



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

Dirección de Estudios de Posgrado

Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

“MONITOREO DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN A PARTIR DE ASTILLA DE PINUS *spp*”

Tesis para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Presenta:

ING. ALBERTO ARROYO BERMUDEZ

Asesor de Tesis: **Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra**

Co-Asesor de Tesis: **Dr. José Cruz de León**

Morelia, Michoacán a septiembre de 2025

DEDICATORIAS

Dedico mi tesis a Dios, por darme la fe necesaria para culminar esta meta siempre en busca de mejorar mi vida y dándome las herramientas para no dejar de creer en mí mismo.

A mis amados padres, por todo su apoyo y por motivarme a seguir siempre adelante. Por estar conmigo en los momentos fáciles y complicados de mi vida.

También a mis hermanos, por estar ahí cuando he tenido necesidades y apoyarme siempre.

Gracias a mis hijos por entender que, aunque hubo momentos en los que requería tener menos tiempo para estar con ustedes, tuvieron la suficiente madurez para afrontarlo con fuerza y valentía.

Dedico este trabajo a mi amada Maritza, por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.

Y, finalmente, a los que no creyeron en mí, con su actitud lograron que tomará más impulso.

AGRADECIMIENTOS

Deseo manifestar mi gratitud a la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y a la **Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera** por brindarme acceso a sus instalaciones y recursos durante la realización de este proyecto.

Quiero expresar mi agradecimiento al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** y al programa de **Becas Nacionales** por otorgarme la beca que hizo posible la realización de este proyecto. Esta oportunidad me permitió dedicar tiempo y recursos para llevar a cabo mi investigación de manera exitosa.

Quiero agradecer a mi director de tesis, el **Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra**, por su orientación y apoyo a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos, dedicación y paciencia han sido fundamentales para el desarrollo de mi investigación.

Agradezco especialmente al **Dr. José Cruz de León** por su valiosa supervisión y asesoramiento a lo largo de mi investigación.

Agradezco al **M.C. Martín Parra Alcaraz**. Por sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Gracias por sus orientaciones

RESUMEN

El siguiente trabajo mostrará el procedimiento y desarrollo de un sistema informático que tiene la función de llevar a cabo las lecturas de temperaturas de tres termopares tipo K instalados en un prototipo también desarrollado y construido de un gasificador de flujo ascendente, donde se realizaron tres pruebas o corridas de la gasificación de 800 gr de astillas de Pino. Las lecturas recibidas fueron guardadas en una base de datos diseñada e implementada en el Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD) de MySQL y con ayuda de la interfaz de uso de Workbench también de la empresa Oracle.

Todo lo anterior se logró con el uso de lenguaje, placas y desarrollo electrónico con la plataforma de Arduino, ya que actualmente se cuenta con gran cantidad de desarrollos creados por su comunidad de usuarios, facilitando por tal motivo la implementación del mismo Arduino. Siendo todo programado desde cero, solo haciendo uso de librerías propias de la plataforma Arduino.

Buscando que más adelante se pueda escalar de mayor manera el desarrollo del sistema y de los métodos recolección, análisis y presentación de los datos obtenidos, y buscando poder lograr no solo el monitoreo en tiempo real si no también un control del mismo.

Palabras Clave:

Gasificación, Monitoreo, Arduino, Prototipo, Programación

ABSTRACT

The following work will show the procedure and development of a computer system that has the function of carrying out temperature readings of three type K thermocouples installed in a prototype also developed and built of an ascending flow gasifier, where three tests or runs were carried out. of the gasification of 800 gr of Pine chips. The readings received were saved in a database designed and implemented in the MySQL Database Management System (DBMS) and with the help of the Workbench user interface also from the Oracle company.

All of the above was achieved with the use of language, boards and electronic development with the Arduino platform, since there are currently a large number of developments created by its user community, facilitating the implementation of Arduino itself. Everything being programmed from scratch, only using the Arduino platform's own libraries.

Seeking to further scale the development of the system and the methods for collecting, analyzing and presenting the data obtained, and seeking to be able to achieve not only real-time monitoring but also control thereof.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- ANTECEDENTES.....	2
2.1.- Gasificador.....	7
2.2.- Electrónica y sensores.....	7
2.3.- Sistema de Monitoreo y Electrónica.....	9
2.3.1- Programación Arduino.....	9
2.3.2- Programación Sistema de Monitoreo.....	9
3.- JUSTIFICACIÓN.....	11
4.- OBJETIVOS.....	11
4.1.- Objetivo General.....	11
4.2.- Objetivos particulares.....	11
5.- HIPÓTESIS.....	12
6.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
7.- RESULTADOS.....	18
7.1.- Armado Físico y Electrónico	18
7.1.1.- Primer Módulo: Cenicero o Base	19
7.1.2.- Segundo Módulo: Cámara de Combustión o Reactor.....	20
7.1.3.- Tercer Módulo: Cabezal de Combustión de Gases.....	21
7.2.- Pruebas de Gasificación y Monitoreo.....	22
7.3.- Preparación de las muestras para gasificar	24
7.4.- Medición de variables en el proceso de gasificación.....	30
8.- DISCUSIÓN.....	35
9.- CONCLUSIONES.....	36
10.- BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Molécula de metano.....	2
Figura 2.- Diagrama teórico de la obtención de Metanol.....	2
Figura 3.- Gasificadores de Lecho Fijo, Flujo Ascendente (Izq.) y Flujo Descendente (Der.).....	3
Figura 4.- Gasificadores de Lecho Fluidizado, Lecho Fluidizado con Doble Reactor (Izq.) y Lecho Fluidizado Burbujeante (Der.)	3
Figura 5.- Principales rutas termoquímicas y biológicas para la transformación energética de la biomasa	4
Figura 6.- Principales formas de presentación de materiales lignocelulósicos	5
Figura 7.- Planta prototipo de gasificación	6
Figura 8.- Esquema de un sistema de monitoreo.....	6
Figura 9.- Tarjeta electrónica Arduino	8
Figura 10.- Pirómetro encargado de controlar el encendido del gasificador y las temperaturas a través de dos termopares tipo K (Uso propio).....	8
Figura 11.- Logotipo de Arduino.....	9
Figura 12.- Interfaz Arduino IDE	9
Figura 13.- Logotipo del Lenguaje de Programación.....	9
Figura 14.- Logotipo de la Arquitectura .Net.	9
Figura 15.- Logotipo del IDE de Visual Studio 2022	10
Figura 16.- Logotipo del SGBD MySQL	10
Figura 17.- Página de arranque de MySQL Workbench	10
Figura 18.- Esquema de desarrollo de proceso de gasificación.....	12
Figura 19.- Página de arranque de MySQL Workbench	13
Figura 20.- Placa Programada para la Toma de Lecturas del Gasificador	13
Figura 21.- Kit Pirómetro Digital Rex-c100 Control De Temperatura Ssr40a	14
Figura 22.- Pirómetro Armado.	14
Figura 23.- Termopar o Termocupla tipo K	15
Figura 24.- Circuito Integrado Arduino MAX6675	16
Figura 25.- Sopladora eléctrica de 960 W, Truper	17
Figura 26.- Placa madre (Mega2560) junto con los termopares tipo K conectados a los circuitos Max6675	18
Figura 27.- Gasificador en proceso de armado para mostrar que es modular	19
Figura 28.- Cenicero o base.....	19

Figura 29.- Entrada de gasificante.....	19
Figura 30.- Resistencia eléctrica.....	19
Figura 31.- Reactor de gasificación.....	20
Figura 32.- Alimentador	20
Figura 33.- Resistencia eléctrica.....	20
Figura 34.- Mirilla	20
Figura 35.- Vista del cabezal con la salida del gas.....	21
Figura 36.- Vista lateral izquierda donde se ve la llave de paso de aire para mejorar la combinación de syngas con oxígeno	21
Figura 37.- Gasificador armado con sus tres módulos de flujo ascendente	21
Figura 38.- Prototipo de gasificador en proceso de armado para comenzar pruebas.	22
Figura 39.- Termopar y resistencias conectadas en el cenicero y cámara de combustión	22
Figura 40.- Termopares conectadas en el cabezal y salida de Syngas	23
Figura 41.- Instalación de pirómetro y conexión de termopares con la tarjeta Arduino Mega	23
Figura 42.- Equipo de cómputo conectado al gasificador para realizar el monitoreo	24
Figura 43.- Llenado de astillas de Pino SPP en la barrica plástica para el pesaje.....	24
Figura 44.- Astillas dentro de la barrica	24
Figura 45.- Aserrín de desecho para precalentar el gasificador	25
Figura 46.- Pirómetro programado a 130°C para comenzar a calentar las resistencias en el gasificador	25
Figura 47.- Resistencia ya caliente para realizar el precalentamiento.....	25
Figura 48.- Entrada de alimentación para la cámara de combustión del gasificador	26
Figura 49.- Vista superior de la entrada de alimentación donde se puede observar el material dentro de la cámara ya precalentada	26
Figura 50.- Pesaje para primer corrida	26
Figura 51.- Pesaje para segunda corrida.....	26
Figura 52.- Pesaje para tercer corrida.....	26
Figura 53.- Imagen de toma de temperaturas de la primera corrida de gasificación.....	27
Figura 54.- Imagen de toma de temperaturas de la segunda corrida de gasificación	27
Figura 55.- Imagen de toma de temperaturas de la tercera corrida de gasificación	27
Figura 56.- Imagen de toma de temperaturas del precalentamiento de las temperaturas ambiente .	27
Figura 57.- Comportamiento de la temperatura del proceso de precalentamiento del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres	28

Figura 58.- Comportamiento de la temperatura de la primera corrida de prueba del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres	28
Figura 59.- Comportamiento de la temperatura de la segunda corrida de prueba del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres	28
Figura 60.- Comportamiento de la temperatura de la tercera corrida de prueba del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres	28
Figura 61.- Intento de combustionar el metano presente en el gas de síntesis en el precalentamiento del gasificador	29
Figura 62.- Combustión del metano en el gas de síntesis	29
Figura 63.- Combustión sostenida en la salida de gas del gasificador	30
Figura 64.- Colocación del Termopar A en el gasificador, justo al final del tubo de alimentación e inicio de la cámara de gasificación	31
Figura 65.- Temperaturas de los tres termopares en la primera corrida	31
Figura 66.- Temperaturas de los tres termopares en la segunda corrida	32
Figura 67.- Temperaturas de los tres termopares en la tercera corrida	32
Figura 68.- Temperaturas del termopar A en cada una de las corridas	33
Figura 69.- Temperaturas del termopar B en cada una de las corridas	34
Figura 70.- Temperaturas del termopar C en cada una de las corridas	34

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Reacciones básicas homogéneas y heterogéneas de gasificación.....	4
Cuadro 2.- Características técnicas de la Placa Arduino Mega2560.....	14
Cuadro 3.- Características Técnicas del Kit.....	15
Cuadro 4.- Características Técnicas de la Termocupla.....	16
Cuadro 5.- Características Técnicas de la Tarjeta MAX6675.....	16
Cuadro 6.- Especificaciones técnicas Sopladora eléctrica Truper	17
Cuadro 7.- Resumen de datos de los tres termopares en las tres corridas de gasificación	30
Cuadro 8.- Resumen de datos de los termopares (A, B y C) en cada corrida (C1, C2 y C3).....	32
Cuadro 9.- Resultantes de la biomasa lignocelulósica después de la pirolisis.....	35

1.- INTRODUCCIÓN

El proceso de gasificación es visto como una opción a los combustibles convencionales. Un sistema para producción de calor y potencia básicamente consiste en un gasificador, un limpiador de gases y un convertidor de energía(Estrada & Zapata Meneses, 2004). La gasificación de biomasa es una forma de convertir materia en energía, la cual todavía se mantiene en investigación y desarrollo. La actividad sobre el proceso ha estado centrada en mejorar el diseño, modelación y evaluación de los diferentes tipos de reactores, las aplicaciones prácticas se han realizado en instalaciones de pequeña y mediano tamaño. A pesar de las investigaciones se han operado para distintos tipos de gasificadores y en distintas condiciones de operación, pocas son las instalaciones que operan comercialmente (Lesme-Jaén et al., 2011). Los reactores pueden diferir en forma de alimentación de la biomasa residual a gasificar. Los más habituales son de lecho fijo y a su vez pueden ser de flujo de gas ascendente o descendente, también se han desarrollado de lecho fluidizado con ciertas ventajas respecto a los anteriores. Estos presentan mayor velocidad de reacción y eficiencia de conversión (Durán-García, 2016). En un proceso de gasificación la geometría de la biomasa es un factor necesario que considerar. En general, el proceso depende de varios factores, entre los que se destaca la temperatura de pirólisis, variable que determina la separación de la molécula de la biomasa mediante la reacción química de reducción que se produce a una presión definida dentro del reactor (Sharma, 2011). En la temperatura se requiere de un monitoreo en diferentes puntos dentro del reactor y con ello se determina el comportamiento del proceso de gasificación. En este trabajo se realizó la construcción del gasificador de flujo ascendente y se llevó a cabo el monitoreo de la temperatura en el proceso de gasificación. Dicho monitoreo se realizó a través del desarrollo de un sistema informático capaz de registrar la temperatura en tiempo real y de almacenar los datos. Los valores de temperatura se detectan a través de termopares tipo K y estos están conectados a una tarjeta Arduino Mega2560.

