

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN HORNO PIROLÍTICO DE 200 LITROS
PARA LA GENERACIÓN DE BIOCHAR.**

**AUTORES:
HOLGER DANIEL SINCHIRE POGO
DANNY WLADIMIR TOPA JAYA**

**TUTORA:
MARÍA CRISTINA CALERO ARMAS**

Quito, septiembre de 2020

CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, Holger Daniel Sinchire Pogo, con Cédula de Identidad N° 1719256305 y Danny Wladimir Topa Jaya, con Cédula de Identidad N° 1727005090, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN HORNO PIROLÍTICO DE 200 LITROS PARA LA GENERACIÓN DE BIOCHAR.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Holger Daniel Sinchire Pogo
C. I. 1727005090



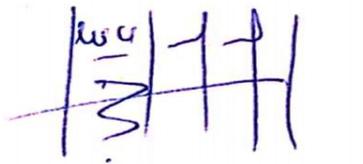
Danny Wladimir Topa Jaya
C. I. 1719256305

Quito, septiembre de 2020.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA

Yo, María Cristina Calero Armas, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN HORNO PIROLÍTICO DE 200 LITROS PARA LA GENERACIÓN DE BIOCHAR.”, realizado por Holger Daniel Sinchire Pogo y Danny Wladimir Topa Jaya, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre de 2020.



María Cristina Calero Armas

C.I. 1714550645

DEDICATORIA

Todo esto va dedicado a mi familia por su amor incondicional desde el principio; amigos y a todos los que hicieron posible este sueño que comenzó hace tiempo atrás. ¡Madre querida gracias por todo lo que has hecho por mí, a pesar de la distancia que nos separa siempre me has apoyado a mis hermanos y a mí...!

...Padre gracias por guiarme y motivarme en todo lo que quería hacer y gracias por todo lo que has hecho por todos nosotros. Blanca gracias por todos los consejos que me has dado, siempre me los diste de buena manera y a toda tu familia por todo lo que han hecho por mí.

Daniel

El presente trabajo va dedicado a mis padres Miguel y Estela quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades.

A mis hermanos Geovanny, Jimmy, Andy y Ángel por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, ¡por estar conmigo en todo momento... ¡Gracias!

A mi novia, Melissa, por que tu ayuda ha sido fundamental, has estado a mi lado incluso en los peores momentos, motivándome y ayudándome hasta donde tus alcances lo permitían y a mi hija Sofía... Tu afecto y cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo de mis ganas de buscar lo mejor para ti. Aún a tu corta edad me has enseñado y me sigues enseñando muchas cosas de la vida... ¡Gracias, mis amores!

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Danny

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirnos culminar todos nuestros estudios, por darnos la sabiduría para entender las cosas de la vida. Gracias por siempre estar con nosotros y brindarnos la fuerza necesaria para seguir adelante.

A la Universidad Politécnica Salesiana, profesores y directivos, por nuestra formación académica y personal; en especial a la carrera de Ingeniería Mecánica y a todos los docentes que forman parte de ella. Gracias por todos los conocimientos compartidos y por enseñarnos que todo en la vida tiene solución.

A nuestra querida tutora, Cristina, gracias por guiarnos en este proyecto y por darte un tiempo con nosotros para culminar todo este trabajo de titulación, cada reunión que tuvimos compartiste buenos consejos y conocimientos. Gracias por ayudarnos a cumplir todos los objetivos planteados. Sigue siempre así, ayudando a todos.

A nuestras familias, gracias por siempre estar pendientes de nosotros y apoyarnos con este sueño de ser profesionales, apoyándonos siempre nos cuando nos caemos. ¡Muchísimas gracias a todos ustedes...!

Danny y Daniel

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	4
BIOCHAR Y PIRÓLISIS	4
1.1. ¿Qué es biochar?	4
1.1.1. Características del biochar.....	5
1.1.2. Composición del biochar	5
1.1.3. Producción de biochar	5
1.1.4. Ventajas del biochar en el suelo	6
1.2. ¿Qué es Biomasa?	7
1.2.1. Características generales.....	8
1.2.2. Efectos ambientales producto de la quema de biomasa.....	8
1.3. El eucalipto.....	9
1.3.1. Características generales.....	9
1.3.2. Utilidad del eucalipto.....	10
1.3.3. El eucalipto en el Ecuador	10
1.3.4. Biomasa residual del eucalipto	11
1.3.5. Composición de la biomasa del eucalipto.....	11

1.3.6.	Densidad básica de Eucalyptus globulus	12
1.3.7.	Poder calorífico del eucalipto	13
1.4.	¿Qué es pirólisis?	13
1.4.1.	Proceso de pirólisis	14
1.4.2.	Tipos de pirólisis.....	15
1.4.3.	Etapas del proceso pirolítico.....	20
1.5.	Composición de la madera	20
1.6.	Hornos pirolíticos.....	21
1.6.1.	Partes de hornos	21
1.6.2.	Tipos de hornos.....	22
1.6.3.	Ventajas del horno metálico	23
1.6.4.	Desventajas de hornos metálicos	23
1.6.5.	Balance térmico en hornos pirolíticos	23
1.7.	Formas de transferencia de calor.....	25
1.8.	Transferencia de calor por conducción	25
1.9.	Transferencia de calor por convección	26
CAPÍTULO II		28
ESTADO ACTUAL DE LAS TEGNOLOGÍAS DE HORNOS PIROLÍTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR		28
2.1.	Horno de parvas	28
2.2.	Fosas de tierra para fabricar biochar	30
2.3.	Hornos de ladrillo.....	33
2.4.	Hornos por combustión	35
2.5.	Horno transportable de carbón TPI.....	35
2.6.	Principales ventajas y desventajas entre los hornos metálicos transportables y métodos tradicionales de fosas o parvas	37
2.7.	Principales ventajas y desventajas de hornos metálicos comparados con hornos de ladrillo.....	38

