagado con agua desmineralizada.

4. Se procedió a activar los componentes eléctricos y la resistencia, verificando su correcto funcionamiento. Posteriormente, se instaló el tornillo de sellado en la base del reactor, asegurando su hermeticidad. En el interior del equipo previamente sanitizado se incorporaron el agua desmineralizada y el bagazo de caña en las proporciones establecidas, iniciando así el proceso de tratamiento.

5. Se incorporó el hidróxido de sodio (NaOH) previamente dosificado al reactor que contiene la mezcla de agua desmineralizada y bagazo de caña, como se documenta en la Figura 5.17.

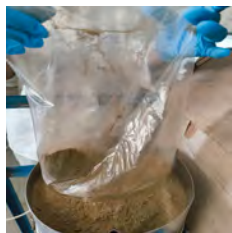


Figura 5.16: Se agrega el bagazo de caña al reactor con agua desmineralizada.



Figura 5.17: Se agrega el hidróxido y se mezcla hasta incorporarse.

6. El reactor se selló herméticamente mediante un sistema multicapa compuesto por: algodón como barrera primaria, papel aluminio para aislamiento térmico y cinta aislante/térmica como sellado secundario, garantizando el cierre completo del sistema como se detalla en la Figura 5.18.

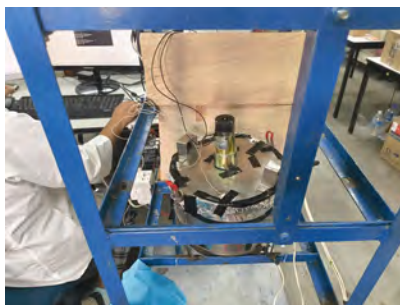


Figura 5.18: El reactor se sella con ayuda de algodón, papel aluminio y cinta de aislar o cinta térmica.

7. Finalmente, se activó el sistema de control automatizado (Figura 5.19), para seguir los perfiles programados de temperatura para el interior del reactor y el tiempo de pretratamiento establecidos en el diseño experimental (Figura 3.12). Este control garantizó las condiciones requeridas para el proceso.

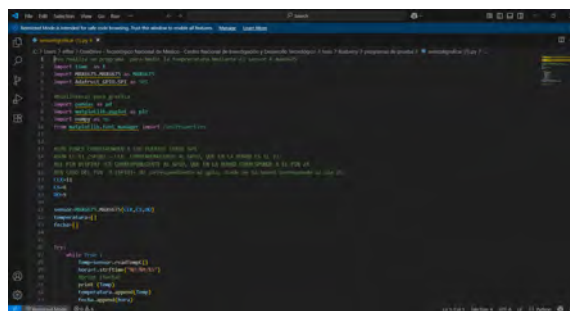


Figura 5.19: Programa para el control de temperatura en python.

8. El diseño del control de temperatura para llevar a cabo este pretratamiento de la biomasa está reportado en el capítulo 3.

Acondicionamiento para el material pretratado

Materiales

- *Agua desmineralizada*
- *Bagazo de caña Pretratado*
- *Tela delgada*
- *Colador*
- *Cubeta 10 L*

Procedimiento

1. Durante el pretratamiento biológico se registraron periódicamente los datos experimentales para garantizar su trazabilidad, y al finalizar el proceso, se almacenó toda la información recopilada. Adicionalmente, se registró el consumo energético mediante la lectura del watímetro (Figura 5.20), el cual cuantificó la energía utilizada en kilovatios-hora (kWh) a lo largo del tratamiento.

2. Bajo condiciones controladas, se desarmó el sistema, retirando primero los elementos de sellado (aluminio/algodón), luego los componentes electrónicos (sensores termopares tipo K) y finalmente el conjunto tapa-mezclador, dejando la configuración documentada en la Figura 5.21.



Figura 5.20: Se observa el watímetro que se encuentra en la estructura y mide la energía que entra al convertidor.



Figura 5.21: Bagazo pretratado biológicamente en el biorreactor.

3. Para la separación sólido-líquido se implementó un sistema de filtración compuesto por una cubeta de 10 L que integraba una manta filtrante y un colador (Figura 5.22). En este dispositivo se colocó el bagazo pretratado, permitiendo la retención de la biomasa y el paso del líquido resultante, tal como se documenta en la Figura 5.23.



Figura 5.22: Cubeta con colador y manta para colar el bagazo pretratado.



Figura 5.23: Bagazo previamente pretratado.

4. El bagazo pretratado se mantuvo en la cubeta hasta completar el filtrado del agua residual, tras lo cual se sometió a un proceso de lavado con agua adicional para eliminar el máximo posible de humus de lombriz o el hidróxido de sodio respectivamente. Posteriormente, el material se exprimió manualmente para extraer el exceso de líquido y se dejó escurrir, siguiendo el procedimiento ilustrado en la Figura 5.24.

5. Para eliminar la humedad residual, el bagazo se extendió uniformemente en una bandeja y se introdujo en un horno, donde se secó bajo condiciones controladas hasta alcanzar el contenido de humedad deseado, optimizando así el tiempo de proceso como se muestra en la Figura 5.25.



Figura 5.24: En la fotografía muestra como se retira el exceso de agua exprimiendo.



Figura 5.25: El bagazo es secado en un horno.

6. Tras el secado inicial, el bagazo se colocó nuevamente en el colador para someterlo a un segundo enjuague con agua desmineralizada, asegurando la eliminación de residuos solubles (humus de lombriz o hidróxido de sodio), proceso que se documenta en la Figura 5.26.

7. Tras el escurrido manual, el material se sometió a secado pasivo en condiciones ambientales ($25 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad relativa menor a 60 %) hasta obtener peso constante, verificando la eliminación completa de humedad según se especifica en la Figura 5.27.



Figura 5.26: En la fotografía muestra el bagazo después de filtrar el agua.



Figura 5.27: El bagazo se coloca en un plástico para retirar el agua y la humedad.

8. Una vez completado el secado, el bagazo se almacenó en bolsas herméticas para prevenir la absorción de humedad ambiental, garantizando así las condiciones óptimas para su uso en los posteriores procesos de la SSF, tal como se muestra en la Figura 5.27. Posteriormente el reactor tipo batch fue lavado con agua desmineralizada.

9. En el capítulo 3 se reporta el diseño del control de temperatura para este pretratamiento.

Hidrólisis y fermentación en etapas simultáneas

Para la SSF se consideraron los datos del apartado del diseño factorial, a continuación se presenta la lista de materiales y el procedimiento para la producción de bietanol 2G.