2.- ANTECEDENTES

La primera investigación documentada sobre gasificación fue realizada por Thomas Shirley, quien en 1659 experimentó con "hidrógeno carburado", ahora llamado metano (Figura 1).

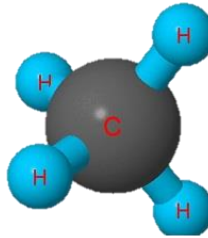


Figura 1.- Molécula de metano

La pirólisis de biomasa para producir carbón vegetal pudo ser la primera aplicación a gran escala de un proceso relacionado con la gasificación. Dado que la madera, debido a su uso excesivo, su acceso a principios del siglo XVIII era muy limitado, el coque se producía a partir del carbón, sin embargo, el subproducto gaseoso de la misma, recibió poca atención. Los primeros desarrollos se inspiraron inicialmente para el alumbrado público. Las características sobresalientes del gas se demostraron a la Real Sociedad Británica en 1733. (Higman & van der Burgt, 2008). Además de este primer uso, el gas de biomasa se utilizó como base para la producción de metanol (Figura 2).



Figura 2.- Diagrama teórico de la obtención de Metanol

Desde la primera guerra mundial, la sociedad se dio cuenta de la escasez de combustibles alternativos al Diesel y a la gasolina. De las fuentes de energía renovables (solar, viento, hidráulica, mareomotriz) la biomasa es la que tiene mayor potencial y cantidad, para producción de energía (Rogel Ramírez, 2007). Algunos gasificadores se basan en una tecnología de lecho fijo o fluidizado en combinación de flujo ascendente, descendente y burbujeante (Figura 3 y 4).

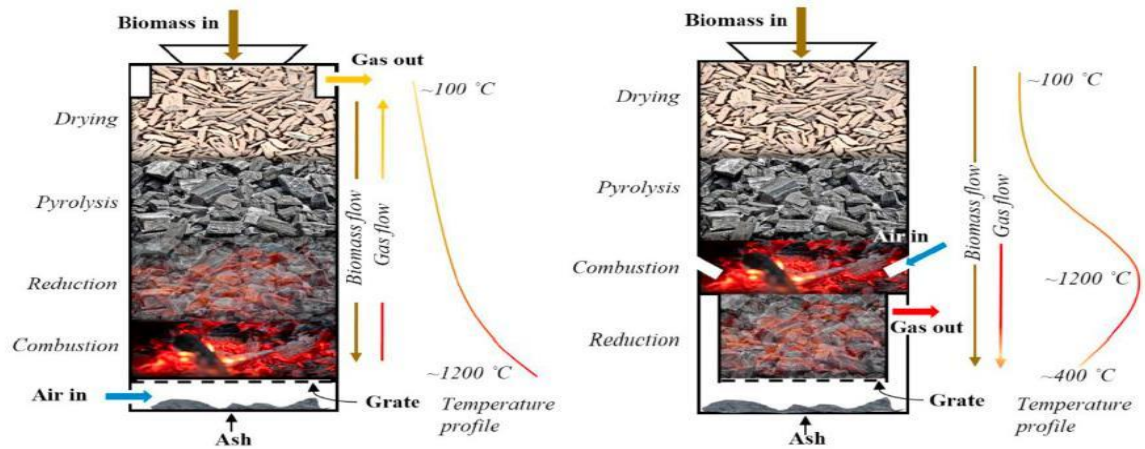


Figura 3.- Gasificadores de Lecho Fijo, Flujo Ascendente (Izq.) y Flujo Descendente (Der.)

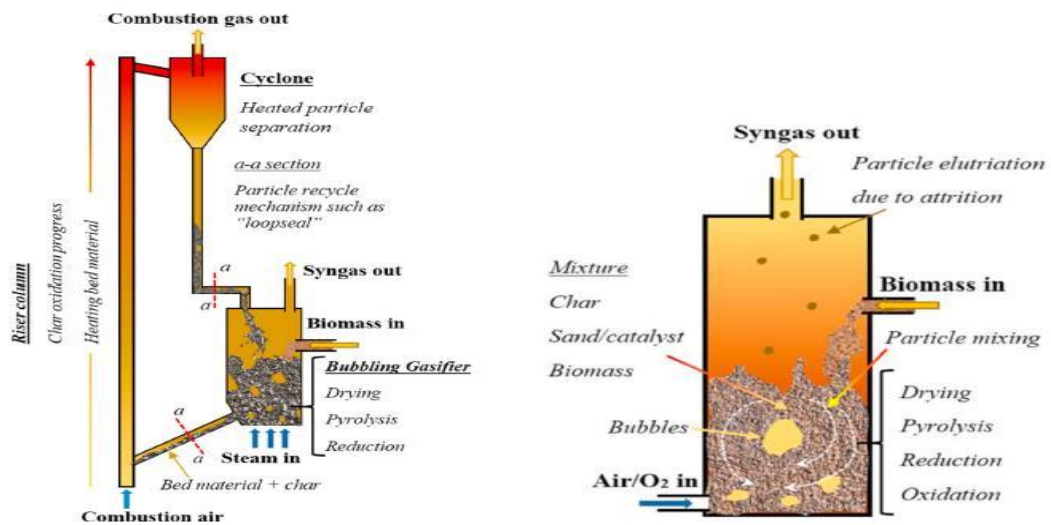


Figura 4.- Gasificadores de Lecho Fluidizado, Lecho Fluidizado con Doble Reactor (Izq.) y Lecho Fluidizado Burbujeante (Der.)

La gasificación en pocas palabras se define como una tecnología de conversión de residuos en energía (Figura 5). Utiliza materiales de desecho y las convierte en combustibles. El gas de síntesis o syngas es producto de la aplicación de calor, oxígeno y presión al interior de un gasificador, que esencialmente es un reactor termoquímico donde tienen lugar varios procesos físicos y químicos complejos (Bandara, Jaiswal, Nielsen, & Moldestad, 2021).

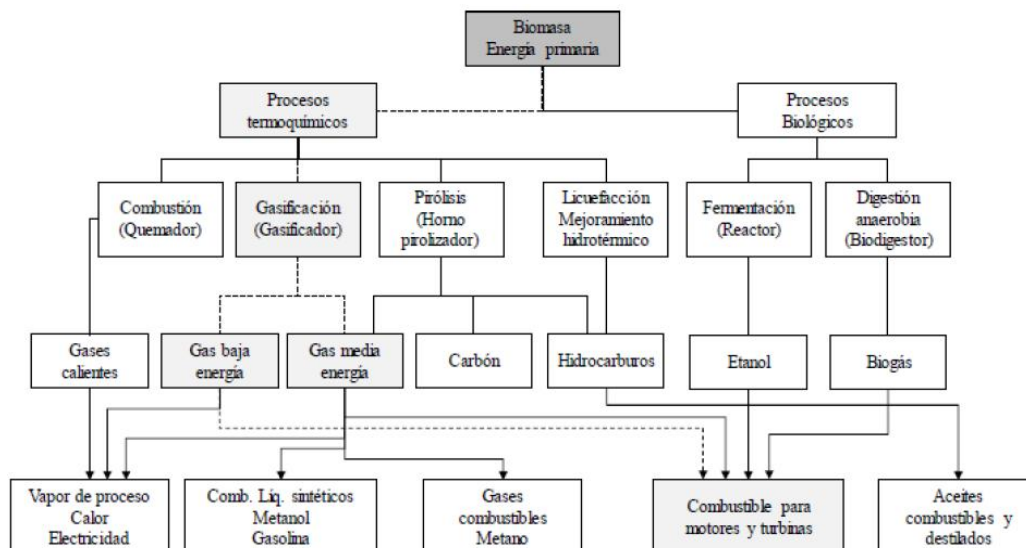


Figura 5.- Principales rutas termoquímicas y biológicas para la transformación energética de la biomasa (McKendry, 2002)

La gasificación transforma biomasa sólida en una mezcla gaseosa de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases ligeros como etano y propano, entre otros (Cuadro 1). Aire, oxígeno, vapor o una mezcla de estos, entre otros se utilizan como agente gasificante (Ghassemi & Shahsavan-Markadeh, 2014) (Anis & Zainal, 2011) (Belgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003).

Cuadro 1.- Reacciones básicas homogéneas y heterogéneas de gasificación. (Bandara, Jaiswal, Nielsen, & Moldestad, 2021)

Reacción Estequiométrica		Nombre de Reacción	Entalpía kJ/mol
$C + O_2$	$\Rightarrow$	CO_2 Combustión de Carbón	(-394)
$C + 0.5O_2$	$\Rightarrow$	CO Oxidación Parcial de Carbón	(-111)
$CO + 0.5O_2$	$\Rightarrow$	CO_2 Oxidación de CO	(-283)
$H_2 + 0.5O_2$	$\Rightarrow$	H_2O Combustión de Hidrógeno	(-242)
$C + H_2O$	$\Leftrightarrow$	$H_2O + CO$ Gasificación con Vapor	+131
$C + CO_2$	$\Leftrightarrow$	$2CO$ Reacción de Boudouard	+172
$C + 2H_2$	$\Leftrightarrow$	CH_4 Metanación	(-75)
$H_2O + CO$	$\Leftrightarrow$	$H_2 + CO_2$ Reacción de Cambio Agua-Gas	(-41)
$CH_4 + H_2O$	$\Leftrightarrow$	$3H_2 + CO$ Reformado de Metano	+206

Secado y pirólisis – Endotérmico Conversión, reformado
y oxidación del alquitrán

Este proceso no siempre requiere de fuentes externas de calor para mantener la temperatura de combustión y para sostener las reacciones dentro del gasificador. Por tanto, los equipos y requisitos de funcionamiento son relativamente menores cuando se usa aire como el agente gasificante (Ahumada, Verdeza, Bula, & Lombana, 2016). Los materiales lignocelulósicos son variados (Figura 6), pueden utilizarse astillas, virutas y aserrín de madera, fibra de coco, residuos agrícolas, bambú, etc.