2.8. Estufa ANILA por Prof. Ravi Kumar (India)	39
2.9. '1G Toucan' por Hugh McLaughlin	40
2.10. Conclusión del capítulo.....	41
CAPÍTULO III.....	42
DISEÑO DEL REACTOR DE PIRÓLISIS.....	42
3.1. Características generales del equipo	42
3.2. Balance de masa.....	48
3.2.1. Masa del combustible (m_c).....	49
3.2.2. Masa del aire (m_a)	49
3.2.3. Masa de las cenizas (m_{Ce}).....	51
3.2.4. Masa de los gases (m_g).....	51
3.3. Balance de energía	52
3.3.1. Calor disponible (Q_D)	52
3.3.2. Calor utilizable (Q_u)	54
3.4. Perdidas de calor ($\sum Q_i$).....	55
3.4.1. Calor por radiación (Q_{rad}).....	55
3.4.2. Calor por convección (Q_{cv}).....	57
3.4.3. Calor generado por los gases (Q_g).....	61
3.5. Eficiencia térmica del horno	61
CAPÍTULO IV.....	62
SIMULACIÓN DE UN HORNO PIROLÍTICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE HORNO	62
4.1. Software	63
4.2. SOLIDWORKS Simulation.....	63
4.3. Simulación térmica del horno	64
4.4. Construcción y pruebas del prototipo	70
4.4.1 Prueba del prototipo	71

4.5. Eficiencia del prototipo de horno.....	77
4.6. Conclusión del capítulo.....	79
CAPÍTULO V	80
ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO	80
5.1. Costos directos	81
5.1.1. Costo de materiales.....	81
5.1.2. Costo de construcción.....	81
5.1.3. Costo del maquinado	82
5.1.4. Costo de mano de obra	82
5.2. Costos Indirectos	83
5.2.1. Costo de insumos.....	83
5.2.2. Costos adicionales	83
5.3. Costo total del proyecto	83
5.4. Análisis financiero	84
5.5. Depreciación	84
5.6 Valor actual neto (VAN).....	84
5.7. Tasa interna de retorno (TIR).....	86
5.6. Periodo de recuperación de la inversión (PRI)	87
5.8. Conclusión del capítulo.....	88
CONCLUSIONES GENERALES	88
RECOMENDACIONES GENERALES.....	90
REFERENCIAS	91
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Algunos efectos del uso del biochar en el suelo	7
Figura 2. Principales productos mediante pirólisis	14
Figura 3. Procesos termoquímicos para la transformación de biomasa	15
Figura 4. Balance de energía.....	24
Figura 5. El gradiente de temperatura dT/dx	26
Figura 6. Parva de tierra lista para su carbonización. Ghana	29
Figura 7. Carbonera en fosa de tierra durante la carga. Ghana.....	31
Figura 8. Esquema de un horno de fosa de tierra.....	32
Figura 9. Construcción de un horno de ladrillo media naranja.....	34
Figura 10. Horno media naranja parcialmente completado	34
Figura 11. Horno metálico TPI realizando la carbonización	37
Figura 12. Estufa ANILA para producción de biochar.....	40
Figura 13. Micro-gasificador Toucan para producción de biochar.....	41
Figura 14. Partes y elementos del horno	65
Figura 15. Ensamble cilindro interior y tapa.....	65
Figura 16. Asignación de material AISI 304.	66
Figura 17. Simulación térmica por convección	67
Figura 18: Simulación térmica por convección	68
Figura 19. Simulación térmica por convección	69
Figura 20. Simulación térmica por convección.	70
Figura 21. Prototipo de horno pirolítico de 50 litros de capacidad.....	71
Figura 22. Biomasa de eucalipto seco 18,9 kg.....	72
Figura 23. Biomasa de residuos eucalipto seco 8,7 kg	72
Figura 24. Preparación del prototipo de horno pirolítico para el encendido.....	73
Figura 25. Encendido del prototipo de horno pirolítico.....	74
Figura 26. Verificación del biochar.	75
Figura 27. Biochar, cenizas y residuos de la materia prima.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del Eucalyptus globulus	9
Tabla 2. Densidad básica de Eucalyptus globulus a distintas edades	12
Tabla 3. Densidad básica a diferentes alturas en Eucalyptus globulus	13
Tabla 4. Características de los principales procesos de pirólisis.....	17
Tabla 5. Tipos de pirólisis	17
Tabla 6. Velocidades vs. Productos	18
Tabla 7. Rendimientos de los diferentes procesos utilizados para la degradación de la biomasa.....	18
Tabla 8. Análisis proximal de diferentes maderas	19
Tabla 9. Análisis elemental de distintos tipos de madera	21
Tabla 10. Características del horno de parvas.....	30
Tabla 11. Características del horno fosa de tierra	31
Tabla 12. Características de horno de ladrillo.....	35
Tabla 13. Características del horno de acero.....	39
Tabla 14. Aceros inoxidable austeníticos comunes.....	46
Tabla 15. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente.....	47
Tabla 16. Resistencia a la tracción a elevadas temperaturas.....	47
Tabla 17. Máxima temperatura de servicio.....	48
Tabla 18. Biomasa de eucalipto para producir biochar.....	73
Tabla 19. Toma de temperaturas del horno mediante pirómetro.	74
Tabla 20. Masa del biochar, cenizas y residuos obtenidos mediante el prototipo de horno pirolítico.....	75
Tabla 21. Comparación cualitativa del biochar vs carbón residual.....	76
Tabla 22. Calor emitido en intervalos de tiempo y temperatura	78
Tabla 23. Costo de materiales	81
Tabla 24. Tiempo de fabricación.....	82
Tabla 25. Costo de maquinado.....	82
Tabla 26. Costo de mano de obra.....	83
Tabla 27. Costo total del proyecto	83
Tabla 28. Valor actual neto (VAN).....	85
Tabla 29. Tasa interna de retorno (TIR).....	86
Tabla 30. Relación del VAN con la TIR	87

RESUMEN

Este trabajo el objetivo principal es el diseño y simulación de un horno pirolítico de 200 litros de capacidad para la generación de biochar o carbón vegetal a partir de biomasa residual de eucalipto. El biochar obtenido será utilizado, posteriormente, como fertilizante para mejorar la calidad de suelos pobres en nutrientes. Para cumplir con este objetivo, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre la situación actual de las tecnologías de este tipo de hornos, consiguiendo como resultado el diseño de un horno pirolítico metálico de doble cilindro. Por otra parte, se muestran los parámetros empleados en el diseño del horno, estableciendo los cálculos de balance de masa, balance térmico, pérdidas de calor y eficiencia térmica del mismo. También se realizó simulaciones térmicas mediante el software SolidWorks, demostrando que el horno es dependiente de la temperatura ambiente y cantidad de combustible utilizado, el cual está diseñado para un 30 % de hojarasca y 70 % de leña, cumpliendo así con las condiciones de temperatura para realizar el proceso de pirolisis de biomasa de eucalipto, mediante el uso de este como combustible. Para completar el trabajo, se construyó un prototipo de horno pirolítico de 50 litros de capacidad con una proporción directa de 1:4. El prototipo de horno fue probado en la ciudad de Quito con una temperatura ambiente de 16 °C, obteniendo un 32,18 % de biochar limpio, consistente y homogéneo a una temperatura máxima de procesamiento de 500 °C y a la vez estableciéndose una eficiencia práctica del horno de 41,7 %, demostrando de esta manera la validez del diseño. Finalmente se realizó un análisis financiero determinando la rentabilidad y viabilidad del proyecto, con una inversión inicial de 1180,54 USD y una recuperación en un periodo de 5 meses.