Compuestos

- *Agua desmineralizada*
- *Enzimas Cellic Ctec 2*
- *Levadura activa*
- *Ácido Cítrico*
- *Bagazo de caña Pretratado*

Materiales

- *Cinta de teflón*
- *Algodón*
- *Papel aluminio*
- *Cinta térmica*
- *Vaso de precipitado*

Procedimiento

1. El reactor tipo batch, previamente lavado, fue desinfectado con agua desmineralizada y se procedió a sellar herméticamente su base para garantizar condiciones estériles antes de iniciar el proceso, evitando así cualquier contaminación externa que pueda afectar la reacción.

2. Cada reactivo (ácido cítrico, levadura activa) se pesó individualmente usando una báscula digital calibrada y un vaso de precipitado estéril, mientras que el agua se midió volumétricamente, ajustando las cantidades según los parámetros establecidos en el diseño de experimentos para garantizar la reproducibilidad del proceso y la trazabilidad de los datos. Ver Figura 5.29.



Figura 5.28: Agua desmineralizada que ayudará a limpiar el reactor.



Figura 5.29: Levadura y ácido cítrico.

3. En el interior del reactor tipo batch se depositaron el agua desmineralizada y el bagazo de caña previamente pretratado, siguiendo las proporciones establecidas en el protocolo

experimental (como se ilustra en la Figura 5.30), asegurando una distribución homogénea de los componentes que garantizara las condiciones requeridas para la reacción.

4. Al reactor tipo batch conteniendo el bagazo de caña pretratado y el agua desmineralizada se le adicionó la levadura activa previamente pesada (ver Figura 5.31), la cual se mezcló homogéneamente hasta lograr su completa incorporación al medio de reacción.



Figura 5.30: Reactor con bagazo previamente pretratado.



Figura 5.31: La levadura se agrega al reactor.

5. Con ayuda de una micropipeta calibrada se midieron los mililitros exactos de la enzima Cellic CTec2 según el diseño de experimentos, la cual se añadió al sistema y se mezcló meticulosamente hasta su completa integración (Figura 5.32), asegurando la actividad enzimática óptima

6. El pH de la mezcla se midió utilizando un medidor de pH Hanna Instruments previamente calibrado, introduciendo el electrodo en la solución y agitando suavemente para obtener una lectura estable; dependiendo del resultado, se añadió gradualmente ácido cítrico en cantidades pesadas con precisión, monitoreando el cambio en el pH después de cada adición hasta alcanzar el valor deseado según los parámetros establecidos en el diseño experimental, ver figura 5.33.



Figura 5.32: Se agrega la enzima al reactor con ayuda de la micropipeta.



Figura 5.33: Se mide el pH de la mezcla con ayuda del medidor hanna instruments.

7. El reactor tipo batch se selló herméticamente utilizando algodón y papel aluminio (ver Figura 5.34), y se instaló una trampa de aire compuesta por una manguera insertada

en uno de los orificios de la tapa del reactor. Para garantizar un cierre seguro y evitar fugas, se reforzó la conexión entre la manguera y la tapa con cinta adhesiva. El extremo libre de la manguera se sumergió en una cubeta con agua, permitiendo la liberación controlada del dióxido de carbono generado durante la reacción, al mismo tiempo que impidió la entrada de oxígeno al sistema. Este diseño asegura un ambiente anaeróbico adecuado para el proceso.

8. Se inició el sistema de control para la SSF, ajustando los parámetros de tiempo y temperatura según las condiciones predefinidas en el diseño experimental (ver apartado 4), garantizando así las condiciones adecuadas para el proceso. Ver Figura 5.35 para observar la estructura y conexiones.



Figura 5.34: El algodón es colocado entre la tapa para tratar de que el reactor sea lo mas hermético posible.



Figura 5.35: Puesta en marcha del control en la etapa de SSF en un reactor tipo batch.

9. Finalizado el proceso de SSF, se determina el pH final del producto (Figura 5.36) y se transfiere a recipientes herméticos, los cuales se almacenan a temperaturas inferiores a 30 °C para preservar las muestras hasta la cuantificación del contenido alcohólico con ayuda de un refractómetro manual. Finalmente el reactor tipo batch es lavado con agua desmineralizada.



Figura 5.36: Medición del pH de la mezcla después de la SSF.

10. El diseño del control del proceso SSF se reporta en el capítulo 3.

Capítulo 6

Resultados experimentales del proceso de producción de bioetanol 2G con pretratamiento Alcalino y Biológico

En esta Sección se reportan los resultados de los experimentos implementados en un reactor tipo batch de laboratorio con capacidad de 6 L para producir bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña. Se compara el desempeño de dos alternativas de producción: un pretratamiento biológico seguido de un proceso SSF, y un pretratamiento alcalino seguido de un proceso SSF. La misma configuración de producción conduce a diferentes desempeños del proceso, distinguiendo los pretratamientos. Los resultados se presentan en términos de la calidad del producto, el consumo energético y los costos de producción. Los desempeños presentados corresponden al producto y condiciones de operación de los experimentos diseñados en el apartado

Pretratamiento Biológico

Los pretratamientos biológicos realizados sobre bagazo de caña de azúcar (Tabla 6.1) comprendieron tres pruebas con granulometría de TNUB (1 mm - 10 cm) y tres pruebas con granulometría de 1 cm, bajo temperaturas controladas (30 °C, 40 °C y 45 °C), registrándose el consumo energético (kWh) en cada caso. Este diseño experimental permitió evaluar comparativamente las diferencias en los costos asociados al consumo energético derivado principalmente el calentamiento del bioreactor a la temperatura de diseño para el procesamiento de la biomasa, específicamente se considera el consumo de la resistencia de calentamiento y del convertidor para implementar el control de temperatura durante

toda la etapa de pretratamiento.

Tabla 6.1: Pruebas experimentales con pretratamiento biológico.

Núm de de experimento	Temperatura °C	Tamaño de bagazo	Consumo energético (kWh)
1	45	TNUB	4.55
2		1 cm	3.81
3	40	TNUB	2.77
4		1 cm	2.81
5	30	TNUB	4.55
6		1 cm	1.11

El tiempo de pretratamiento para las pruebas anteriores fue 5 días.

Pretratamiento Alcalino

Inicialmente se definió un tiempo para el pretratamiento alcalino según lo recomendado por Arcos et al. (2022), quien consideró condiciones reportadas en la literatura. En la práctica, ya que el proceso se llevó a cabo en la presente tesis usando un reactor más grande que el empleado en el trabajo de referencia, el control de temperatura se volvió crítico. El control de temperatura que fue implementado tiene un tiempo de establecimiento relativamente grande, durante el cual la temperatura no se encuentra todavía en la referencia. Un supuesto fue que un tiempo de pretratamiento más largo permitiría operar por más tiempo el reactor con la temperatura controlada, y que esta etapa podría resultar más efectiva. En concreto, como segunda condición se definió un tiempo de pretratamiento de 7870, manejando partículas de bagazo de caña de 1 mm hasta 10 cm. Los tamaños considerados fueron iguales al caso previo con pretratamiento biológico, se manejaron tamaños no uniformes de bagazo (TNUB) y partículas de 1 cm. En la Tabla 6.2 se muestran las condiciones de los 12 experimentos diseñados, indicando la energía consumida en cada una de las pruebas, expresada en unidades de kWh, la cual fue leída de un watímetro. Esta energía también corresponde al consumo debido al calentamiento del reactor, sumando específicamente el consumo de la resistencia de calentamiento y del convertidor del control durante el pretratamiento.