Figura 6.- Principales formas de presentación de materiales lignocelulósicos (Energy, 2024)

La gasificación de biomasa lignocelulósica es empleada para la generación de energía de una forma eficiente y sostenible, con el menor impacto medioambiental que el producido por los combustibles fósiles (Carballo Abreu, Márquez Montesino, Luz Silveira, Godoy Júnior, & Zanzi, 2005). Los procesos industriales, principalmente los sistemas de generación de energía a partir de sistemas no convencionales, suelen carecer de una descripción de ingeniería básica y de detalle desde el punto de vista instrumental y de control (Figura 7). En este sentido los dispositivos empelados son el reactor, el inyector del gasificante, trampa de alquitrán, cromatógrafo y computadora, como los más comunes.

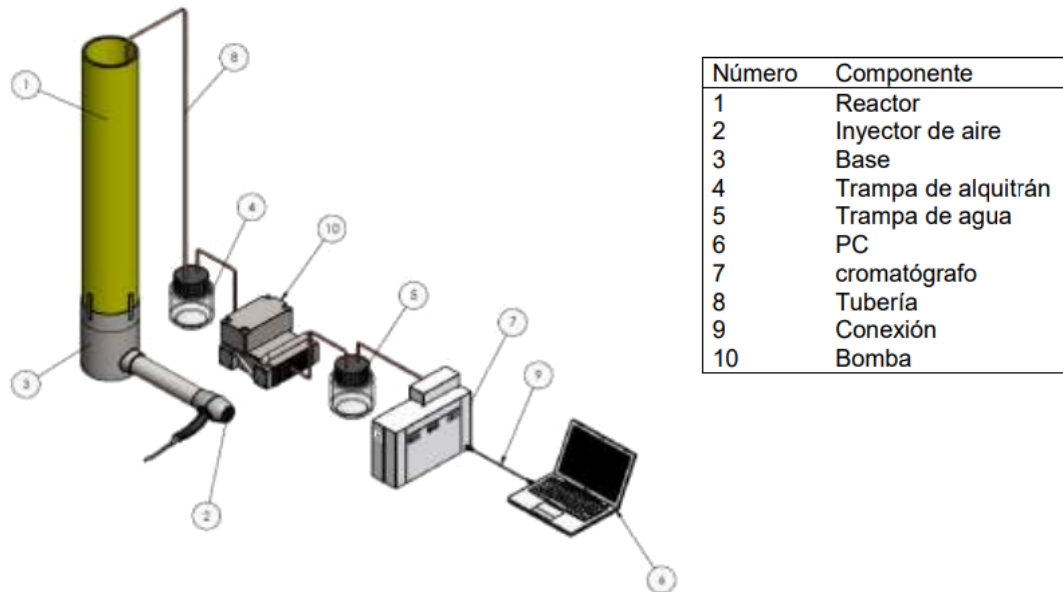


Figura 7.- Planta prototipo de gasificación (Ahumada, Verdeza, Bula, & Lombana, 2016)

Los sistemas de gasificación demandan un análisis al seleccionar la instrumentación, el costo de mantenimiento, la calibración, los esquemas de instalación y sistemas de control; que hace necesaria una ingeniería básica y de detalle (Castellanos-Contreras, Forero-Núñez, & Sierra-Vargas, 2015). Todo lo anterior permite tener un control y lectura de datos sobre la eficiencia en cualquier momento del proceso (Figura 8).

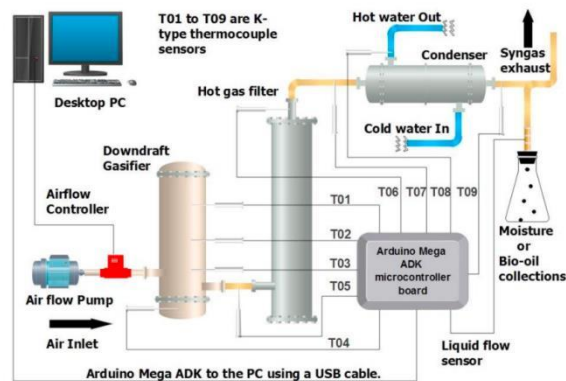


Figura 8.- Esquema de un sistema de monitoreo (Kamble, Khan, Capper, Sharp, & Watson, 2017)

En relación con México sobre la ingeniería a detalle, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), generaron el sistema MAD-MEX (Monitoreo de Datos de Actividad para el programa mexicano REDD +), y del IGD mismo, se realizaron en el lenguaje de programación Python 2.7.6. Al considerar la migración de la presente aplicación a un sistema de información geográfica. Las bases de datos del Infys fueron

migradas al sistema manejador de base de datos (SMBD) SQLite 3.0, ya que este SMBD opera de manera natural. (Leyva Ovalle, y otros, 2017)

2.1.- Gasificador

Entre los diferentes tipos de gasificador uno de los más utilizados es el de flujo ascendente, el cual se podría utilizar para desarrollar y analizar el rendimiento de sistemas de control e instrumentación (Rogel Ramírez, 2007). La selección del gasificador se debe de realizar atendiendo a las exigencias de limpieza del gas y los bajos contenidos de alquitrán. La composición química de la madera varía de acuerdo con la parte del árbol que se trate (raíz, hojas, madera del fuste o corteza, madera de compresión, o de tensión), varía con la localidad, condiciones climáticas y características genéticas.

Para gasificadores en condiciones óptimas, se puede producir un gas de síntesis limpio con baja concentración de alquitrán, lo que minimiza la necesidad de limpieza del gas, lo cual es una parte costosa de la conversión de materia prima a energía (Kamble, y otros, 2019). Los reactores se pueden diferir en función del tipo de alimentación, entre los cuales pueden ser de lecho fijo y a su vez pueden ser de flujo de gas ascendente o descendente. También se han desarrollado gasificadores de lecho fluidizado con ciertas ventajas respecto a los anteriores (Durán García, 2016).

2.2.- Electrónica y sensores

Antes del uso excesivo de las plataformas de hardware abierto como Arduino, la creación de prototipos de hardware y software era compleja y cara (Candelas, y otros, 2015). Como parte de la adquisición e implementación de sistemas de instrumentación, donde se pueden interconectar termopares del mismo y otros tipos de sensores, todo a un microcontrolador. El microcontrolador tiene la función de mostrar datos de las diferentes variables seleccionadas (Figura 9) y que puedan ser mostrados en una pantalla de computadora.

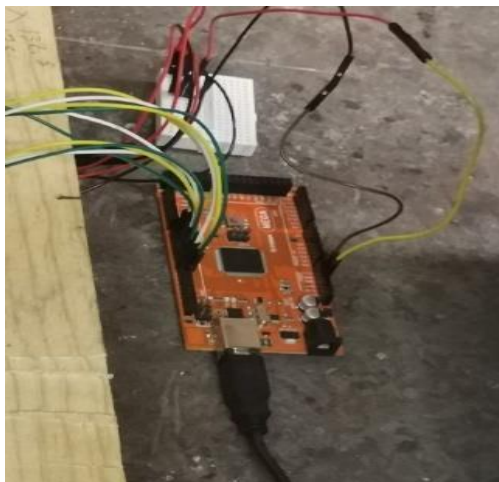


Figura 9.- Tarjeta electrónica Arduino

Algunas variables que se pueden estudiar en un gasificador son: la temperatura y el flujo de gasificante. Para la medición de la temperatura se emplean termopares, entre los más comunes se encuentran el tipo K (Cromel (aleación de Ni-Cr) / Alumel (aleación de Ni -Al)). Estos constan de dos conductores eléctricos de diferentes materiales conectados entre sí en un extremo (unión de medida). (Castellanos-Contreras, Forero-Núñez, & Sierra-Vargas, 2015). Estos termopares tienen un rango de temperatura entre -40 °C a 1000 °C y son de bajo costo (Solé, 2010).

Para el control de temperatura (encendido/apagado) se pueden utilizar un dispositivo denominado pirómetro (Figura 10). Este dispositivo está conectado al gasificar a través de los sensores de temperatura (termopares).



Figura 10.- Pirómetro encargado de controlar el encendido del gasificador y las temperaturas a través de dos termopares tipo K (Uso propio)

2.3.- Sistema de Monitoreo y Electrónica

Todo lo anterior forma parte del desarrollo físico para realizar las pruebas y monitoreo de las mismas, sin embargo, una etapa imparte para lograr lo anterior es realizar la interfaz por donde serán posibles las tomas de las lecturas de los dispositivos.

2.3.1- Programación Arduino

Para empezar a programar la placa Arduino es necesario descargar un IDE (Entorno de desarrollo integrado), el cual es un conjunto de herramientas de software para programadores. El IDE de Arduino nos permite escribir, depurar, editar y grabar nuestro programa llamados “sketches” (Electronics, 2024)



Figura 11.- Logotipo de Arduino (Arduino, 2022)



Figura 12.- Interfaz Arduino IDE (Garda, 2020)

2.3.2- Programación Sistema de Monitoreo

C# (C Sharp) es un lenguaje de programación (Figura 13 y 14), orientado a objetos. Proporciona un lenguaje natural en el que crear y usar componentes de software. Desde su origen, ha agregado características para admitir nuevas cargas de trabajo y prácticas de diseño de software emergentes. (Wagner, y otros, 2023)



Figura 13.- Logotipo del Lenguaje de Programación (Álvarez, 2018)



Figura 14.- Logotipo de la Arquitectura .Net (Microsoft, 2020)

Visual Studio (Figura 15) es una herramienta de desarrollo que permite completar todo el ciclo de desarrollo en un solo lugar. Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) completo que puede usar para

escribir, editar, depurar y compilar el código y, luego, implementar la aplicación. (Anand, y otros, 2023).



Figura 15.- Logotipo del IDE de Visual Studio 2022. (Microsoft, Icon of Visual Studio, 2019)

MySQL ofrece un servidor de base de datos SQL (lenguaje de consulta estructurado) muy rápido, multiproceso, multiusuario y robusto. Así como para integrarse en software de implementación masiva (ORACLE, 2023). MySQL Workbench es una herramienta visual unificada para arquitectos, desarrolladores y administradores de bases de datos (Figura 16) proporciona modelado de datos, desarrollo de SQL y herramientas de administración integrales para la configuración del servidor, administración de usuarios, copias de seguridad y mucho más (Figura 17).



Figura 16.- Logotipo del SGBD MySQL
(ORACLE Corporation, 21)



Figura 17.- Página de arranque de MySQL
Workbench (Ravikiran, 2023)

3.- JUSTIFICACIÓN

A) C# proporciona construcciones de un lenguaje natural en el cual crear y usar componentes de software. (Wagner, y otros, 2023).

B) Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) completo para escribir, editar, depurar y compilar el código y, luego, implementar la aplicación. (Anand, y otros, 2023).

C) El software MySQL ofrece un servidor de base de datos SQL (lenguaje de consulta estructurado) muy rápido, multiproceso, multiusuario y robusto (ORACLE, 2023)

D) El IDE Arduino es un conjunto de herramientas de software que permiten a los programadores desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que nuestro Arduino funcione como queramos. (Electronics, 2024)

E) La principal ventaja del gasificador de flujo ascendente es su construcción simple, su capacidad de gasificar biomásas con alto contenido de humedad, su alta conversión de charcoal y su alta eficiencia térmica (Rev. ciênc. exatas, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 63-69, 2006)

4.- OBJETIVOS

4.1.- Objetivo General

Generar un sistema de monitoreo de la temperatura dentro de un prototipo de gasificador de flujo ascendente.

4.2.- Objetivos particulares

- Desarrollar un sistema computacional capaz de mostrar las temperaturas monitoreadas y almacenarlas una base de datos para el resguardo de la información obtenida.
- Tecnología electrónica basada en lenguaje Arduino, esto para las tomas de las muestras provenientes de los sensores utilizados para la medición de temperatura
- Construcción de un prototipo de gasificador de flujo ascendente para la realización de pruebas.

5.- HIPÓTESIS

El sistema es capaz de mostrar la información adquirida por la interfaz electrónica, desde el gasificador de flujo ascendente

6.- MATERIALES Y MÉTODOS

Se muestra el siguiente esquema que muestra los pasos que se realizaron para completar el desarrollo del proyecto.