Palabras claves: biochar, pirolisis, balance de energía, horno pirolítico

ABSTRACT

This work the main objective is the design and simulation of a 200-liter capacity pyrolytic furnace for the generation of biochar or charcoal from residual eucalyptus biomass. The biochar obtained will later be used as a fertilizer to improve the quality of nutrient-poor soils. To meet this objective, a bibliographic search was carried out on the current situation of the technologies of this type of furnaces, resulting in the design of a double cylinder metal pyrolytic furnace. On the other hand, the parameters used in the design of the furnace are shown, establishing the calculations of mass balance, thermal balance, heat losses and thermal efficiency thereof. Thermal simulations were also carried out using SolidWorks software, showing that the furnace is dependent on the ambient temperature and the amount of fuel used, which is designed for 30% litter and 70% firewood, thus complying with the temperature conditions for carry out the process of pyrolysis of eucalyptus biomass, by using it as fuel. To complete the work, a prototype of a 50-liter capacity pyrolytic furnace with a direct ratio of 1: 4 was built. The furnace prototype was tested in the city of Quito with an ambient temperature of 16 ° C, obtaining 32.18% clean, consistent and homogeneous biochar at a maximum processing temperature of 500 °C and at the same time establishing a practical efficiency of the 41.7% oven, thus demonstrating the validity of the design. Finally, a financial analysis was carried out determining the profitability and viability of the project, with an initial investment of USD 1,180.54 and a recovery in a period of 5 months.

Keywords: biochar, pyrolysis, energy balance, pyrolytic furnace

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos en muchas regiones del mundo invita a pensar en estrategias para mejorarlo como una necesidad para incrementar la producción, y así equilibrar la gran demanda de alimentos que crece día tras día tanto a nivel mundial como nacional. Una alternativa para enriquecer los suelos es el biochar o carbón vegetal, debido a su alto porcentaje en carbono. Por ejemplo, la calidad de nutrientes en los suelos amazónicos, son el efecto de la implementación de biochar, esto ha aumentado la productividad entre unos 2.000 y 2.500 años, respecto a los suelos sin biochar [1].

Para que el biochar sea una solución real para los suelos pobres en minerales y nutrientes, este debe cumplir ciertas condiciones químicas, tales como: el contenido de carbono mínimo de 50 %, área superficial entre $(1 \text{ a } 2) \text{ m}^2/\text{g}$ y también otros elementos como: oxígeno (O), hidrógeno (H), azufre (S), cationes básicos, compuestos orgánicos y metales pesados. Entonces para conseguir este tipo de propiedades, es necesario diseñar y construir un prototipo de horno pirolítico que se adapte a estas condiciones específicas [2].

En la gran mayoría de comunidades el proceso para generar biochar es realizado de manera empírica, es decir de manera no controlada, por tal motivo, una de las consecuencias en ciertos casos es la generación de incendios. Por lo cual, dotar de un horno pirolítico con quema controlada a una comunidad es brindar mayor seguridad tanto para la vida humana como para el ecosistema.

El presente proyecto técnico está basado en el diseño y la simulación de un horno pirolítico de 200 litros de capacidad para la producción de biochar o carbón vegetal, consta de cinco capítulos; siendo el primero, una recopilación de información más reciente donde se define conceptos como biochar, biomasa, pirolisis y sus procesos, además, de la materia prima como lo es el eucalipto, también de las formas de transferencia de calor por conducción y convección.

En el Capítulo II se detalla las tecnologías de los hornos pirolíticos desde el más sencillo como el horno de parvas, pasando por los hornos de ladrillo hasta llegar a los

hornos pirolíticos metálicos que son los más actuales y donde se escogerá una variante de este y se modificará para la construcción del proyecto.

En el Capítulo III se detallan las ecuaciones y cálculos del balance de masa y energía, realizadas por varios autores como Cengel, Cuesta, Guillermo, Valverde, Hernández, Recio, entre otros. Al realizar el balance térmico del prototipo de horno pirolítico se puede dimensionar la cantidad de combustible a utilizarse para cierta cantidad de biochar a producirse, también se establece la eficiencia térmica del equipo, la misma que fue de 48,5 %, además, se presentan las dimensiones de diseño del equipo, así como el material idóneo para su construcción.

En el Capítulo IV se detalla una simulación con el software SolidWorks donde se presentan tres casos de variable potencia calórica para determinar que la temperatura máxima obtenida es mayor a la temperatura deseada de 550 °C, comprobando así la fiabilidad del horno. Además, en este apartado se realiza una prueba con el prototipo de horno, obteniendo 2,8 kg de biochar de un total de 8,7 kg de biomasa de eucalipto, el cual viene a ser el 32,18 %, encontrándose dentro del rango esperado de producción el cual es del 30 % al 35 %.

Para finalizar, en el último Capítulo se realizó un análisis económico financiero, para esto se han descrito los costos directos e indirectos que se utilizaron en el diseño y la construcción, además, se calculó el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), estos valores determinan si el proyecto es o no es rentable para su ejecución.

El objetivo general consiste en diseñar y simular un horno pirolítico de 200 litros para la generación de biochar.

Los objetivos específicos son:

- Definir el estado actual acerca de las tecnologías de hornos pirolíticos e identificar el más idóneo para la generación de biochar a partir de eucalipto.
- Diseñar los elementos y componentes necesarios para el horno pirolítico de 200 litros.
- Validar mediante simulación en un software especializado la confiabilidad del equipo.

- Evaluar la eficiencia teórica del horno mediante mediciones en un prototipo.
- Establecer económicamente la rentabilidad y la viabilidad del equipo para la generación de biochar.

CAPÍTULO I

BIOCHAR Y PIRÓLISIS

1.1. ¿Qué es biochar?