Tabla 6.2: Pruebas experimentales con pretratamiento alcalino.

Núm de de experimento	Temperatura °C	Tamaño de bagazo	Tiempo (s)	Consumo energético (kWh)
1	95	TNUB	5400	0.66
2			7870	0.81
3		1 cm	5400	0.74
4			7870	0.86
5	90	TNUB	5400	0.71
6			7870	0.7
7		1 cm	5400	0.74
8			7870	0.6
9	80	TNUB	5400	0.67
10			7870	0.63
11		1 cm	5400	0.78
12			7870	0.8

6.0.1. Resultados experimentales del proceso de producción de bioetanol en la etapa de hidrólisis y fermentación utilizando diferentes tipos de pretratamiento

A continuación se presentan los resultados de las pruebas experimentales de la etapa SSF. Los datos reportados son la cantidad de alcohol obtenida, así como el consumo energético para las dos etapas del proceso .

Hidrólisis y fermentación para pretratamiento Biológico

Cada pretratamiento realizado fue seguido de una hidrólisis y fermentación simultáneas. En la Tabla 6.3 se presentan las condiciones de las 6 pruebas con pretratamiento biológico de la biomasa. De las pruebas se registró la energía consumida por etapa, dada en kWh, y el contenido de ethanol en el producto.

Tabla 6.3: SSF con pretratamiento biológico.

Núm de exp.	Temperatura °C	Tamaño de bagazo	Consumo energético pretrata (kWh)	Consumo energético SSF (kWh)	Producción de alcohol (%)
1	45	TNUB	4.55	2.8	11.5
2		1 cm	3.81	2.7	14
3	40	TNUB	2.77	2.56	11
4		1 cm	2.81	1.74	11
5	30	TNUB	4.55	2.7	11
6		1 cm	1.11	3.01	11

Hidrólisis y fermentación para pretratamiento Alcalino

Para las pruebas de SSF con bagazo pretratado con hidróxido de sodio, se utilizó lo reportado en el diseño de experimentos en el apartado 4, la Tabla 6.4 muestra las pruebas con bagazo de 1 mm hasta 10 cm y 1 cm como tamaño de partícula. De las pruebas podemos observar que el cambio de temperatura del pretratamiento si influye en el resultado de la producción de bioetanol.

Tabla 6.4: SSF con pretratamiento alcalino.

Núm de exp	Temperatura °C	Tamaño bagazo bagazo	Tiempo (s)	Consumo de pretra. (kWh)	Consumo de SSF (kWh)	Producción de alcohol (%)
1	95	TNUB	5400	0.66	1.95	13
2			7870	0.81	2.74	13
3		1 cm	5400	0.74	1.41	10
4			7870	0.86	2.78	17
5	90	TNUB	5400	0.71	1.87	12
6			7870	0.7	1.88	13
7		1 cm	5400	0.74	2.63	13
8			7870	0.6	2.88	11
9	80	TNUB	5400	0.67	1.84	13
10		1 cm	7870	0.8	2.58	13

Como podemos observar en la Tabla 6.4 se realizaron 10 pruebas de las 12 planeadas

debido a un problema con los insumos y el biorreactor, sin embargo podemos concluir que un tiempo de 7870 mejora la producción de bioetanol.

6.0.2. Costos en la producción de bioetanol

Para conocer cuánto nos cuesta realizar las pruebas de producción de bioetanol aplicando pretratamientos biológicos y alcalinos, se realizaron un análisis de costos y una comparación de los mismos. El costo del consumo energético (kWh) se calculó a partir de la tarifa industrial de \$1.348 MXN/kWh o \$ 0.06 USD/kWh, establecida por la Comisión Federal de Electricidad, por sus siglas, CFE (de Electricidad, 2023), en media tensión en Cuernavaca, Morelos. Se consideró como referencia el mes de abril de 2025. Este precio se aplicó a todas las etapas del proceso, desde los pretratamientos hasta la hidrólisis y fermentación. Los costos están expresados en dólares estadounidenses (USD), con una tasa de cambio de 1 USD = 20.84 MXN, vigente al 8 de abril de 2025.

Costos en la producción de bioetanol solo para pretratamiento biológico

Para la producción de bioetanol utilizando un pretratamiento biológico, fue necesario considerar los costos asociados, que abarcan tanto la adquisición de materiales como el consumo energético requerido. Los resultados demuestran que la inversión total requerida para los materiales necesarios en el proceso de pretratamiento biológico, asciende a \$5.74 USD. Los detalles se dan en la Tabla 6.5. Los costos extras se refiere a costos como el envío, que también interfieren en el costo final.

Tabla 6.5: Costos detallados de materiales por prueba para el pretratamiento biológico.

Material	Costo	Cantidad por pretratamiento	Costo extra (USD)	Costo total (USD)
Humus de lombriz	0.299 USD/kg	0.3 kg	0.079	0.16
Bagazo de caña	0.95 USD/kg	0.18 kg	0.01	0.19
Agua desmineralizada	0.68 USD/L	6 L	1.29	5.38

Al realizarse las pruebas experimentales en el reactor tipo batch se registró el consumo energético, a continuación en la Tabla 6.6 se presenta el costo que representa ese consumo energético.

Tabla 6.6: Energía consumida para pretratamiento biológico y su costo en (\$ USD).

Núm de	Temperatura del pretratamiento °C	Tamaño de bagazo	Consumo energético (kWh)	Costos (\$ USD)
1	45	TNUB	4.55	0.294
2		1cm	3.81	0.246
3	40	TNUB	2.77	0.179
4		1cm	2.81	0.181
5	30	TNUB	0.75	0.048
6		1cm	1.11	0.071

De los resultados obtenidos se desprende que el consumo energético promedio requerido para el pretratamiento biológico asciende a 2.43 kWh, lo que representa un costo promedio de \$0.157 USD (Cero punto ciento cincuenta y siete dólares) por prueba experimental.

Costos en la producción de bioetanol con pretratamiento Alcalino

Para la producción de bioethanol aplicando el pretratamiento alcalino se utilizaron los insumos que se muestran en la continuación en la Tabla 6.7, cuyos costos unitarios (por kilogramo o litro, según el caso) se especifican en la misma Tabla.

Tabla 6.7: Costos para la producción de bioetanol con pretratamiento alcalino.