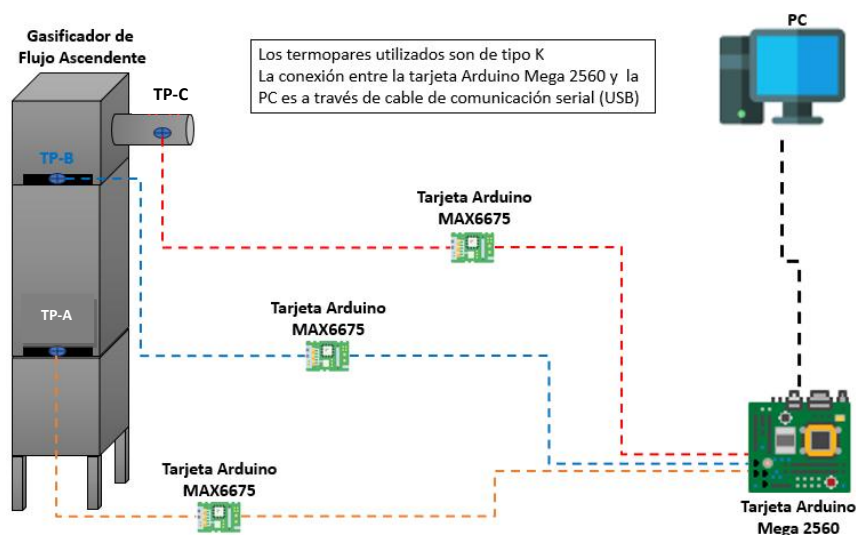


Figura 18.- Esquema de desarrollo de proceso de gasificación

Se realizaron tres desarrollos primarios, primero la construcción del prototipo de gasificador de flujo ascendente que sirvió como banco y laboratorio de pruebas que fue desarrollado de manera modular para facilitar el armado y movilidad del mismo, siendo el segundo el armado de los dispositivos electrónicos (Arduino Mega2560 y MAX6675) y sensores (termopar Tipo K) necesarios para realizar la lectura, monitoreo de las temperaturas y conversión de las mediciones, todo lo anterior para lograr la medición de las temperaturas en distintos puntos del gasificador y para terminar la programación de la parte física (electrónica) y del sistema de monitoreo junto con la base de datos donde serán almacenados los datos percibidos que sería el tercer desarrollo.

El primer módulo del gasificador fue el encargado de recibir las cenizas resultantes del proceso de degradación y pirólisis del material lignocelulósico.

El segundo módulo es el espacio encargado de recibir el material lignocelulósico y realizar las reacciones de pirólisis y oxidación (exotérmicas) de los materiales a través de la inyección de calor (endotérmicas) y la mezcla de gasificante en este caso aire. Esta parte del gasificador (reactor) contiene la cámara de combustión donde se coloca el material lignocelulósico y donde se realiza la gasificación. Contiene una mirilla de control de combustión. Además, contiene una segunda resistencia eléctrica que permite que el gas de síntesis tenga una temperatura más elevada y facilite la combustión del mismo. Por último, el tercer módulo es el espacio reservado para el escape del gas resultante de la gasificación (Syngas o gas de síntesis) el cual a través de una fuente externa de oxidación (encendedor) se realiza la combustión de los gases.

Para lograr un monitoreo en tiempo real es necesario tener los dispositivos y elementos capaces de realizar estas mediciones, para ello se tomó la decisión de hacer el desarrollo de todos ellos para bajar costos y realizar la programación a medida de las necesidades requeridas, por lo que se tomó como plataforma de desarrollo a Arduino (Cuadro 2) y sus dispositivos. Para iniciar el desarrollo fue necesario adquirir los dispositivos necesarios entre ellos la placa de programación Arduino ATmega5560 (Figura 14 y 15) que puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales para controlar casi cualquier cosa como luces, motores y otros actuadores. Tiene microcontrolador Atmel ATMEGA328P, distribución de pines XBee y controlador serial CH340. Incorpora 6 puertos de entrada analógica y 14 puertos de entrada/salida digital, además es compatible con funciones como Bluetooth, infrarrojo y otros sensores.

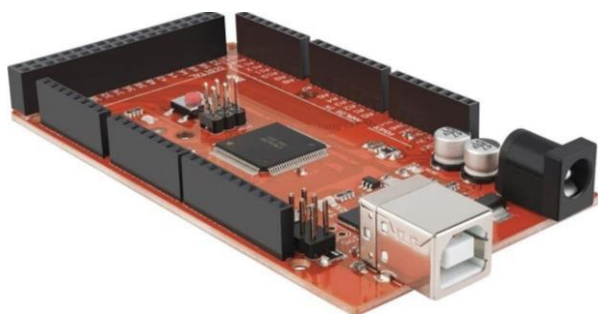


Figura 19.- Placa Controladora Arduino Mega2560

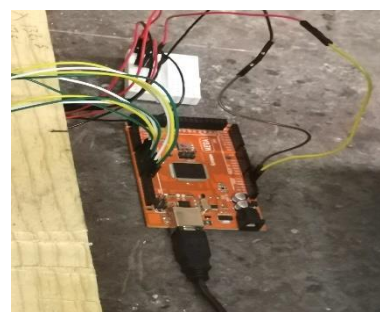


Figura 20.- Placa Programada para la Toma de Lecturas del Gasificador

Cuadro 2.- Características técnicas de la Placa Arduino Mega2560

DESCRIPCIÓN TÉCNICA
Alimentación: 5 V--- desde USB o convertidor de voltaje.
Conexión a PC: USB a USB B

Microcontrolador: ATmega328P
Controlador serial: CH340
Puertos digitales de I/O: 14
Pines PWM: 6
Puertos de entrada análoga: 6
Memoria flash: 32 kB
EEPROM: 1kB
RAM: 2 kB.
Frecuencia máxima de operación: 20 MHz
Retención de datos: Hasta 20 años a 85°C

Esta placa es la encargada de recibir todas las mediciones tomadas por las sondas de los termopares en tres puntos del gasificador. También de realizar los procesos de conteo de las mismas y separación por sonda. Está conectada vía serial a un equipo con un Software desarrollado para mostrar a través de una interfaz el valor de las medidas.

Se hizo uso de un Kit Pirómetro Digital Rex-c100 Control De Temperatura Ssr40a (Figuras 16 y 17). Este controlador de temperatura es práctico y compatible con el control inteligente de temperatura (Cuadro 3). Las sondas tienen una alta sensibilidad para garantizar mediciones precisas. El controlador multifuncional tiene un microprocesador especial y fuente de alimentación de conmutación SMT. El controlador de temperatura se puede utilizar para una amplia gama de aplicaciones.



Figura 21.- Kit Pirómetro Digital Rex-c100 Control De Temperatura Ssr40a (TECHNOLOGY, 2023)



Figura 22.- Pirómetro Armado

Cuadro 3.- Características Técnicas del Kit

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
Modelo: REX~C100FK02-V*AN
Voltaje de alimentación: 100 ~ 240 VAC
Salida: Relay 0 ~ 250 VAC 3 A

Resolución: ± 5 FS
Muestreo: 0.5 seg.
Humedad: 30 ~ 85 % RH
Voltaje de salida: 24 ~ 380 VAC
Tensión de control Relay: 3 ~ 32 VDC
Corriente de salida: 40 A
Método de control: CC ~ CA
Tiempo de conmutación: ≤ 10 ms
Rango de temperatura configurable: 0 a 1300 °C

El embalaje incluye: Un Controlador de Temperatura Rex-c100, dos sensores de sonda termopar tipo K y un relay de estado sólido SSR 40 DA, que serán los encargados de monitorear y encender las resistencias eléctricas dentro de los módulos uno y dos, del gasificador.

Existen muchos sensores de temperatura en el mercado, sin embargo, las soluciones basadas en silicio, como el LM35 (Figura 18) por citar un ejemplo que sea familiar, están normalmente limitados a un rango de temperatura por debajo de los 150 grados centígrados. Lo que los deja fuera de consideración cuando debemos monitorear algún proceso con temperaturas superiores. Afortunadamente los termopares vienen a salvar el día, permitiéndonos mediciones en un rango más amplio (Cuadro 4), usualmente de varias centenas de grados centígrados y sin un costo excesivo.



Figura 23.- Termopar o Termocupla tipo K (TECHNOLOGY, Mercado Libre, 2023)

Cuadro 4.- Características Técnicas de la Termocupla

Características de la Termocupla:
Termocupla Tipo K de tornillo
permite medir directamente todo tipo de proceso de producción desde 0 -800°C
Usado en líquido, vapor, gas o la superficie de un sólido.
Rosca M6

Longitud de cable: 15 cm
Rango de Temperatura: 0 – 800°C
Longitud del sensor: 25mm

El circuito integrado MAX6675 de Maxim Dallas Semiconductor es un convertidor analógico – digital para termocuplas tipo K (Figura 19). Permite obtener la temperatura de una termocupla análoga, pero en formato digital (Cuadro 5). Dentro de este módulo se encuentra toda la electrónica necesaria para amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por la termocupla, lo que hace muy sencilla la tarea de conectar un sensor de temperatura a un microcontrolador.

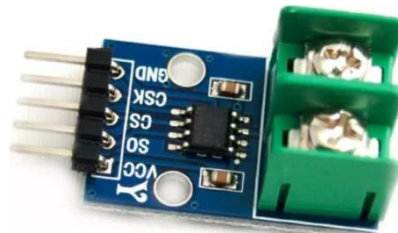


Figura 24.- Circuito Integrado Arduino MAX6675 (MECATRONICA, 2023)

Cuadro 5.- Características Técnicas de la Tarjeta MAX6675

Características del ADC de MAX6675:
Interfaz compatible con SPI sólo de lectura
Resolución: 12 bits
Medición hasta 1024 °C (con la termocupla adecuada)
Alimentación: 3.3 a 05 volts
Frecuencia de reloj SPI máxima F _{scl} 4.3 Mhz
Tiempo de conversión: 0.17 s (máximo 0.22 segundos)
Consumo máximo: 1.5 mA

Para alimentar la combustión de aire se hizo uso de la Sopladora eléctrica de 960 W, Truper. La cual se mantenía encendida para generar el ingreso del aire necesario.



Figura 25.- Sopladora eléctrica de 960 W, Truper, (C.V., 2025)

Cuadro 6.- Especificaciones técnicas Sopladora eléctrica Truper

Especificaciones	
Potencia:	960 W
Volumen de aire:	160 CFM
Velocidad:	257 km/h
Tensión/Frecuencia:	127 V / 60 Hz
Consumo:	8 A
Dimensiones:	77 cm x 25 cm
Ciclo de trabajo:	50 minutos de trabajo por 20 minutos de descanso. Máximo diario 6 horas
Peso:	1.7 kg

Después del armado del gasificador y de la conexión de las interfaces, se encendió el pirómetro para comenzar a calentar la resistencia de ignición hasta los 120° C. Y realizar un precalentamiento de la cámara de combustión para facilitar la combustión del material lignocelulósico, en este caso se usó aserrín. Y se alimentó con la sopladora de aire Truper. Manteniendo encendido el soplador por 15 minutos generando **67960.43** l/min por corrida y 800 gr. de astillas. Y las mediciones de temperatura fueron de tres puntos específicos en la cámara de combustión, en el cabezal hay dos termopares uno en la entrada del syngas desde la cámara al cabezal y el último en la salida del mismo donde se le acerca flama para la combustión de éste.