El biochar es un producto rico en carbono esto sucede cuando la biomasa como la madera, hojas secas o el estiércol se calientan en un recipiente cerrado herméticamente con poco o nada de aire. En términos técnicos se puede decir que el biochar es la descomposición de cualquier material orgánico bajo una proporción de oxígeno limitada y temperaturas bajas alrededor de (<400 °C) [3].

Quemar residuos de especies vegetales de la biomasa es una práctica muy antigua y fue destinada como nutriente para enriquecer la tierra y purificar los cultivos de enfermedades y plagas existentes en el suelo. Al biochar se lo ha relacionado a lo largo de la historia con el encargo del suelo usado por varias culturas en América antes de la venida de los europeos a estas tierras, como la “*terra preta*” en Brasil y el manejo de las cenizas producto de la quema de la madera que usaban para la cocción de sus alimentos, a su vez esta ceniza la usaban en la chacra. El uso de biochar es una tecnología que a lo largo de los años ha demostrado ser de gran ayuda al suelo porque posee muchos beneficios que aumentan la fertilidad de este, a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas [4].

Hace mucho tiempo atrás se han propuesto aumentar la utilización de biochar como una manera factible del uso de la biomasa de ecosistemas forestales que presentan ventajas como la de reintroducir nutrientes y así optimizar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, a su vez ayuda en el sustento de los nutrientes al interior del biochar [5].

Según Ortiz, et al. [6] hablan que, el biochar es el carbón que se obtiene de los residuos de la biomasa, está designado a optimizar la fertilidad del suelo y ayudar a retener el carbono en la estructura del mismo. El biochar o carbón vegetal es producto de la incineración de la biomasa y que tiene otros usos.

1.1.1. Características del biochar

De acuerdo con Guerra [2] plantea que, la elección de la materia prima, técnica de obtención y las condiciones para la producción de biochar con rasgos específicos son de suma importancia para la caracterización y determinación de los ensayos analíticos o de estudios primordiales para instaurar datos que caracterizan al biochar para conseguir analizar los resultados. A su vez, es primordial detallar las características a determinar.

En la actualidad no se han establecido niveles de las propiedades importantes del biochar y regularmente para su determinación se siguen diversas metodologías ya determinadas y establecidas para otros materiales.

1.1.2. Composición del biochar

El biochar está constituido por carbono orgánico recalcitrante y por contenidos de micro y macronutrientes que se encuentran dentro de la materia prima original. Su composición puede verse variada por el tipo de materia prima que se emplea. También está combinado por una agrupación de elementos como: hidrogeno (H), oxígeno (O), azufre (S), cationes básicos, metales pesados y compuestos orgánicos, esta estructura se puede modificar de acuerdo al tipo de pirólisis que se vaya a realizar [2].

Entre los macronutrientes, el más sensible al calor es el nitrógeno por eso su concentración es baja en el biochar que se produce a altas temperaturas [7]. En teoría Guerra [2] expresa que, el carbono se volatiliza aproximadamente a las 100 °C, así como el azufre sobre los 375 °C, el fósforo y potasio sobre los 700 - 800 °C y el nitrógeno en los 200 °C.

La presencia de materiales pesados en el biochar se ve concentrada ya que algunos de estos materiales son absorbidos con facilidad, por esta razón se recomienda determinar de que está constituida la materia prima y la concentración antes de la elaboración y uso del biochar [2].

1.1.3. Producción de biochar

La biomasa se puede transformar a través de tres métodos importantes [2]:

- a) A través de procesos de transformación bioquímica, se da por la operación microbiana, se fermenta alcohol para producir etanol y digestión anaeróbica para producir metano.
- b) Transformación termoquímica por de acción térmica, la incineración es produce con abundancia de aire, la gasificación con cantidades limitadas de aire y los procesos de pirólisis con ausencia de aire.
- c) Conversión físico - químico, se prensa y extrae para producir aceites vegetales.

1.1.4. Ventajas del biochar en el suelo

El biochar es de gran ayuda para la fertilidad del suelo porque mejora su estructura por ende se incrementa la fabricación de biomasa. El biochar no solo aumenta la eficiencia de los fertilizantes, sino también reduce su pérdida. Según Ortiz, et al. [6] han explicado variados efectos en los suelos que han sido empleados con biochar como: tiene mayor recurso de agua, incremento de conservación de nutrientes en el suelo y acción microbiana, con todas estas ventajas se puede decir que la productividad agrícola es mejor.

El uso de biochar también es adecuado para neutralizar las consecuencias acidificantes de la biomasa de ciertas especies en la tierra. Gilces [5] describe que, con la ayuda del pH se reveló un efecto alcalinizante en las cenizas como en el biochar. También mostró un buen rendimiento en el suelo como la disminución de densidad, una progreso activo del agua al verse modificada la distribución del tierra y un aumento en la amplitud de intercambio. Ortiz, et al. [6] expresan que, al verse aumentada la capacidad de filtración del biochar, plantean como hipótesis la utilidad de este para disminuir el perjuicio causado por la lixiviación del suelo, ya sea en materia orgánica que es soluble también en los elementos minerales.

Guerra [2] en su investigación indicó que, los beneficios de utilizar biochar se traduce en la mejoría de infiltración y retención del agua del suelo, en retener nutrientes, incrementar el pH, en la eficacia del empleo del nitrógeno, favorecimiento del incremento microbiano y en probables efectos perdurables en la tierra por ser una estructura constante de carbono que resiste la degeneración microbiana.

Otra de las ventajas acerca del uso del biochar se relaciona con el carbono (C) que se puede almacenar durante un largo tiempo en el suelo, esto mejora el crecimiento de las plantas, no obstante, existe una pequeña fracción del biochar degradable. En la Figura 1 se ilustra algunos efectos del uso del biochar como la reducción de emisiones de metano, reducción de emisión de N_2O , reducción de salida de nutrientes, incremento de la fertilidad del suelo, entre otras [8].