Material	Costo	Cantidad por pretratamiento	Costo extra (USD)	Costo total (USD)
Hidróxido de sodio	37.9 USD/kg	0.12 kg	0.51	5.06718
Bagazo de caña	0.95 USD/kg	0.24 kg	0.023	0.25336
Agua desmineralizada	0.68 USD/L	6 L	1.29	5.38

De acuerdo con los datos obtenidos, se determinó el costo asociado a los materiales utilizados en cada prueba experimental. Los resultados se presentan en la columna 4 de la Tabla 6.7. Adicionalmente, se consideró el costo de envío de cada insumo, el cual fue puesto en función de la cantidad empleada específicamente en el pretratamiento. Este valor se adicionó al costo del material utilizado por prueba. El resultado se refiere a los costos de producción, tomando en cuenta los insumos, descritos.

El análisis económico revela que, al sumar los costos de consumo y envío de todos los materiales, se obtiene un costo total por prueba de \$10.7 USD. Es importante señalar

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

que este cálculo no incluye los gastos asociados al consumo energético requerido para la producción de bioetanol de segunda generación. Este desglose financiero permite una evaluación precisa de los recursos invertidos en la etapa de pretratamiento alcalino.

La Tabla 6.8 documenta el consumo energético promedio de 0.744 kWh (equivalente a \$0.048 USD por prueba) en pretratamientos alcalinos con bagazo de 1 cm.

Tabla 6.8: Energía consumida para pretratamiento alcalino para bagazo de caña y su costo en \$ USD.

Núm de exp	Temperatura pretratamiento °C	Tamaño de bagazo	Tiempo (s)	Energía consumida Pretrata (kWh)	Costos (\$ USD)
1	95	TNUB	5400	0.66	0.88968
2			7870	0.81	1.09188
3		1 cm	5400	0.74	0.04786
4			7870	0.86	0.055
5	90	TNUB	5400	0.66	0.88968
6			7870	0.7	0.9436
7		1 cm	5400	0.6	0.0388
8			7870	0.74	0.047865
9	80	TNUB	5400	0.67	0.90316
10		1 cm	7870	0.78	0.05045

La Tabla 6.8 integra el consumo energético (kWh) y su costo equivalente en pesos mexicanos para el pretratamiento de bagazo de caña con granulometrías entre 1 mm y 10 cm. El consumo promedio para pretratamiento utilizando bagazo de 1 mm hasta 10 cm de bagazo, según las pruebas realizadas que se muestran es de 0.67 kWh, y el costo promedio por prueba es de \$0.045 MXN.

Costos en la producción de bioetanol en la etapa de hidrólisis y fermentación

Los costos asociados a la producción de bioetanol de segunda generación se reportan en la Tabla 6.9. Se consideraron los insumos necesarios para la SSF, desde el costo por prueba hasta el costo del envío. Tomando en cuenta los materiales mencionados, el costo total por prueba es de \$13.53 USD.

Tabla 6.9: Costos de material para SSF.

Material	Costo por consumo (\$ USD)	Cantidad por pretratamiento	Costos total (\$USD)
Saccharomyces cerevisiae	4798.4 USD/kg	0.001 85 L	9
Ácido cítrico	4.27 USD/kg	0.005 kg	0.04
Levadura activa	14.39 USD/kg	0.160 kg	2.4
Agua desmineralizada	0.68 USD/L	2 L	1.6

Consumo energético en hidrólisis y fermentación con bagazo de caña pretratado Biológicamente

Los costos asociados a la producción de bioetanol por SSF utilizando bagazo pretratado con humus de lombriz se estimaron tomando lecturas del consumo energético. En la Tabla 6.10 se presentan estos datos con el costo en \$ USD.

Tabla 6.10: El costo de la energía consumida para la etapa de SSF con bagazo pretratado mediante un proceso biológico.

Núm de experimento	Temperatura del pretratamiento °C	Tamaño de bagazo	Energía consumida (kWh)	Costos total (\$ USD)
1	45	TNUB	2.8	0.18
2		1 cm	2.7	0.17
3	40	TNUB	2.56	0.16
4		1 cm	1.74	0.11
5	30	TNUB	2.7	0.17
6		1 cm	3.01	0.19

Consumo energético en hidrólisis y fermentación en pretratamiento Alcalino

Clasificando las pruebas experimentales en pretratamientos realizados anteriormente, se puede observar el consumo energético y su costo en la etapa de SSF utilizando pretratamiento alcalino, obteniendo un consumo promedio de las 10 pruebas.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETA

Tabla 6.11: El costo de la energía consumida para la etapa de SSF con bagazo pretratada mediante un proceso alcalino.

Núm	Temperatura del pretratamiento °C	Tamaño de bagazo	Tiempo (s)	Energía consumida (kWh)	Costos (\$ USD)
1	95	TNUB	5400	1.95	0.12
2			7870	2.74	0.17
3		1 cm	5400	1.41	0.09
4			7870	2.78	0.17
5	90	TNUB	5400	1.87	0.12
6			7870	1.88	0.121
7		1 cm	5400	2.63	0.17
8			7870	2.88	0.18
9	80	TNUB	5400	1.84	0.11
10		1 cm	7870	2.58	0.16

Capítulo 7

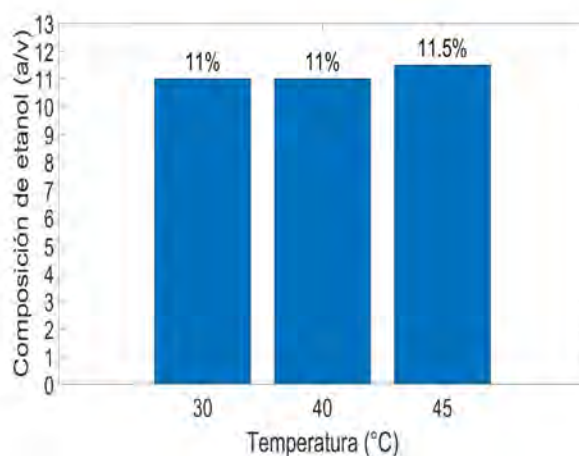
Comparativa de los resultados experimentales

Para obtener un panorama general sobre los resultados del trabajo experimental, en la Tabla 7.1 se muestra el promedio de los datos de precios, gasto energético y la producción de bioetanol 2G para cada pretratamiento. La comparación de esta información ayuda a determinar cuál pretratamiento puede ser más conveniente en función de la relación entre producción y costos.

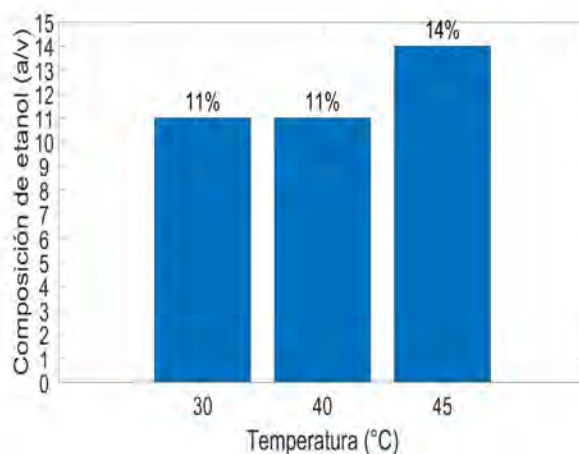
Tabla 7.1: Comparativa del gasto energético.