7.- Resultados

Todo el desarrollo se puede considerar el armado físico del gasificador de flujo descendente como la primera parte del proceso completo, ya concluido el armado se debe proceder a realizar las pruebas y el monitoreo de las temperaturas de las mismas. Para lograr lo anterior se requiere armar la interfaz que será la encargada de realizar la conversión de las lecturas de los dispositivos a una interpretación visual. La figura 20 muestra la interfaz electrónica (dispositivos necesarios y que se conectan al gasificador).

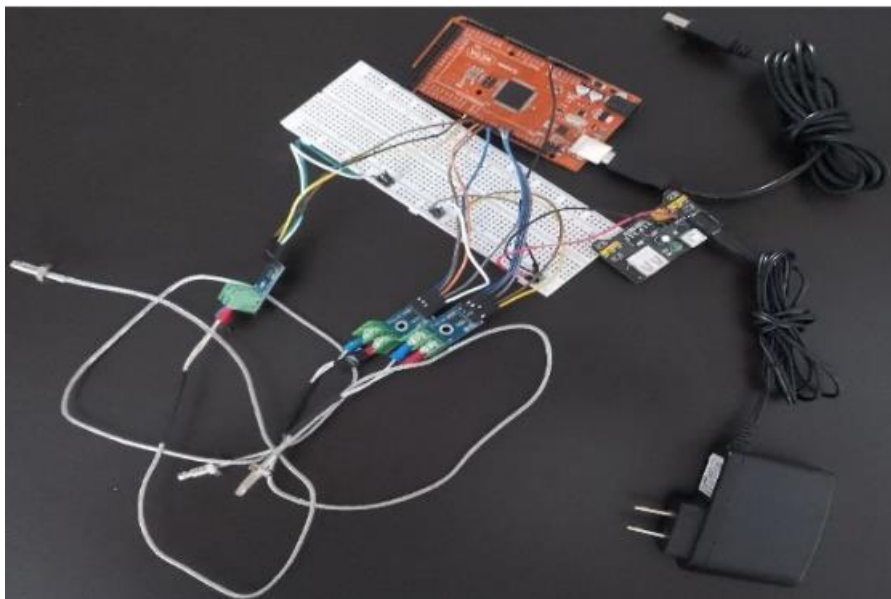


Figura 26.- Placa madre (Mega2560) junto con los termopares tipo K conectados a los circuitos Max6675.

7.1.- Armado Físico y Electrónico

El prototipo de gasificador de flujo ascendente su principal ventaja es su construcción simple, su capacidad de gasificar biomasas con alto contenido de humedad, su alta conversión de Char y su alta eficiencia térmica. Para mejorar y facilitar el uso del gasificador se construyó de manera modular, formado por tres secciones principales que serían el cenicero que sirve de base para los otros dos módulos, el intermedio es el conformado por el reactor o cámara de combustión en dónde se llevan a cabo las etapas de gasificación (secado, pirólisis, reducción y combustión) y el cabezal para la combustión del gas de síntesis. A continuación, se detallarán cada uno de los módulos del gasificador.



Figura 27.- Gasificador en proceso de armado para mostrar que es modular

7.1.1.- Primer Módulo: Cenicero o Base

En la figura 28 se muestra el cenicero o primer módulo del gasificador encargado de recibir las cenizas resultantes del proceso de degradación y pirólisis del material lignocelulósico. En la figura 29 se indica dónde está localizado el acceso del gasificante (aire) al cenicero y la figura 30 muestra la resistencia eléctrica encargada de generar la combustión del material lignocelulósico.



Figura 28.- Cenicero o base



Figura 29.- Entrada de gasificante



Figura 30.- Resistencia eléctrica

7.1.2.- Segundo Módulo: Cámara de Combustión o Reactor

Es el espacio encargado de recibir el material lignocelulósico y realizar las reacciones de pirólisis y oxidación (exotérmicas) de los materiales a través de la inyección de calor (endotérmicas) y la mezcla de gasificante en este caso aire.

En la figura 31 se muestra el gasificador (reactor) dónde se encuentra la cámara de combustión donde se coloca el material lignocelulósico y realizar la gasificación, en la figura 32 se pueden ver el acceso de alimentación de material para el reactor en la parte derecha de la imagen y del otro la mirilla de control. La figura 33 se observa la segunda resistencia eléctrica del gasificador que permite que el gas de síntesis tenga una temperatura más elevada y facilite la combustión del mismo y la figura 34 muestra una imagen frontal de la mirilla de control.



Figura 31.- Reactor de gasificación



Figura 32.- Alimentador



Figura 33.- Resistencia eléctrica



Figura 34.- Mirilla

7.1.3.- Tercer Módulo: Cabezal de Combustión de Gases

Espacio reservado para el escape del gas resultante de la gasificación (Syngas o gas de síntesis) el cual a través de una fuente externa de oxidación (encendedor) se realiza la combustión de los gases. En la figura 22 se puede observar el cabezal con la salida de gas para quemar mientras que en la figura 23 se muestra la llave de paso que se usa para ir regulando la cantidad de oxígeno (aire) para facilitar la combustión del mismo.



Figura 35.- Vista del cabezal con la salida del gas



Figura 36.- Vista lateral izquierda donde se ve la llave de paso de aire para mejorar la combinación de syngas con oxígeno

Y concluyendo con el desarrollo completo del gasificador de pruebas.



Figura 37.- Gasificador armado con sus tres módulos de flujo ascendente

7.2.- Conexión de Electrónica y Monitoreo

El armado modular del gasificador, consta del cenicero que debe estar bien cerrado ya que cuenta con la salida las cenizas, la cámara de combustión o gasificador y el cabezal, todo se muestra en la figura 22.



Figura 38.- Prototipo de gasificador en proceso de armado para comenzar pruebas

A la par es necesario ir colocando la electrónica y termopares para la tomas de las madecciones de las temperaturas entre estos son la tarjeta Mega2560 y los sensores de temperatura en los puntos a medir. En la figura 23 se muestran los puntos de conexión de los termopares con el gasificador y las resistencias de ignición, primer resistencia se encuentra cn el primer módulo o cenicero, la segunda en la cámara de combustión, y un termopar conectado justo arriba de la primer resistencia que medira la cama de material.



Figura 39.- Termopar y resistencias conectadas en el cenicero y cámara de combustión

En el cabezal están puestos dos termopares en la figura 24 se muestra uno para medición de la temperatura de los gases resultantes y otro en la salida de ignición de mismos.



Figura 40.- Termopares conectadas en el cabezal y salida de Syngas

Todo lo anterior conectado en conjunto a la tarjeta Arduino Mega y al pirómetro (Figura 41). La primera para el procesamiento de las mediciones provenientes de los termopares y el segundo para el calentamiento de las resistencias dentro del gasificador.



Figura 41.- Instalación de pirómetro y conexión de termopares con la tarjeta Arduino Mega

El último paso es conectar la tarjeta Arduino Mega por medio de cable serial al equipo de cómputo y éste a su vez al sistema de monitoreo y la base de datos (Figura 26).



Figura 42.- Equipo de cómputo conectado al gasificador para realizar el monitoreo

7.3.- Preparación de las muestras para gasificar

Para iniciar las pruebas de gasificación es necesario realizar las mediciones de pesaje de astillas de madera de *Pinus* spp. haciendo uso de una báscula electrónica (Figuras 27 y 28). Las muestras utilizadas fueron de 800 g. por cada una de las corridas que se realizaron.

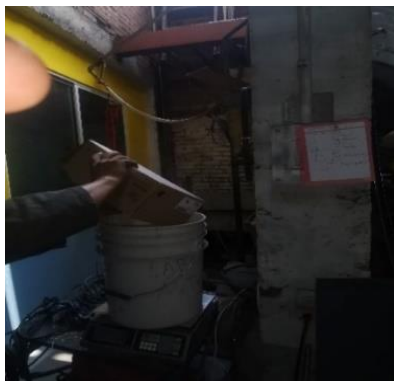


Figura 43.- Llenado de astillas de Pino SPP en la barrica plástica para el pesaje



Figura 44.- Astillas dentro de la barrica

Para dar inicio al precalentamiento del gasificador y comenzar las pruebas o corridas, se necesita utilizar un material no considerado como tal ya que su función solo es para precalentar, y es el aserrín ya que facilita que aumente la temperatura (Figura 29).



Figura 45.- Aserrín de desecho para precalentar el gasificador

Se debe encender el pirómetro a 130°C (Figura 30 y 31) para comenzar a calentar la resistencia y la cámara de combustión. En la figura 53 se muestran dos medidas donde la medida verde es la temperatura programada y la roja es la medida en tiempo real del termopar mientras que la figura 54 nos muestra la resistencia ya en la temperatura marcada.



Figura 46.- Pirómetro programado a 130°C para comenzar a calentar las resistencias en el gasificador



Figura 47.- Resistencia ya caliente para realizar el precalentamiento

El precalentamiento del gasificador es necesario ya que la temperatura de la resistencia y la del gasificador se reducen una vez que se le coloca el material para realizar las corridas o pruebas. Para

ello es necesario alimentar el gasificador a través de la entrada diseñada para esa función que se muestra en la figura 48 y la cámara ya con el material en la figura 49.



Figura 48.- Entrada de alimentación para la cámara de combustión del gasificador



Figura 49.- Vista superior de la entrada de alimentación donde se puede observar el material dentro de la cámara ya precalentada

Este proceso de precalentamiento se hizo solamente al arrancar cada una de las corridas para que los resultados estuvieran bajo las mismas condiciones, durante el proceso de gasificación se mantuvo un monitoreo constante de las temperaturas desde el inicio hasta el final del mismo. Para iniciar las corridas las astillas se colocan dentro una barrica plástica y se pesan para obtener tres muestras de 800_{gr}. Las cuales serán utilizadas en tres corridas a las que se les realizará el monitoreo de las temperaturas. Todo lo anterior para la preparación de las muestras.



Figura 50.- Pesaje para primer corrida



Figura 51.- Pesaje para segunda corrida



Figura 52.- Pesaje para tercer corrida

Una vez hecho el acondicionamiento, los valores de las temperaturas pueden visualizarse en el sistema en tiempo real (Figuras 53 a 56).



Figura 53.- Imagen de toma de temperaturas de la primera corrida de gasificación



Figura 54.- Imagen de toma de temperaturas de la segunda corrida de gasificación



Figura 55.- Imagen de toma de temperaturas de la tercera corrida de gasificación



Figura 56.- Imagen de toma de temperaturas del precalentamiento de las temperaturas ambiente

El sistema también nos muestra las temperaturas tomadas por los termopares de forma gráfica que nos permite ver el comportamiento que va teniendo el proceso de gasificación. Para ver este

comportamiento se muestran a continuación las gráficas tomadas de las tres corridas de prueba, en la figura 57 nos muestran las gráficas del precalentamiento del gasificador y en las figuras 58, 59 y 60 las correspondientes a las tres corridas de prueba de gasificación. Todas fueron creadas en tiempo real y durante todo el tiempo que duraron las pruebas.