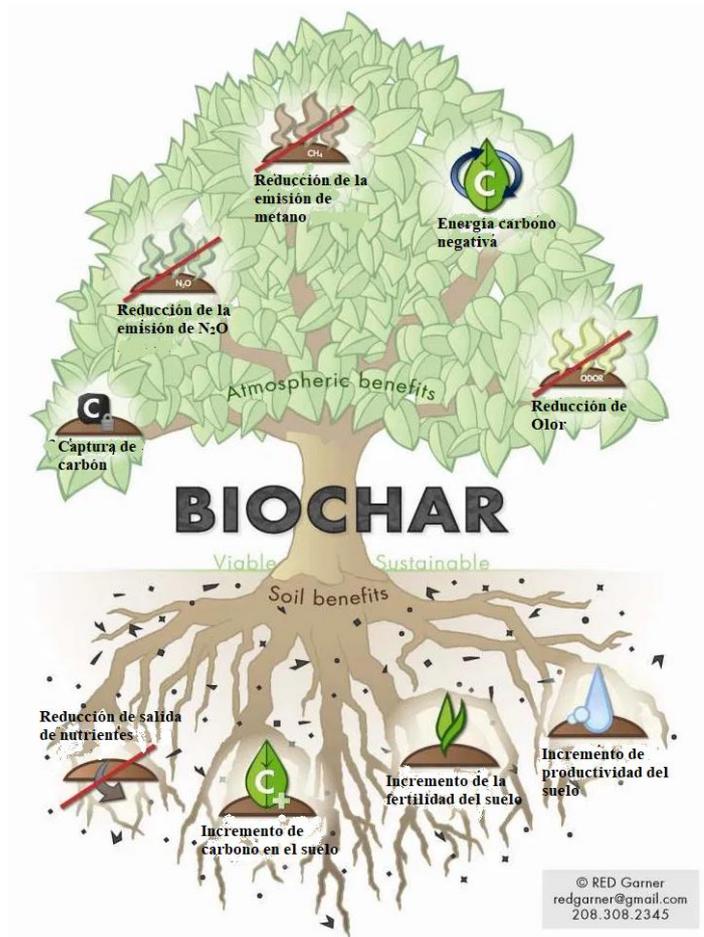


Figura 1. Algunos efectos del uso del biochar en el suelo [8]

1.2. ¿Qué es Biomasa?

Biomasa es un material orgánico que se produce por el desarrollo biológico, y que se utiliza como un surtidor de energía o como producto de conversión para diversos fines. La biomasa es una manera de energía renovable que es principal en sentido ambiental y energético, además sirve de contribución para el mejoramiento económico en las zonas campestres [9].

1.2.1. Características generales

Para describir la biomasa en un árbol se puede decir que, es la abundancia de material vegetal que lo compone, internos y externos, ahora si se generaliza a un acopio forestal, su biomasa estará constituida por la concentración de elemento vegetal de todos los sujetos y que se lo refleja en términos de masa, peso o volumen [10].

La investigación de nuevos métodos ambientales alternos a lo largo de los años ha llevado a que se observe a la biomasa como una solución ambiental y energética, esto permitirá obtener beneficios económicos en su aprovechamiento, beneficios como el descenso de difusión de CO₂ que contamina la atmósfera, que es uno de los promotores del efecto invernadero y SO₂ que produce una temporal ácido [11].

1.2.2. Efectos ambientales producto de la quema de biomasa

La ignición una reacción de oxidación donde entra el oxígeno, para ser una ignición tiene que ser veloz y exotérmica con el incremento de temperatura. Esta biomasa se reactiva con el oxígeno y comienza a arder con energía suficiente para autoalimentarse, es exotérmica porque cede calor al medio y los productos de la combustión alcanzan temperaturas elevadas hasta llegar a un punto incandescente y a esto se lo llama fuego o llama [12].

Cuando el eucalipto se encuentra seco es muy vulnerable a los incendios forestales. Quemar este tipo de especie provoca perjuicios en la superficie y reduce la capa biológica del tierra. Las hojas de eucalipto contienen aceites que son muy volátiles produciendo un fuego de alta temperatura [13].

El exceso de humedad en la quema del eucalipto provoca que sea una combustión incompleta produciendo carbonilla o carbón y monóxido de carbono (CO). A su vez, la biomasa de procedencia vegetal posee poca concentración de azufre por lo cual no existiría emisiones al ambiente de óxidos [12].

El fuego provoca varios efectos ambientales, como la muerte de la flora, agotamiento de biomasa y emanaciones de humo. La consecuencia post-fuego provoca variación en el microclima, aumento de temperatura de la tierra, variación en los nutrientes de la tierra, cambios en la acción microbiana y alteraciones en el hábitat de los vertebrados

e invertebrados [14]. La quema no controlada de biomasa provoca condiciones perjudiciales para el suelo debido al incremento de temperatura que se logra, esto produce alteraciones físico - químicas [13].

Cuando se aumenta la temperatura de la tierra en plantíos de eucalipto, también se aumenta la evaporación del agua de este inhabilitando la actividad de los descomponedores, como los seres microbianos y las lombrices de tierra ya que estos seres son sensibles a la temperatura [14].

1.3. El eucalipto

Es un árbol originario de la especie *Myrtaceae*, se encuentra repartido en una gran diversidad de ecosistemas, es muy frecuente en todas las zonas del planeta, es un arbusto variable y que crece en todas las zonas del mundo [13]. La clasificación botánica de eucalipto en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del *Eucalyptus globulus* [13]

Eucalyptus globulus	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnolipsida
Subclase	Rosidae
Orden	Myrtales
Familia	Myrtaceae
Genero	Eucalyptus
Especie	Globulus

1.3.1. Características generales

El eucalipto blanco o goma azul es una especie que se encuentra muy poblada en la Sierra Andina. Esta especie es originaria de Australia y Tasmania. Fue introducida en la región del Ecuador a fines del siglo XIX y se acopló a los ambientes andinos, para ser una especie criticada y poco investigada [13].

Las primeras plantaciones de *Eucalyptus globulus*, entraron a Ecuador y específicamente en Cuenca a fines de 1860 o comienzos de 1870, por ende, la edad del eucalipto en el Ecuador es de cerca de 150 años, desde que se empezó a extender y crecer en todo el país. En América del Sur (Bolivia, Colombia, Chile, Ecuador y Perú) se utiliza el *Eucalyptus globulus* porque se ha adecuando a la totalidad de los ambientes de la zona. El eucalipto se introdujo en el Ecuador cuando la deforestación se acercaba a niveles críticos. Se tuvo que adaptar a la elevación, al clima y fue extendido con rapidez, ganando aprobación por su veloz desarrollo. Esto fue de beneficioso por lo que cultivar y vender madera de eucalipto para la construcción, carbón y leña era un oficio productivo [13].