Prueba	Total de costo por pretratamiento (\$ USD)	Gasto energético promedio (\$ USD)	Gasto total (\$ USD)	Producción de alcohol obtenido (%)
Pretratamiento biológico, SSF Y acondicionamiento	19.58	0.33	20.13	11.15
Pretratamiento alcalino, SSF Y acondicionamiento	24.49	0.18	25.09	12.8

A continuación, se muestra la producción de alcohol obtenida para el proceso con pretratamiento biológico. En la primera gráfica se observa un cambio significativo en la producción al variar la temperatura, lo que indica una clara influencia de este parámetro. Por otro lado, en la segunda gráfica no se detectan variaciones en la producción, a pesar de que la temperatura haya sido modificada, lo que sugiere que, bajo esas condiciones, tiene menor influencia en el rendimiento del proceso.



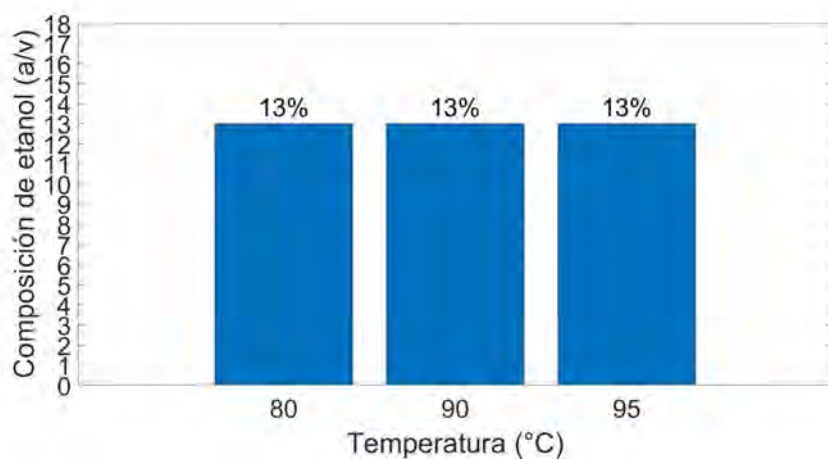
(a) Producción de bioetanol con pretratamiento biológico con bagazo de caña de TNUB.



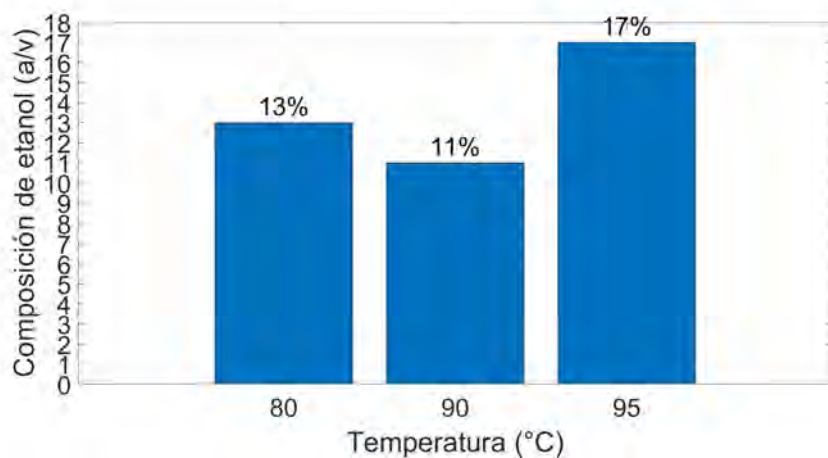
(b) Producción de bioetanol con pretratamiento biológico con bagazo de caña de 1 cm.

Figura 7.1: Producción de bioetanol con pretratamiento biológico.

Para el pretratamiento alcalino se observa que al utilizar TNUB (tamaño no uniforme de biomasa), la variación de temperatura no genera cambios significativos en el proceso. Sin embargo, al emplear un tamaño de partícula de 1 cm, se detectan diferencias notables en el rendimiento, especialmente a una temperatura de 90 °C, donde se registra un impacto significativo en la producción de bioetanol 2G. Para ello podemos ver la Figura 7.2.



(a) Producción de bioetanol con pretratamiento alcalino con bagazo de caña de TNUB.



(b) Producción de bioetanol con pretratamiento alcalino con bagazo de caña de 1 cm.

Figura 7.2: Producción de bioetanol con pretratamiento alcalino a 7870 s.

Para analizar el consumo energético promedio en cada etapa del proceso, la Figura 7.3 muestra un comparativo detallado entre los dos tipos de pretratamiento evaluados (pretratamiento biológico, pretratamiento alcalino), además, se incluye a la vez una comparación entre los dos tamaños de partícula estudiados (TNUB y 1 cm).

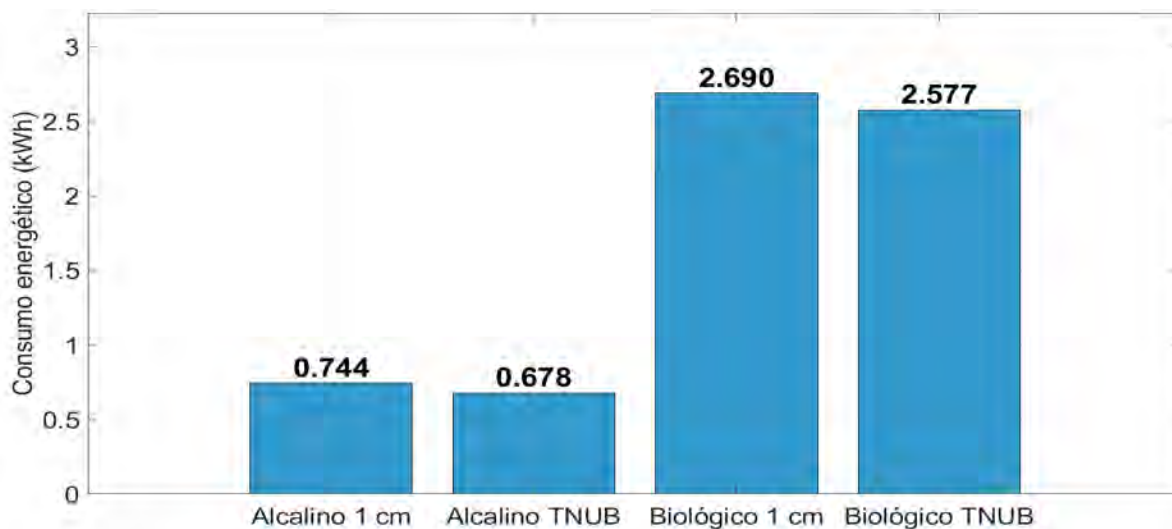


Figura 7.3: Consumo energético para los dos tipos de pretratamiento.