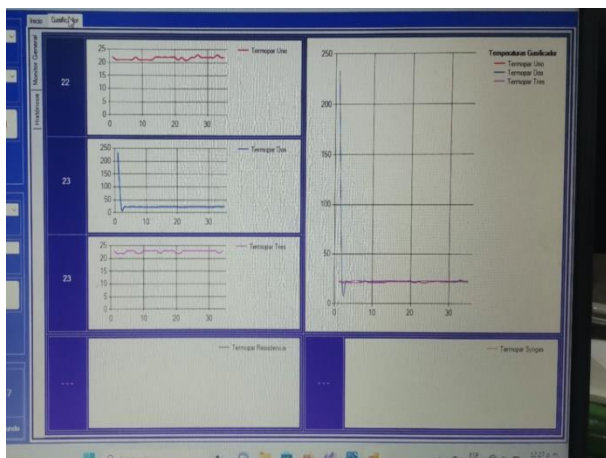


Figura 57.- Comportamiento de la temperatura del proceso de precalentamiento del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres

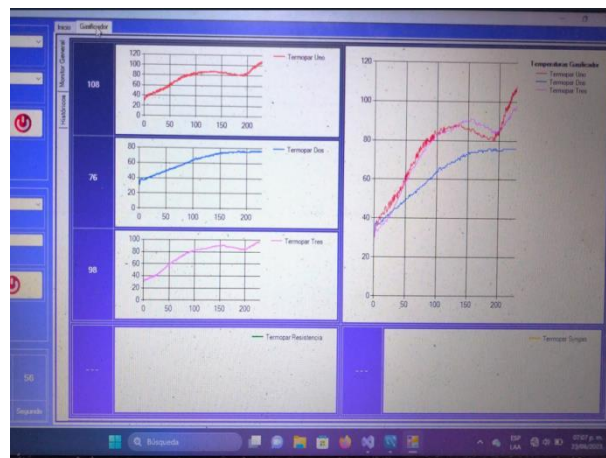


Figura 58.- Comportamiento de la temperatura la primera corrida de prueba del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres



Figura 59.- Comportamiento de la temperatura de la segunda corrida de prueba del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres

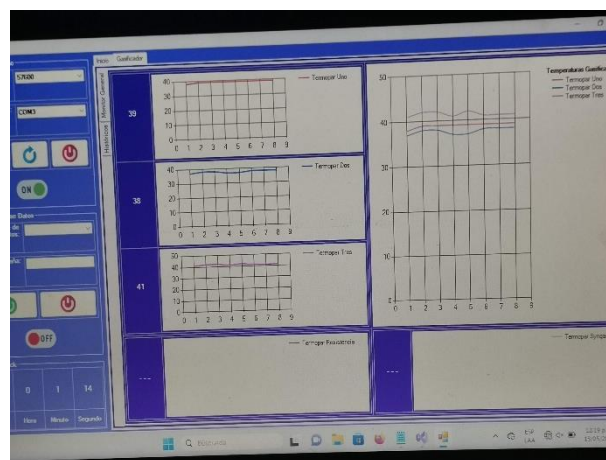


Figura 60.- Comportamiento de la temperatura de la tercera corrida de prueba del gasificador, una por cada uno de los sensores y una comparativa de los tres

Durante el precalentamiento se le colocó un encendedor a la salida del cabezal para verificar que el material (aserrín) generaba el suficiente Metano en el gas de síntesis para lograr quemarse al acercarle una fuente de calor directo. Esto para ver si el gasificador no presentaba alguna fuga de calor,

materiales, gases o algún otro problema. Y de esta manera asegurarse que el esamble de los módulos si mantenían la unión de manera estable.



Figura 61.- Intento de combustionar el metano presente en el gas de síntesis en el precalentamiento del gasificador.

La presencia del metano contenido en el gas de síntesis fue el suficiente para realizar combustión con la fuente de calor en lo que fueron las corridas. En la figura 61 se muestra el inicio de encendido del gas de síntesis.



Figura 62.- Combustión del metano en el gas de síntesis

Una vez que el proceso de gasificación comienza a normalizarse la producción del gas de síntesis se mantiene en la producción del mismo, logrando una combustión continua del mismo (Figura 62).



Figura 63.- Combustión sostenida en la salida de gas del gasificador

7.4.- Medición de variables en el proceso de gasificación

En el cuadro 6 se muestra el resumen de datos que se obtuvieron de las tres corridas hechas y de cada uno de los tres termopares colocados en el gasificador. Los cuales fueron obtenidos por el sistema que se desarrolló especialmente para tal función y almacenados en la base de datos con el sistema gestor MySQL.

Cuadro 7.- Resumen de datos de los tres termopares en las tres corridas de gasificación

Corrida	1			2			3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
n	95			95			78		
Σ	13633	8268	10352	12524	7980	11831	11319	8101	10674
$\bar{X}$	143.51	87.03	108.97	131.83	84.00	124.54	145.12	103.86	136.85
S^2	13.98	8.39	17.39	9.06	4.19	12.86	15.49	6.70	16.76

Máximo	165	103	146	151	93	150	166	117	163
Mínimo	114	73	88	114	77	102	114	93	110

En la figura 64 se muestra que se tuvo como factor principal para el análisis de los datos, la temperatura del termopar A que se encuentra ubicado en la cámara de gasificación. Y que se tomó como temperatura inicial de 114° C.

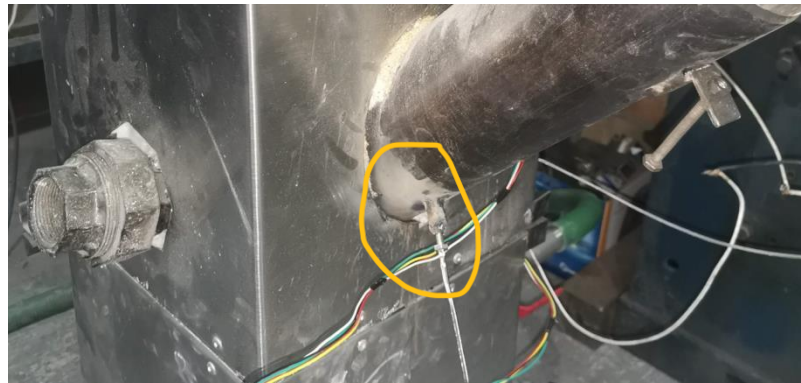


Figura 64.- Colocación del Termopar A en el gasificador, justo al final del tubo de alimentación e inicio de la cámara de gasificación.

En la figura 65 se puede ver el comportamiento de las temperaturas en los tres termopares ubicados en el gasificador en relación con el tiempo transcurrido entre cada lectura que fue de 10 segundos en la primera corrida. De igual forma en las figuras 66 y 67 se muestran las gráficas de las temperaturas de las dos corridas faltantes.

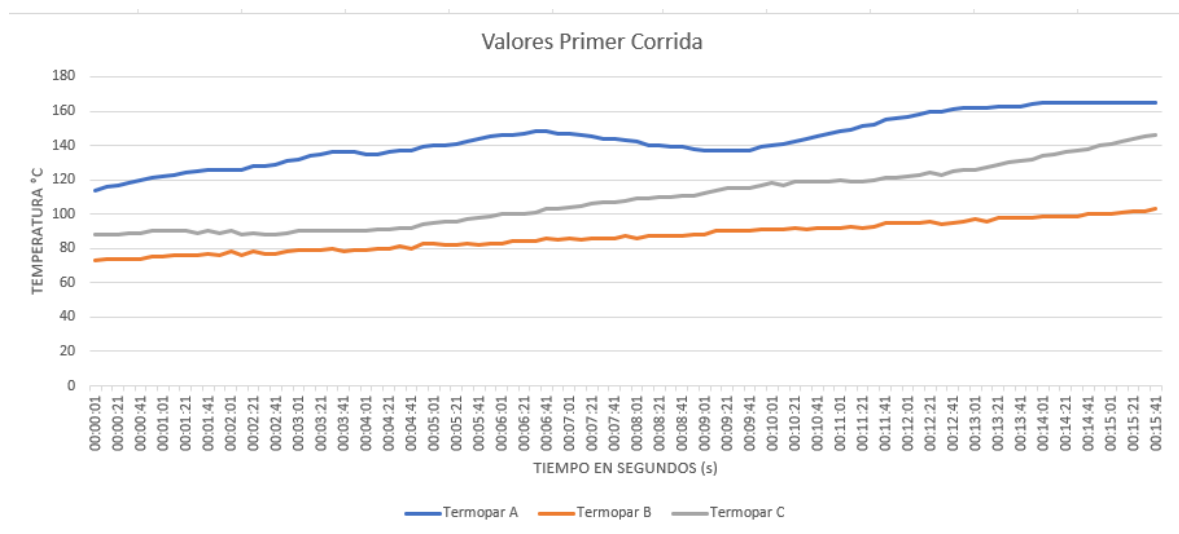


Figura 65.- Temperaturas de los tres termopares en la primera corrida

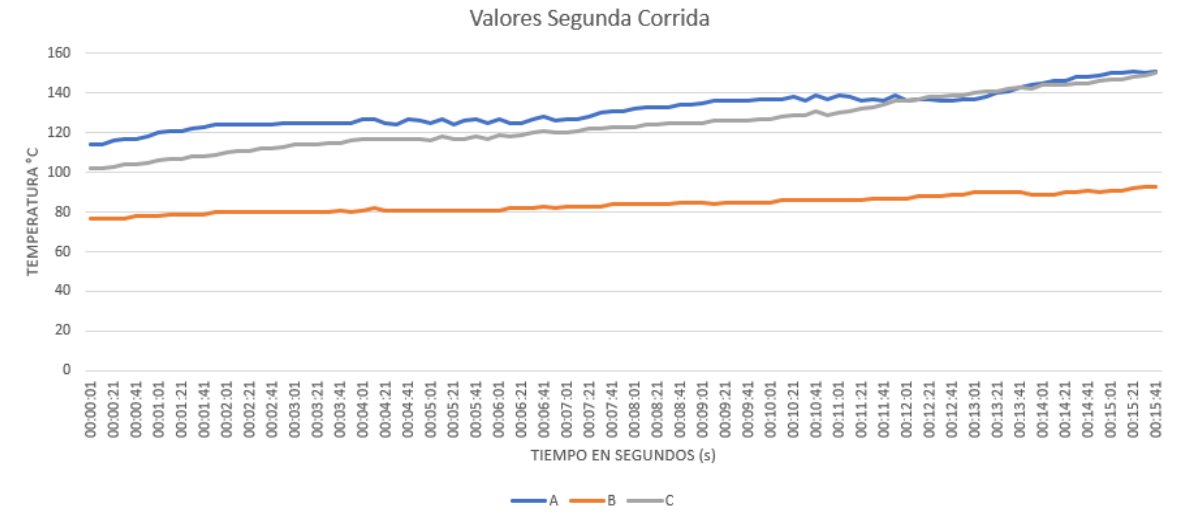


Figura 66.- Temperaturas de los tres termopares en la segunda corrida

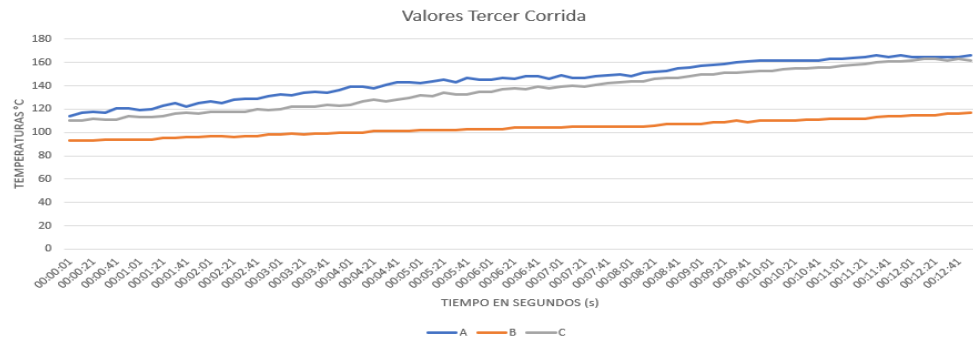


Figura 67.- Temperaturas de los tres termopares en la tercera corrida

El cuadro 7 muestra el resumen y comparación entre las temperaturas tomadas por un mismo termopar en cada una de las corridas.