Entre las características que más resaltan de la madera del eucalipto son su durabilidad y resistencia; además, es una buena alternativa para ser usada como leña y puede sustituir a la fuente renovable derivada del bosque andino, que con el paso de los años es más insuficiente y dificultosa de obtener, y con su explotación provoca un daño ambiental a los entornos nativos [15].

1.3.2. Utilidad del eucalipto

Balmelli y Resquin [15] expresan que, entre las particularidades del *Eucalyptus globulus* sobresale su madera que es excelente para la elaboración de pulpa y papel, transformándose en una de las variedades con importante petición en el mercado. Es la variedad agreste con mayor plantación. Con la celulosa del eucalipto se puede fabricar diversos productos como: pañales higiénicos, cola para empapelar, celofán formica y sus derivados, papeles específicos, filtros; así como la producción de fibras textiles como el rayón [16].

Moreno et al. [17] expresan que, el eucalipto también posee usos medicinales debido a que sus aceites esenciales como el eucaliptol que es de gran ayuda para afecciones respiratorias. Se lo utiliza en infusiones para la gripe, sus hojas pueden aliviar dolores del cuerpo.

1.3.3. El eucalipto en el Ecuador

En el aporte de Iglesias [18] dice que, el *Eucalyptus globulus* fue sembrada en la mayoría de la Cordillera de los Andes que tiene alturas de 1800 y 3300 metros sobre

el nivel del mar (m s. n. m); sin embargo, el mayor crecimiento se da entre los 2000 y 2900 metros sobre el nivel del mar. Esta zona corresponde a un nombramiento agroecológico de Holdridge, como bosque húmedo. La primordial aglomeración de eucalipto se halla entre Latacunga y Quito, estos sembríos se amplían a provincias como: Azuay, Bolívar, Cañar, Carchi, Cotopaxi, Chimborazo, Imbabura, Loja, Pichincha y Tungurahua.

El eucalipto tiene una facilidad para adaptarse a los suelos andinos, posee un alto rendimiento en madera y subproductos; además de su gran resistencia tiene crecimiento rápido, por eso es una especie con mayor potencial de utilización ambiental, por tal motivo hay que procurar que su forestación tenga un menor impacto sobre los recursos naturales según FAO [13].

1.3.4. Biomasa residual del eucalipto

Existe un incremento en el uso de la biomasa del eucalipto en procesos silvícolas, como en procesos industriales para ser destinado a diversos tipos de aprovechamiento y manejo. Este estilo debe seguir y verse aumentado, teniendo en conocimiento que existen varias tecnologías alternas para el aprovechamiento de la biomasa, como algo nuevo para el aprovechamiento y que tengan un nuevo valor los suelos [19].

Debido a la gran variedad de *Eucalyptus globulus*, Balboa [10], plantea resultados donde se obtuvo gran variedad de nutrientes acumulados en la copa de los árboles. Estos nutrientes son provenientes del suelo. En los resultados la mayor parte de N y P que se acumulaba por la vegetación se podría encontrar en la corteza y las ramas, donde se almacenaban cantidades significativas de Ca, Mg y K.

Según Martínez et al. [20] dicen que el mayor contenido de nutrientes del eucalipto se encuentra el 30 % en el fuste y el 70 % en la corteza, ramas y hojas.

1.3.5. Composición de la biomasa del eucalipto

Los restos originarios de la actividad agreste y desechos agroindustriales brindan la posibilidad de adquirir productos que sean renovables. La transformación de materia residual en otros productos se puede realizar gracias a transformaciones

termoquímicas de la biomasa como lo son: hidrotratamiento, gasificación, pirólisis, torrefacción, entre otros [21].

En el Distrito Metropolitano de Quito, Anchaluisa y Suárez [14] plantean que, la variedad de *Eucalyptus globulus* de 20 años, con concentraciones que varían de 644 a 2379 arbustos por hectárea, reportan acopio de biomasa alrededor de 893 a 1455 kg ha⁻¹ por caída de hojarasca durante un año.

1.3.6. Densidad básica de *Eucalyptus globulus*

Espina [22] dice que, la densidad básica de la madera es la razón entre el peso de la madera y su volumen verde. Esto depende de diferentes elementos, varios de ellos son exclusivos de cada variedad y otros afines con el entorno. Por ejemplo, el tamaño y cantidad de los vasos, grosor de la pared, diámetro de las fibras y composición química de la madera, de modo que dos maderas con consistencias equivalentes pueden ser muy diferentes en cuanto a las características mencionadas.

En la siguiente Tabla 2 se exponen valores de densidad básica (kg/m³) de *Eucalyptus globulus* según su edad. Se puede observar el crecimiento de la madera cosechada en Arauco y presenta una densidad que va del 6 y 7 % considerable a la de Valdivia, a su vez, a mayor sea la edad, mayor será la densidad básica [22].

Tabla 2. Densidad básica de *Eucalyptus globulus* a distintas edades [22]

Edad (años)	Bosques Arauco	Forestal Valdivia
5 – 7	466	-
8 – 11	492	464
11 – 13	522	488
14 – 16	544	508

Mientras se acrecienta la altura en el fuste aumenta la densidad básica, en el caso de *Eucalyptus globulus* existe un incremento radial de la densidad y grosor de las paredes, esta densidad aumenta de medula a corteza o de zona interna a zona externa, todo esto se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Densidad básica a diferentes alturas en *Eucalyptus globulus* [22]

Altura (m)	Zona Interna	Zona Externa
0.9	473	519
8.9	509	528
16.3	524	524
21.3	548	607

Por otro lado, en Ecuador la densidad básica de *Eucalyptus globulus* es de 550 kg/m^3 , mientras que la densidad en estado de secado al aire y la de estado verde es de 730 kg/m^3 y de 116 kg/m^3 respectivamente [23].

1.3.7. Poder calorífico del eucalipto

En el estudio realizado por Iglesias [13] habla sobre el eucalipto, sus características y comportamiento, tales como: acumulación rápida de hojarasca, poder calorífico, aceites volátiles y desprendimiento de ramas y cortezas. Es una especie altamente inflamable, ya que mencionadas características favorecen a la prolongación del fuego, cuando se encuentra seco y es muy sensible a los incendios forestales, y más cuando hay sembríos muy densos.