Los resultados presentados en la Figura 7.4 permiten establecer que el pretratamiento biológico demanda un consumo energético 3.7 veces superior al requerido por el pretratamiento alcalino. No obstante, el menor costo unitario por kWh asociado al proceso biológico mitiga sustancialmente su impacto económico global, manteniendo su competitividad como alternativa viable.

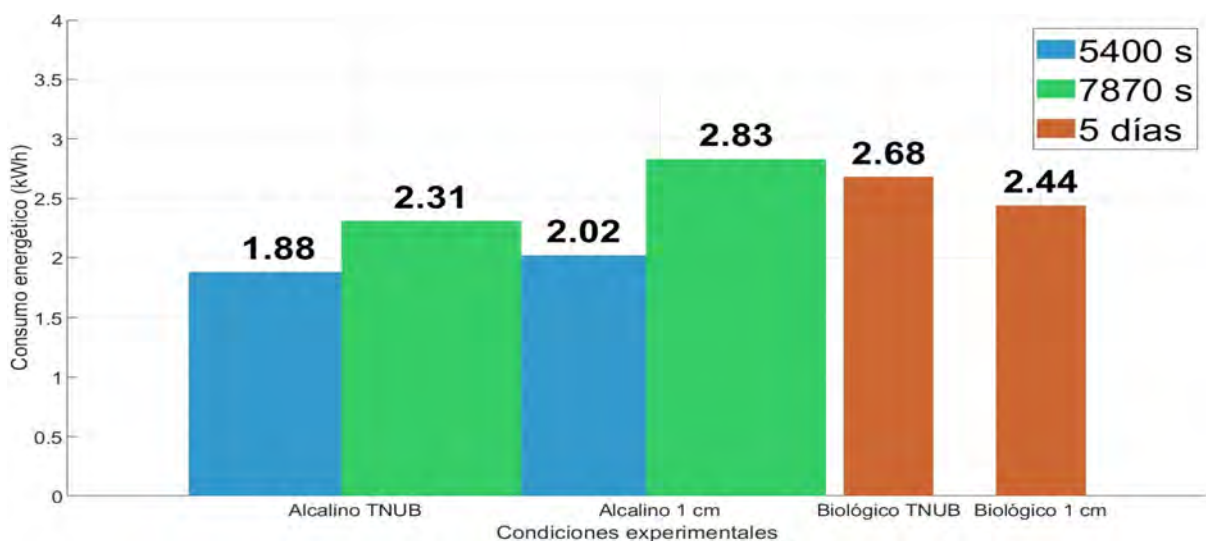


Figura 7.4: Consumo energético para SSF.

Los resultados indican que, durante la SSF, el consumo energético en promedio presentó variaciones mínimas. Este comportamiento podría atribuirse a la influencia del cambio en

la temperatura ambiental durante el proceso, ya que las condiciones del lugar posiblemente generan ligeras pérdidas que a su vez implican una demanda ligeramente superior de energía. En cuanto al costo de producción, en la Figura 7.5 podemos observar el costo total de producción de bioetanol 2G, clasificado por el pretratamiento utilizado, que se obtiene sumando el costo del insumo, el consumo energético promedio y el costo del acondicionamiento del pretratamiento y la SSF.

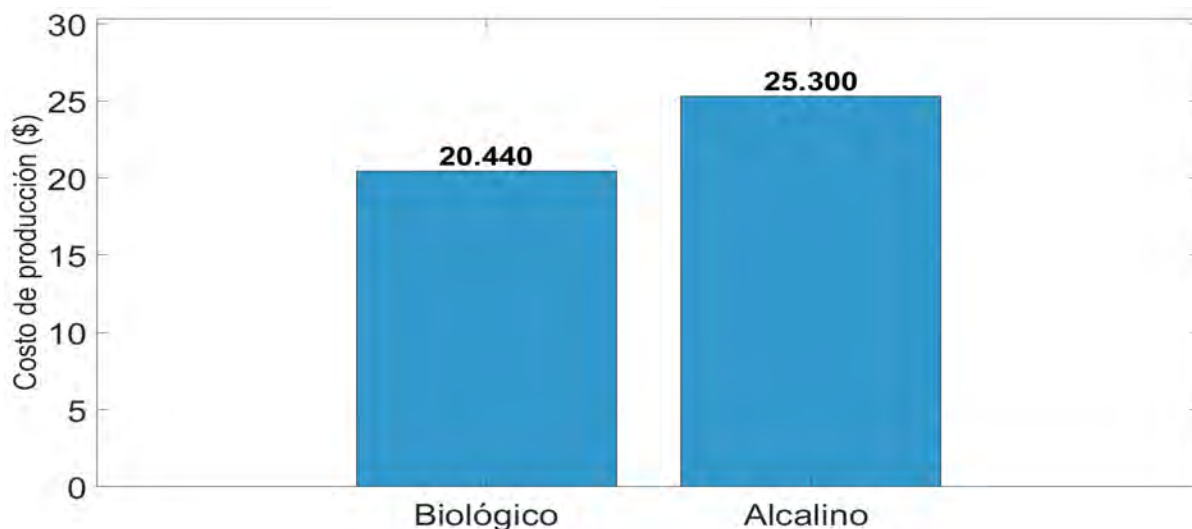


Figura 7.5: Costo de los insumos y consumo energético para SSF.

Relación costo producción

De acuerdo con las observaciones hechas a partir de las tablas antes presentadas, podemos discutir varios aspectos relevantes. En primer lugar, el pretratamiento que produce mayor rendimiento de bioetanol de segunda generación es el alcalino, alcanzando un máximo del 17% de bioetanol. Sin embargo, al compararlo con el pretratamiento biológico (cuyo máximo rendimiento fue del 14%) encontramos que el costo del pretratamiento alcalino resulta 3.7 veces superior al del tratamiento biológico.

Por lo tanto, el pretratamiento más conveniente desde un punto de vista económico y operativo es el biológico. Aunque presenta un rendimiento ligeramente menor, la diferencia porcentual del contenido de etanol en el producto proveniente de ambos métodos es menor que la diferencia de costo de producción del bioetanol 2G obtenido por estos. Por otro lado, aun quedan por explorar diferentes configuraciones del proceso con tratamiento biológico que pudieran permitir incrementar el contenido de bioetanol en producto. Este es un método que hasta el momento no se ha usado para la producción de bioetanol (ya que

originalmente fue propuesto para producir hidrógeno) y aun quedan por analizar más extensamente los efectos de las condiciones de operación.