Cuadro 8.- Resumen de datos de los termopares (A, B y C) en cada corrida (C1, C2 y C3)

Termopar	A		
	C1	C2	C3
n	95	95	78
Σ	13633	12524	11319
$\bar{X}$	143.51	131.83	145.12
S^2	13.98	9.06	15.49
Máximo	165	151	166
Mínimo	114	114	114
Termopar	B		

Corrida	C1	C2	C3
n	95	95	78
Σ	8268	7980	8101
$\bar{X}$	87.03	84.00	103.86
S^2	8.39	4.19	6.70
Máximo	103	93	117
Mínimo	73	77	93
Termopar	C		
Corrida	C1	C2	C3
n	95	95	78
Σ	10352	11831	10674
$\bar{X}$	108.97	124.54	136.85
S^2	17.39	12.86	16.76
Máximo	146	150	163
Mínimo	88	102	110
n	10352	11831	10674

Las figuras 68 a 70 muestran la gráfica de comparación en las temperaturas del mismo termopar en cada una de las corridas.

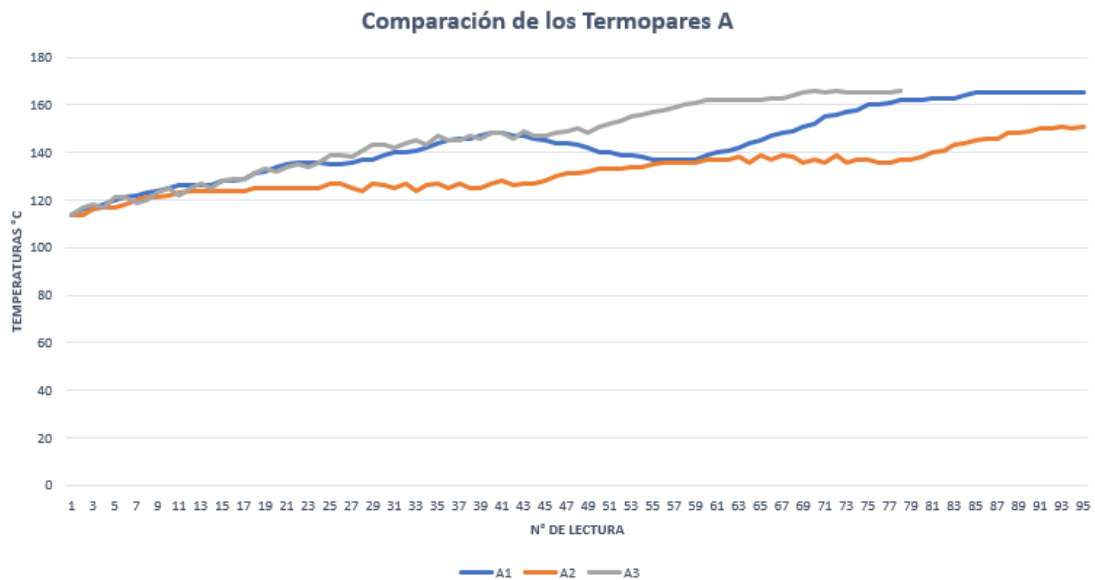


Figura 68.- Temperaturas del termopar A en cada una de las corridas

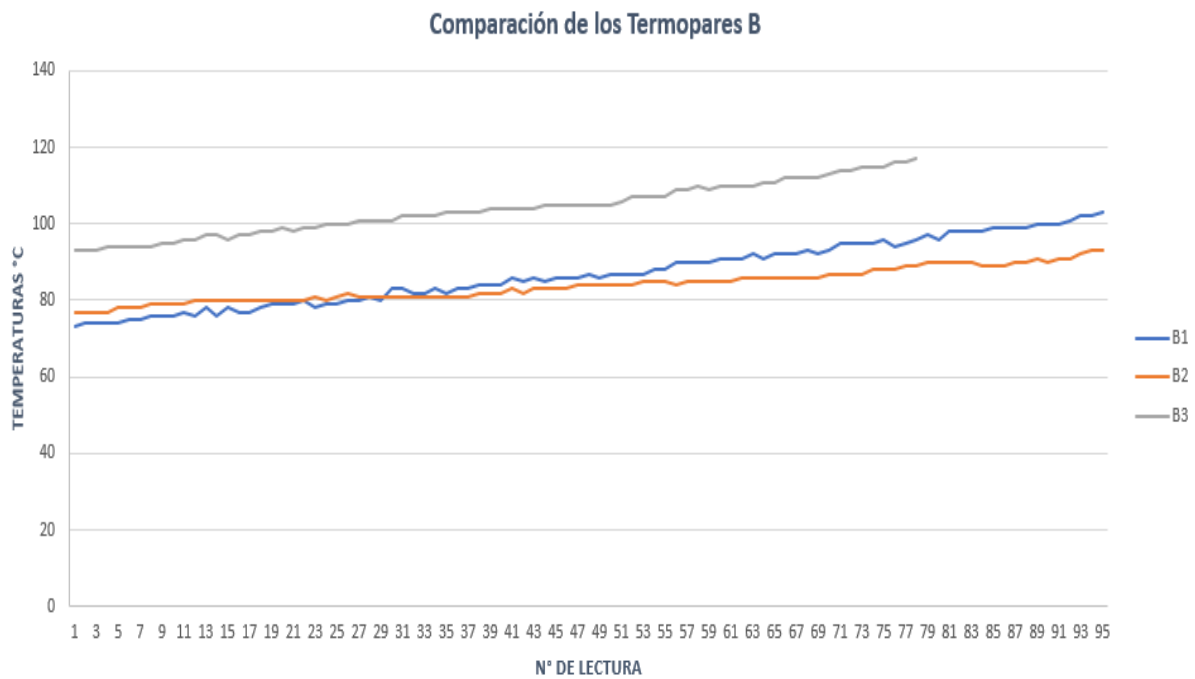


Figura 69.- Temperaturas del termopar B en cada una de las corridas

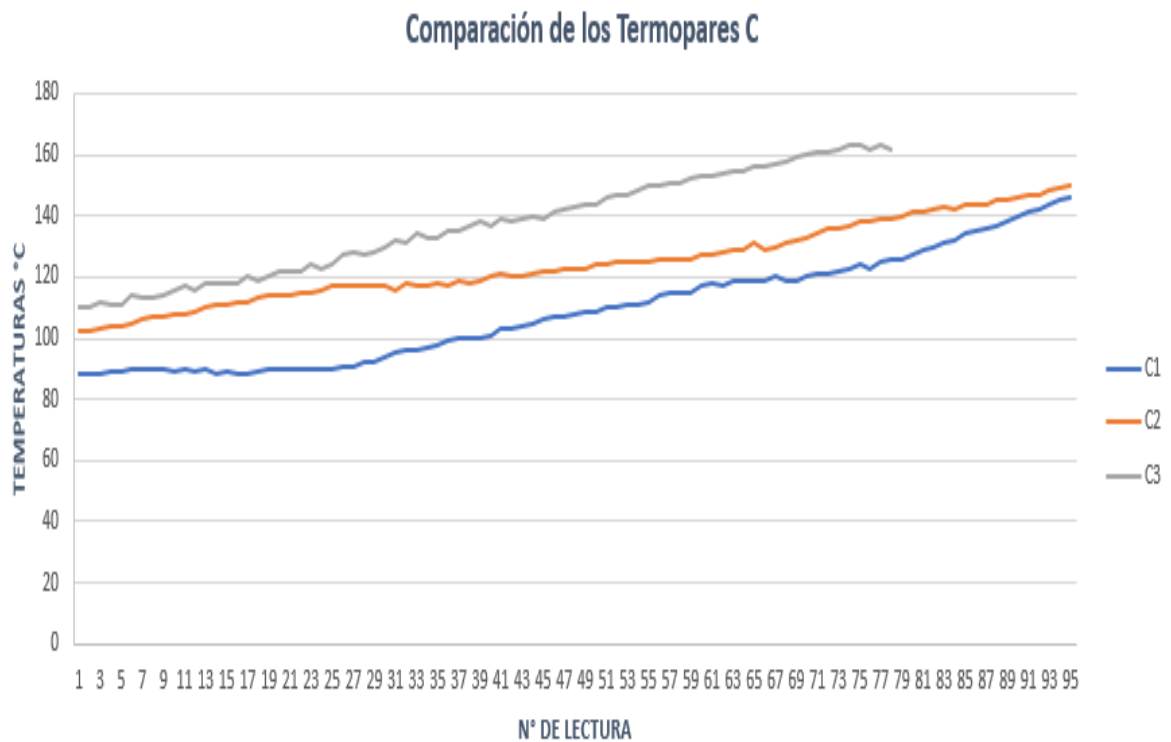


Figura 70.- Temperaturas del termopar C en cada una de las corridas

8.- DISCUSIÓN

A lo largo de la experimentación se presentaron distintos ambientes en los que se realizaron las corridas para gasificar las astillas de Pino. El total de mediciones en las primeras dos corridas dieron un número igual de mediciones (95) mientras que en la última corrida solo fueron 78 las mediciones que registró el sistema, esto fue debido a que durante las primeras dos hubo un corte eléctrico en ambas por lo que se prolongó el proceso de gasificación lo que queda marcado con la cantidad de mediciones y en la última no ocurrió y se mantuvo el flujo constante de gasificante por lo que se redujo el número de mediciones. La utilización de la plataforma Arduino para la medición de variables en un proceso de gasificación ya se ha documentado previamente (Kamble *et al.*, 2017, Kamble *et al.*, 2019, Nzihou *et al.*, 2024). Estos autores lograron registrar valores de temperatura de hasta 1000 °C, mientras que en este estudio se lograron registrar valores hasta 145 °C.

El rango de temperatura observado en el gasificador fue de entre 84 y 145 °C. En previos estudios han propuesto cuatro etapas de gasificación: secado a 110 °C, pérdida de sustancias volátiles entre 110 y 350 °C, combustión entre 350 y 550 °C y formación de cenizas por arriba de 550 °C (Hai *et al.*, 2019, Kamble *et al.* 2019). Estos resultados podrían indicar que la combustión realizada en el gasificador pertenece a sustancias volátiles de la madera de pino y a pequeñas cantidades de compuestos presentes en el gas de síntesis como dióxido de carbono y metano. Cuando se presentan entre 100 y 150 °C se debe a la presencia de bajo flujo de aire, mientras que cuando se aumenta a flujo medio con 560 a 610 cm³ min⁻¹, la temperatura logra incrementarse hasta 400 °C (Manguiat *et al.*, 2015). Los resultados de temperatura también podrían indicar que la cantidad de aire utilizada no fue la suficiente para una combustión eficiente.

La adición de aire al gasificador de manera intermitente promueven una mayor temperatura de la gasificación. Adición de aire durante 20 s, seguido de 60 s sin adicionar aire, promueve una mayor temperatura en la cámara de combustión (Manguiat *et al.* 2015). De manera proporcional directa el tiempo también tuvo variación ya que mientras en las dos primeras corridas fue un tiempo aproximado de 25:45 minutos y en la tercera fue de 21:48 minutos, aplicando el aire de manera constante. Por lo anterior se deduce que mientras el flujo de gasificante sea constante el tiempo de duración del proceso de gasificación se reduce, aunque las temperaturas observadas fueron bajas y no hubo tantas variaciones entre ellas.

Las fluctuaciones de la temperatura están asociadas al tipo de material (Kamble *et al.* 2019).

Manguiat y col. (2015) observaron una temperatura menor a 150 °C con baja cantidad de aire, lo

cual coincide con los resultados observados en este experimento. Por tanto, para incrementar la temperatura del gasificador se debe suministrar una mayor cantidad de aire.

9.- CONCLUSIONES

Por lo expuesto en el primer párrafo de la discusión se deduce que mientras el flujo de gasificante sea constante el tiempo de duración del proceso de gasificación se reduce, aunque las temperaturas de mantuvieron constantes en todos los experimentos y no hubo tantas variaciones entre ellas.

La medición precisa de la temperatura en todo el gasificador y en los componentes del sistema es fundamental para mejorar el conocimiento sobre el rendimiento de la gasificación. Las fluctuaciones asociadas en el tamaño, cantidad de material y gasificante suministrado pueden afectar significativamente la temperatura del sistema y calidad del gas. El sistema de instrumentación se está ampliando para proporcionar más datos sobre el proceso de gasificación y permitir el desarrollo de sistemas de control. Se pueden implementar sistemas robustos y de bajo costo en gasificadores a gran y pequeña escala para aumentar su perfil operativo y aumentar su tolerancia a variación de la materia prima.