Además, Iglesias [13] presenta un estudio energético por ignición de biomasa leñosa, que se llevó a cabo en Quito - Ecuador, en el cual se establece el poder calorífico del eucalipto a partir de un estudio inminente y cercano ejecutado a la biomasa dando como consecuencia un poder calorífico superior de 15850 kJ/kg . A su vez, mediante un estudio de transferencia de calor en los intercambiadores empleando el método DTML (Diferencial Media Logarítmica de Temperatura) se vio obligatorio colocar sensores de temperatura conectados a un datalogger con 12 canales. Confirmó un poder calorífico de 16000 kJ/kg para madera de eucalipto, también que el carbón vegetal procedente del eucalipto tiene 28000 kJ/kg .

1.4. ¿Qué es pirólisis?

El proceso de pirólisis no es otra cosa que la degradación de la biomasa por presencia del calor y ausencia de oxígeno [24]. Según Klug [25], es una descomposición por medio de un proceso térmico que ocurre en carencia de oxígeno.

La palabra pirólisis deriva del griego “*pyro*”, fuego y “*lisis*” que indica la descomposición en sus partes constituyentes. Generalmente, en la práctica es imposible crear un ambiente sin oxígeno, por lo que una mínima oxidación se producirá en la mayoría de los casos. García et al. [1], menciona que el porcentaje de oxidación de la biomasa es menor en comparación con la que se da en el proceso de combustión, en el cual la biomasa se oxida totalmente, y por esto existe una proporción mayor de carbono presente en la biomasa de alimentos que no se emite como CO₂.

Además, García et al. [1] plantean que, la biomasa orgánica al pasar por el proceso de pirolisis. Estas se transforman en tres productos principales: gas, líquido y sólido carbonizado (también conocidos como: syngas, bio-oil y biochar, respectivamente) en distintas proporciones. Esto depende de la materia prima a utilizar y de las condiciones de pirólisis como se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Principales productos mediante pirólisis [1]

1.4.1. Proceso de pirólisis

Los procesos de pirólisis tienen tres fases: la alimentación y dosificación del material, la conversión de la masa orgánica y por último la adquisición y apartamiento de los productos como el coque, bio - aceite y gas [25].

Los métodos de transformación de la biomasa se clasifican en tres grandes grupos tal como se presenta en la Figura 3, [26]:

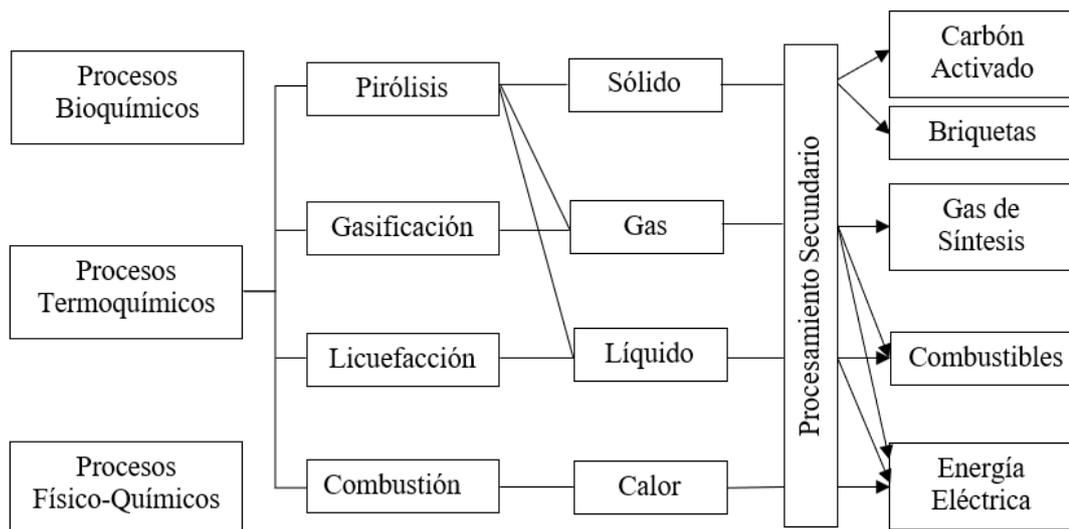


Figura 3. Procesos termoquímicos para la transformación de biomasa [26]

1.4.2. Tipos de pirólisis

En la actualidad, los tipos de pirólisis más utilizados para la producción de biochar son: pirólisis rápida y lenta. En ambos casos se consigue biochar, gas y bioaceite. Las cantidades relativas y las características de estos, dependerán de las condiciones de operación. Los sistemas para gasificación también son empleados para la producción de biochar, el cual se obtiene en una proporción menor en comparación con el proceso de pirólisis rápida o lenta [27].

- a) La pirólisis lenta se diferencia entre los procesos comunes de fabricación de carbón vegetal y otros más modernos. Este tipo de pirólisis se caracteriza por utilizar bajas velocidades de calentamiento y tiempos de permanencia más largos. La temperatura máxima alcanzada es normalmente 400 °C y el producto es carbonoso, acompañado de porciones líquida y gaseosa [28].

Existen dos tipos de pirólisis lenta, los cuales dependen del tiempo de residencia:

- **Carbonización** (tiempo de residencia: días)

La materia prima es calentada lentamente en carencia de oxígeno a temperaturas bajas entre (400 – 500 °C) y durante un largo tiempo, por consecuencia de los largos tiempos de residencia, los elementos en fase de vapor siguen reaccionando entre sí, logrando

aumentar el rendimiento de la porción sólida, a la cual se la denomina carbón vegetal (charcoal) [29].

- **Convencional** (tiempo de residencia: minutos).

En este proceso de pirólisis la velocidad de calentamiento es lenta a una temperatura final de 600 °C y un tiempo de residencia entre 5 min a 30 min, obteniendo tres tipos de productos de pirólisis (gas, líquido y carbón) [29].

- b) La pirólisis rápida se caracteriza por altas velocidades de calentamiento y tiempos de residencia bajos del vapor en la zona de reacción, generalmente las temperaturas alcanzadas varían alrededor de los 500 °C [28].

El principal objetivo de la pirólisis rápida es aumentar la producción de bio-aceite, ya que debido a la alta velocidad de calentamiento y el rápido enfriamiento hacen que la condensación de la porción líquida se produzca sin generar reacciones de craqueo de los componentes de elevado peso molecular. La velocidad de calentamiento se encuentra en un orden de 10 a 200 °C/s y una temperatura máxima inferior a 650 °C para la producción de bio-aceite [29].