Respecto a la comparativa de los tamaños de bagazo, los datos muestran que el uso de bagazo de caña de diferentes tamaños genera una menor producción de bioetanol. En consecuencia, la combinación óptima consiste en utilizar un pretratamiento biológico con bagazo de 1 cm, lo que proporciona la mejor relación costo-producción.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajos futuros

8.1. Conclusiones

Con respecto a lo mencionado anteriormente podemos concluir que en el pretratamiento biológico existe un cambio modificando el tamaño de partícula, así como la temperatura con mayor producción es de 45 °C. Para el pretratamiento alcalino podemos observar que un tiempo de 5400 s no presenta cambios en la producción de bioetanol, aun modificando el tamaño de partícula y la temperatura. En general, se puede concluir que, aunque el pretratamiento con hidróxido de sodio genera una mayor producción promedio de bioetanol en comparación con el humus de lombriz, la diferencia en rendimiento no justifica necesariamente su uso frente al pretratamiento biológico. Este último método permite obtener una producción similar con una disminución del 19.21 % en los costos., además de presentar una ventaja ambiental clave: no contamina de la misma manera que el hidróxido de sodio, lo que lo convierte en una alternativa más sostenible.

Por otro lado, al evaluar las variables de procesamiento, se observa que el tamaño de partícula de 1 cm en el bagazo es el que proporciona la mayor producción de bioetanol, lo que refuerza la viabilidad del pretratamiento biológico como método eficiente y ecológico para la producción de bioetanol de segunda generación (2G).

En resumen, el pretratamiento con humus de lombriz no solo resulta económicamente favorable, sino también ambientalmente responsable, posicionándose como una opción prometedora para la industria del bioetanol 2G.

8.2. Trabajos futuros

- Realizar una medición de pH en línea.
- Proponer otros pretratamientos para la producción de bioetanol 2G
- Analizar otros valores de las variables para ser compararlas con los resultado obtenidos.
- Obtener el modelo del reactor tipo batch.

Bibliografía

- Aditiya, H., Mahlia, T., Chong, W., Nur, H., and Sebayang, A. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66:631–653.
- Administration, E. I. (2021). Key world energy statistics 2021. Technical report, Paris.
- Arcos, A. F., Alvarado, V. M., and López, G. L. (2022). Evaluación experimental de las variables con mayor impacto en el proceso de producción de bioetanol de segunda generación. In *Tecnología y Ciencia Aplicada*, volume 5 of *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, pages 222–227, Cuernavaca, México. CENIDET.
- Ballesteros, I. (2002). Proceso de sacarificación y fermentación simultánea para la conversión de la fracción celulósica del residuo de la extracción del aceite de oliva en etanol. *Grasas y Aceites*, 53:282–288.
- Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I., and Ortiz-Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol una alternativa sustentable a la crisis energética. *Ra Ximhai*, 8(3):93–100.
- Choudhary, J., Singh, S., and Nain, L. (2016). Thermotolerant fermenting yeasts for simultaneous saccharification fermentation of lignocellulosic biomass. *Electronic Journal of Biotechnology*, 21:82–92.
- Cortés, J. A., Chaves, J. A., and Quintero, E. A. (2011). Generación de señales senoidales mediante pwm y filtros activos de segundo orden. *Scientia et technica*, 17(47):6–11.
- Cortés Ocampo, B. M. (2022). Producción de etanol por sacarificación y fermentación simultánea de residuos pretratados de zea mays. Tesis de licenciatura, Repositorio Institucional de Acceso Abierto (RIAA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Acceso abierto.

- Cuervo, L., Folch, J. L., and Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología*, 13(3):11–25.
- de Electricidad, C. F. (2023). Tarifas para gran demanda en media tensión ordinaria.
- Espinosa Negrín, A. M., López González, L. M., and Casdelo Gutiérrez, N. L. (2021). Pretratamiento de biomasa lignocelulósicas: Breve revisión de los principales métodos utilizados. *Centro Azúcar*, 48(3):108–119.
- Faviana, A. C. (2024-11-12). Evaluación de biotransformación del bagazo de caña de azúcar utilizando hongo lignícola *pleurotus ostreatus* para bovinos en valledupar, cesar.
- Galbe, M. and Zacchi, G. (2012). Pretreatment. the key to efficient utilization of lignocellulosic materials. *Biomass and Bioenergy*, 46:78.
- Gomes-da Silva, Z. M., Gálvez-Cantero, L., Gómez-Julián, A. M., Julián-Ricardo, M. C., and Ramos-Sánchez, L. B. (2022). Análisis de alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña. *Centro Azúcar*, 49(2):15–25.
- González, A. P. (2018). *Desarrollo de pretratamientos enzimáticos de materiales lignocelulósicos para la obtención de bioetanol de segunda generación*. PhD thesis, Universidad de Sevilla.
- Jara Huacacolqui, E. L., Leiva Cabrera, F. A., Martín Alva, E. A., Medina Vásquez, K. M. E., Bardales Vásquez, C. B., and León Torres, C. A. (2022). Los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales de la libertad y la producción de biomasa de candida utilis var. major. *Arnaldoa*, 29(1):163–176.
- Melendez, J. R. (2022). Biotecnología y gerencia aplicada en la producción de bioetanol 1g y 2g. *Revista de ciencias sociales*, 28(4):415–429.
- Moonsamy, T. A., Mandegari, M., Farzad, S., and Görgens, J. (2022). A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane. *Industrial Crops and Products*, 188:115675.
- Nasution, M. H., Lelinasari, S., and Kelana, M. G. S. (2022). A review of sugarcane bagasse pretreatment for bioethanol production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 963(1):012014.

- Olmo, O. d., Casanova Cabeza, E., Galvez Taupier, L., Lodos Fernandez, J., Fernandez Rodriguez, N., and Abril Gonzalez, A. (2015). El bagazo de la caña de azúcar. propiedades, constitución y potencial. *Patrimonio Científico del nuevo ICIDCA. Habana: ICIDCA*.
- Pérez, O. F. A., Varela, K. A. D., and Mena, J. D. C. (2022). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- Portal, P., Gurdo, N., Novelli-Poisson, G., Bonelli, P., Cuikerman, A., and Galvagno, M. (2014). Producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales con levaduras resistentes a estreses obtenidas por ingeniería evolutiva. In *Tercer Saprobio de procesos biotecnológicos*, Argentina. FABICIB.
- Posada Contreras, J. (2005). Modulación por ancho de pulso (pwm) y modulación vectorial (svm). una introducción a las técnicas de modulación.
- Riano, A. M. S. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 1(5).
- Rojas, OA Ávila, D. y. J. S. (2010). Análisis del ciclo de vida e integración del proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña. *Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Colombia*.
- Segura, A., Manríquez, A., Santos, D., Ambriz, E., Casas, P., and Serafín-Muñoz, A. H. (2018). Obtención de bioetanol a partir de residuos de cáscara de piña. *Jóvenes en la Ciencia*, 4(1):1797–1801.
- Tantayotai, P., Gundupalli, M. P., Katam, K., Rattanaporn, K., Cheenkachorn, K., and Sriariyanun, M. (2022). In-depth investigation of the bioethanol and biogas production from organic and mineral acid pretreated sugarcane bagasse: Comparative and optimization studies. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 45:102499.
- Torres del Carmen, F. d. J. (2008). Diseño, construcción y pruebas de un prototipo para la producción de biodiesel a partir de aceites provenientes de recursos renovables. Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Cuernavaca, Cuernavaca, Morelos, México.
- Valles Sáez, A. (2022). *Estudio del proceso simultáneo de sacarificación y fermentación aceto-butílica-etílica a partir de paja de arroz*. PhD thesis, universidad de valencia, Valencia, España.