10.- BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, L. M., Verdeza, A., Bula, A. J., & Lombana, J. (2016). Optimización de las Condiciones de Operación de la Micro Gasificación de Biomasa para Producción de Gas de Síntesis. *Información Tecnológica*, 27(3), 179-188. doi:10.4067/S0718-0764201600030001
- Álvarez, A. (10 de 02 de 2018). *Wikipedia*. Recuperado el 08 de 01 de 2024, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Csharp_Logo.png
- Anand, M., Hogeson, G., Harvey, B., Huff, A., Cai, S., Miller, P., . . . Warren, G. (31 de 10 de 2023). *Microsoft*. Recuperado el 11 de 01 de 2024, de Microsoft: <https://learn.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2022>
- Anis, S., & Zainal, Z. A. (06 de 2011). Tar Reduction In Biomass Producer Gas Via Mechanical, Catalytic And Thermal Methods: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2355 - 2377.
- Arduino. (06 de 04 de 2022). *Wikimedia Commons*. Recuperado el 08 de 01 de 2024, de Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino_Logo_Registered.svg
- Ariztizábal-Álvarez, M., & Valencia-Naranjo, L. (2015). Diseño Conceptual de un Gasificador para la Producción de Gas de Síntesis a Partir de Residuos de Poda Generados en la Universidad EAFIT. Medellín, Medellín, Colombia.
- Bandara, J. C., Jaiswal, R., Nielsen, H. K., & Moldestad, B. M. (12 de 06 de 2021). Air Gasification Of Wood Chips, Wood Pellets And Grass Pellets In A Bubbling Fluidized Bed Reactor. *Energy*(233). doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121149>
- Baray-Guerrero, M., Porras-Flores, D. A., Hoffman-Esteves, H. E., & Manjarrez-Domínguez, C. B. (06 de 2019). Tratamiento de la Biomasa Lignocelulósica Mediante la Pirolisis Lenta y a Baja Temperatura para la Producción de Biocombustibles . *Revista de Energías Renovables*, 3(9), 1-9. doi:10.35429/JRE.2019.9.3.1.9
- Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, R. M. (23 de 06 de 2003). Energy From Gasification Of Solid Wastes. *Waste Management*, 23(1), 1-15.
- Candelas, F., García, G., Puente, S., Pomares, J., Jara, C., Pérez, J., . . . Torres, F. (2015). Experiences on Using Arduino for Laboratory Experiments of Automatic Control and Robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 105-110.

- Carballo Abreu, L. R., Márquez Montesino, F., Luz Silveira, J., Godoy Júnior, E., & Zanzi, R. (2005). Energía a Partir del Biogás, Gas de Madera y Sistemas Fotovoltaicos en Propiedades Rurales. *Rev. Ciênc. Exatas, Taubaté*, 11(1), 53-61.
- Castellanos-Contreras, J. U., Forero-Núñez, C. A., & Sierra-Vargas, F. E. (15 de 12 de 2015). Ingeniería Básica y de Detalle para la Instrumentación de una Planta Prototipo de Gasificación de Lecho Fijo. *ITECKNE*, 12(2), 146-155. Recuperado el 01 de 11 de 2023
- Curbelo Alonso, A. (2018). *Apoya CONAFOR Producción de Energía con Biomasa Forestal en Durango y Chihuahua*. Comisión Nacional Forestal, Gobierno de México. CONAFOR. Obtenido de <https://www.gob.mx/conafor/prensa/apoya-conafor-produccion-de-energia-con-biomasa-forestal-en-durango-y-chihuahua>
- Durán García, M. E. (27 de 07 de 2016). Gasificación del Aserrín de Pino (*Pinus Arizonica*) en un Reactor de Lecho Fluidizado: Análisis de las Variables del Proceso. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 18(4).
- Electronics, M. (2024). *arduino.cl*. Recuperado el 08 de 01 de 2024, de [arudino.cl: https://arduino.cl/programacion/](https://arduino.cl/programacion/)
- Energy, P. N. (07 de 01 de 2024). *Made in China*. (P. N. Energy, Productor, & PULITA New Energy) Recuperado el 2024, de Made in China: https://es.made-in-china.com/co_pulitaenergy/product_Biomass-Gasification-Power-Plant-Wood-Gasifier-for-Sale_esiryiseu.html
- Garda, F. (28 de 11 de 2020). *Wikimedia Commons*. Recuperado el 08 de 01 de 2024, de Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino3.gif>
- Ghassemi, H., & Shahsavan-Markadeh, R. (03 de 2014). Effects Of Various Operational Parameters On Biomass Gasification Process; A Modified Equilibrium Model. *Energy Conversion and Management*, 79, 18-24.
- Hai, I. U., Sher, F., Yaqoob, A., & Liu, H. (2019). Assessment of biomass energy potential for SRC willow woodchips in a pilot scale bubbling fluidized bed gasifier. *Fuel*, 258, 116143.
- Higman, C., & van der Burgt, M. (2008). *Gasificación* (Segunda ed.). (Elsevier, Ed.) Burlington, MA, USA: Gulf Professional Publishing.

- Kamble, P., Khan, Z., Capper, S., Sharp, J., & Watson, I. (08 de 2017). Improving Downdraft gasifier stability by Robust Instrumentation and Control Systems. *Energy Procedia*(142), 2214-2217.
- Kamble, P., Khan, Z., Gillespie, M., Farooq, M., McCalmon, J., Donnison, I., & Watson, I. (22-25 de Agosto de 2019). Biomass Gasification of Hybrid Seed Miscanthus in Glasgow's Downdraft Gasifier Testbed System. *Energy Procedia*, 158, 1174-1181.
- Lesme Jaén, R., Martínez, J., Viera Andrade, R., & Silva Lora, E. E. (04 de 2011). Evaluación Teórico Experimental de un Sistema Avanzado Gasificador de Biomasa/Motro Reciprocante para la Generación de Electricidad. (Parte I). *Tecnología Química*, 31(2), 203.
- Leyva Ovalle, Á., Valdez Lazalde, J. R., de los Santos Posadas, H. M., Martínez Trinidad, T., Herrera Corredor, J. A., Lugo Espinoza, O., & García Nava, J. R. (2017). Monitoreo de la Degradación Forestal en México con Base en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Infys). *Madera y Bosques*, 23(2), 69-83.
- Lombeida, J., & Delgado, E. (2021). Diseño de un Secador de Lecho Fluidizado para Uso de Laboratorio en Estudios de Biomasa. *Encuentro Iberoamericano de Redes de BiomBioenergía: Camino a la Sustentabilidad Energética*, (págs. 27-32).
- Manguiat, N. A. S., Marco, O. C., Miranda, C. M. N., Moren, K. O., & Magnaye, R. L. R. R. C. (2015). Design and Development of a Wood-Fired Gasifier Prototype for Synthesis Gas Production and Analysis. *Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research*, 3(5).
- McKendry, P. (2002). Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47-54.
- MECATRONICA, D. (01 de 12 de 2023). *Mercado Libre*. Obtenido de Mercado Libre: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-604734106-termopar-k-modulo-max6675-_JM#position=7&search_layout=grid&type=item&tracking_id=1aaeb957-ac72-421c-b87e-c418881bbf21
- Microsoft. (01 de 06 de 2019). *Wikipedia*. Recuperado el 11 de 01 de 2024, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio#/media/Archivo:Visual_Studio_Icon_2019.svg
- Microsoft. (17 de 04 de 2020). *Wikipedia*. Recuperado el 08 de 01 de 2024, de Wikipedia: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Microsoft_.NET_logo.svg

- Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., & Gómez-Barea, A. (2011). Characterization and Prediction of Biomass Pyrolysis Products. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(5), 611-630.
- Nzihou, J. F., Hamidou, S., Zoundi, O., Ouattara, F., & Segda, B. G. (2024). Cost-Effective Monitoring of the Fuel Air Equivalence-Ratio with a Lambda Sensor and a Microcontroller in a Downdraft Biomass Gasifier. *Open Journal of Applied Sciences*, 14(2), 545-560.
- ORACLE. (21 de 12 de 2023). *MySQL*. (Oracle and/or its affiliates) Recuperado el 10 de 01 de 24, de MySQL: <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.2/en/>
- ORACLE. (2024). *MySQL*. Recuperado el 10 de 01 de 2024, de MySQL: <https://www.mysql.com/products/workbench/>
- ORACLE Corporation. (08 de 05 de 21). *Wikimedia Commons*. Recuperado el 10 de 01 de 2024, de Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MySQL_textlogo.svg
- Ravikiran, A. (30 de 04 de 2023). *Simpli Learn*. Obtenido de Simpli Learn: <https://www.simplilearn.com/tutorials/mysql-tutorial/mysql-workbench-installation>
- Solé, A. C. (2010). *Instrumentación Industrial* (8va. ed.). (A. G. Editor, Ed.) Barcelona, España: Marcombo.
- Sosa Cedillo, V. E., Ojeda Trejo, R., Escoto Prado, J. C., Maldonado Hernández, J. J., & Medina Sandoval, F. (2020). *Estado que Guarda el Sector Forestal en México: Bosques para el Bienestar Social y Climático*. Comisión Nacional Forestal, Coordinación de Apoyo y Proyectos Especiales. Jalisco: Comisión Nacional Forestal.
- TECHNOLOGY, T. (01 de 12 de 2023). *Mercado Libre*. Obtenido de Mercado Libre: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1375707284-kit-pirometro-rex-c100-control-temperatura-relay-ssr-k-_JM#position=4&search_layout=grid&type=item&tracking_id=96e1a360-770a-4d77-92dc-d48d2ac57c75
- TECHNOLOGY, T. (01 de 12 de 2023). *Mercado Libre*. Obtenido de Mercado Libre: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-836784218-termopar-tipo-k-50cm-sensor-de-temperatura-arduino-pic-_JM#position=16&search_layout=grid&type=item&tracking_id=6ce559b6-d1af-47c5-a03c-9168d56099b6

Tillo Terán, N. (07 de 01 de 2024). *GeoGebra*. Obtenido de GeoGebra:
<https://www.geogebra.org/m/HZGrZXGX>

Wagner, B., Dykstra, T., Costa M. Santos, R., Sharkey, K., Coulter, D., Newcomb, B., . . . Onderka, P. (15 de 02 de 2023). *Microsoft: Documentation*. Recuperado el 08 de 01 de 2024, de Microsoft: Documentation: Microsoft: Documentation

Alberto Arroyo Bermudez

**MONITOREO DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL
PROCESO DE GASIFICACIÓN A PARTIR DE ASTILLA DE PINU...**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::3117:491771514

Fecha de entrega

4 sep 2025, 2:04 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

4 sep 2025, 2:09 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

MONITOREO DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN A PARTIR DE A....docx

Tamaño del archivo

13.4 MB

50 páginas

9490 palabras

51.917 caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Texto oculto

4 caracteres sospechosos en N.º de página

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA	
Título del trabajo	Monitoreo de Variables que Intervienen en el Proceso de Gasificación a Partir de Astilla de Pinus SPP	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	ALBERTO ARROYO BERMUDEZ	2146622e@umich.mx
Director	Jorge Enrique Ambriz Parra	jorge.ambriz@umich.mx
Codirector	Jose Cruz De Leon	jose.leon@umich.mx
Coordinador del programa	Abril Munro Rojas	abril.munro@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



UMSNH

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	SI	TRADUCCIÓN DE INGLÉS A ESPAÑOL
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	ALBERTO ARROYO BERMUDEZ
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 03 de septiembre de 2025