- Verdejo, C. P. (2024). Diseño de un biorreactor para la obtención de 2,3-butanodiol a partir de destrío de zanahoria mediante sacarificación y fermentación simultáneas.
- Zhu, Y., Li, Y., Li, D., Dong, L., Liu, X., Yan, A., Liu, Y., and Wang, Z. (2024). A theoretical and experimental analysis of the time-domain characteristics of a prbs phase-modulated laser system. *Applied Sciences*, 14(20).
- Zuliani, L., Serpico, A., De Simone, M., Frison, N., and Fusco, S. (2021). Biorefinery gets hot: thermophilic enzymes and microorganisms for second-generation bioethanol production. *Processes*, 9(9):1583.

Anexos

Anexo A. Instalación del sistema operativo en la Raspberry

Se descargó el sistema operativo Raspberry Pi OS (anteriormente conocido como Raspbian), desde la página oficial para instalar el sistema operativo y posteriormente se monta la imagen a la memoria de 256 GB.

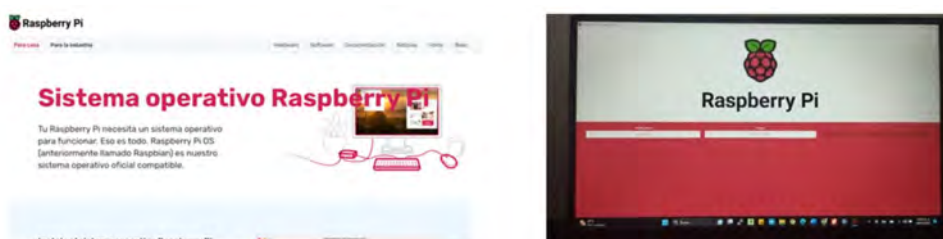


Figura 8.1: Programación de los sensores

Para conectar la Raspberry se ingresa la memoria a la Raspberry y se conecta el cable HDMI al monitor, así como el teclado y el ratón. Finalmente conectamos el cable de alimentación. En la pantalla nos pedirá un usuario y una contraseña que nosotros deseemos poner, después iremos configurando poco a poco lo que nos valla pidiendo para finalmente entrar a la pantalla principal de la Raspberry PI 3 (figura 8.2)



Figura 8.2: Pantalla principal del sistema operativo de la raspberry.

8.2.1. Actualización del sistema operativo

Para poder trabajar en la Raspberry se necesita actualizar el sistema operativo por lo que se utiliza la pestaña de la terminal como se muestra en la figura 8.3.



Figura 8.3: Pestaña LXTerminal.

Tecleando el código "*sudo apt update*" y dando enter se estará instalando la actualización. En dado caso que la fecha este mal no podrá actualizarse hasta ser modificada, por lo que digitaremos la fecha con el siguiente código "*sudo date -s "YYYY-MM-DD HH:MM:SS*" después de tener bien la fecha este podrá actualizarse e instalarse las librerías. Las librerías instaladas para utilizar los sensores termopar k y DHT11, y algunas otras funciones fueron: **Pandas**, **Numpy**, **Max6675**, **Adafruit** y **matplotlib**.

Anexo B. Programa para la lectura de la temperatura para los sensores DHT11 y termopar tipo k

```
#se realiza un programa para medir la temperatura mediante el sensor k max6675
import time as t
import MAX6675.MAX6675 as MAX6675
import Adafruit_GPIO.SPI as SPI
#biblioteca para el sensor de humedad
import Adafruit_DHT
#bibliotecas para grafica
import pandas as pd
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
```

```
#LOS PINES CORRESPONDEN A LOS PUERTOS SERIE SPI
#SON EL 11 (SPI0) = CLK CORRESPONDIENTE AL GPIO,
QUE EN LA BOARD ES EL 23
#EL PIN 8(SPI0) =CS CORRESPONDIENTE AL GPIO, QUE EN LA BOARD CO-
RRESPONDE A EL PIN 24
#EN CASO DEL PIN 9 (SPI0)= DO correspondiente al gpio, donde en la board corres-
ponde al pin 21.
CLK=11
CS=8
DO=9
```

```
#sensor de humedad
sensor2= Adafruit_DHT.DHT11
pin= 23
sensor=MAX6675.MAX6675(CLK,CS,DO)
```

```
temperatura=[]
fecha=[]
temperaturaD=[]
HumedadD=[]
try:
while True : Temp=sensor.readTempC()
hora=t.strftime(" %H: %M: %S")
#print (fecha)
#print (Temp)
temperatura.append(Temp)
fecha.append(hora)
```

```
#SENSOR DE HUMEDAD
humedad, temperatura2= Adafruit_DHT.read_retry(sensor2, pin)
print (f'Temp temperatura2:2f*c humedad:.2f%')
temperaturaD.append(temperatura2)
```

```
HumedadD.append(humedad)
```

```
    t.sleep(5)
except KeyboardInterrupt:
    print ("finalizado.....")
# Colocar datos en el documentos
nomdocumento= input("nombre del documento + .csv..")
```

```
    datos='Tiempo':fecha,'Temperatura':temperatura,'Temperatura 2 del
DHT':temperaturaD,'Humedad':HumedadD
informacion=pd.DataFrame(datos, columns=
['Tiempo','Temperatura','Temperatura 2 del DHT','Humedad'])
informacion.to_csv(nomdocumento,sep=',',header= True )
```

```
#graficamos con pandas los datos obtenidos
```

```
    graftermopark=input("nombre de la grafica del termopar k.....")
plt.xlabel('Tiempo')
plt.ylabel('Temperatura')
plt.plot(fecha,temperatura)
plt.savefig(graftermopark)
plt.show()
```

```
    grafhumedad=input("nombre de la grafica de humedad——") plt.xlabel('Tiempo')
plt.ylabel('Humedad')
plt.plot(fecha,HumedadD)
plt.savefig(grafhumedad)
pltshow()
```