- **Pirólisis Flash**

En la pirólisis flash la temperatura alcanzada es de 1000 °C y el tiempo de residencia es más corto en comparación a la pirólisis rápida, presentando velocidades muy elevadas de calentamiento en un orden mayor a 1000 °C/s, consiguiendo un elevado rendimiento en la porción gaseosa, sin embargo, este proceso puede ser muy beneficiosa en la producción de bio-aceite, ya que los rendimientos podrían llegar hasta el 70 %.

Además, debido a la alta velocidad de calentamiento y al tiempo de permanencia corto, este es conveniente, para obtener mejor rendimiento, un pequeño tamaño de partícula, todo se detalla en la Tabla 4 [29].

Tabla 4. Características de los principales procesos de pirólisis [28]

Tipo de pirólisis	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura final (°C)	Productos obtenidos
Carbonización	Días	Muy lenta	400 – 500	Carbón vegetal
Convencional	5 – 30 min	Lenta	600	Carbón, líquido y gas
Rápida	< 2 seg	Rápida	< 650	Bioaceite, carbón y gas
Flash	< 1 seg	Muy rápida	1000	Gas - Bioaceite

En los trabajos realizados por Guillermo, Mayoral [28] y Obando [30] mencionan que, para realizar la pirólisis hay que definir diversas variables como la temperatura y rapidez de calentamiento, tiempo de reacción o presión de operación, las mismas que se pueden cambiar para obtener distintas cantidades y características en los subproductos de pirólisis: gas, biochar y bio-aceite, ver Tabla 5.

Tabla 5. Tipos de pirólisis [30]

Tipos de Pirolisis	Tiempo	Principales productos
Lenta	Horas, días	30 – 35% peso de bioabono sólido
Convencional	Minutos	20 – 25% peso bioabono sólido 10 – 15% peso bio-oil
Flash	Segundos o menos	40 – 60% peso bio-oil, gas

Obando [30] define las situaciones de proceso, recalcando el tipo de pirólisis obteniendo el mayor incremento de provecho sólido (Biochar - Bioabono sólido); tal como se muestra en la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6. Velocidades vs. Productos [30]

Pirólisis	Tiempo residencia	Velocidad calentamiento	Presión (BAR)	Temperatura (°C Max)	Producto mayoritario
Carbonización	Horas – días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	5 – 30 min	Baja	1	600	Gas, líquido y solido
Fast	0.5 – 5 min	Muy alta	1	650	Líquido
Flash líquido	< 1 seg	Alta	1	< 650	Líquido
Flash gas	< 1 seg	Alta	1	>650	Gas
Ultra	< 0.5 seg	Muy alta	1	1000	Gas
Vacío	2 – 30 seg	Media	> 0.1	400	Líquido

Según Cuesta [29] dividió en 4 tipos, Tabla 7, al proceso de pirólisis, encargándose de los parámetros de ejecución, como son la temperatura, velocidad a la que se calienta o el tiempo de estadía en el reactor, los cuales se explican a continuación:

Tabla 7. Rendimientos de los diferentes procesos utilizados para la degradación de la biomasa [28]

Proceso	Rendimiento de productos			Condiciones	
	(% en masa)				
	Líquido	Carbón	Gas		
Pirólisis	Carbonización	20 – 30	30 – 40	30 – 40	Tiempo de residencia: Días Velocidad de calentamiento: muy lenta (0.1 – 1 °C/s) Temperatura final: 400 – 500 °C Atmósfera inerte
	Convencional	40 – 50	10 – 20	20 – 30	Tiempo de residencia: 5 – 30 min Velocidad de calentamiento: lenta (<2 °C/s) Temperatura final: 600 °C Atmósfera inerte
	Rápida	65 – 75	10 – 15	10 – 20	Tiempo de residencia: <2 s

					Velocidad de calentamiento: muy rápida (10 – 200 °C/s) Temperatura final: 650 °C Atmósfera inerte Tiempo de residencia: <1 s
	Flash	5 – 10	20 – 30	50 – 70	Velocidad de calentamiento: rápida (>1000 °C/s) Temperatura final: 1000 °C Atmósfera inerte Temperatura final: 800 – 1000 °C
Gasificación		0 – 5	5 – 10	85 – 95	Condiciones levemente oxidantes Temperatura final: 700 – 900 °C
Combustión		0	0 – 5	95 – 100	Condiciones muy oxidantes

En el trabajo realizado por Cuesta [29] muestra un análisis inmediato o proximal de contenidos como lo son: humedad, cenizas, material volátil y carbón fijo de algunos ejemplos de maderas, los mismos que se muestran en la Tabla 8 a continuación:

Tabla 8. Análisis proximal de diferentes maderas [28]

Tipo de madera	Análisis proximal			
	Humedad madera seca (%)	Cenizas (%)	Material volátil (%)	Carbono fijo (%)
Madera de eucalipto	7.73	0.98	74.91	16.38
Madera de haya	6	0.4	85.3	14.3
Madera de paulownia	6.5	1.06	71.8	20.64
Madera de pino brutia	3	1.3	72	26.67
Madera de pino radiata	7.1	0.4	84.6	13.9
Madera de bambú	9.37	2.57	70.31	17.75

Un contenido mínimo de humedad entre 10 - 15 %, evita inconvenientes en la ignición y disminuye la cantidad de energía que necesita el proceso. Los datos presentados en la tabla son de una madera expuesta a un procedimiento previo de secado [29].

1.4.3. Etapas del proceso pirolítico

El proceso está conformado de 3 etapas diferentes [31]:

- a) La primera etapa se provoca una desintegración tardía con obtenciones pequeñas de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto se debe a la ruptura de enlaces provocados por la alta temperatura con que lleva el proceso y resultado del escape de gases que retiene el carbón.

- b) La segunda etapa se denomina desintegración térmica activa. Debido al aumento de temperatura y se origina una descomposición más amplia de la molécula de carbón con la creación de hidrocarburos condensables y alquitranes. Esta etapa inicia cerca de los 360 °C y culmina cuando se ha llegado a temperaturas cerca de los 560 °C aproximadamente.

- c) La última etapa, que ocurre a temperaturas mayores de 600 °C, se identifica por la separación progresiva de hidrógeno y otros heteroátomos.

1.5. Composición de la madera

Se constituye de un 50 % de carbono (C), 42 % de oxígeno (O), 6 % de hidrógeno (H) y el 2 % de resto de nitrógeno (N) y otros elementos. Unido todo esto da formación a la celulosa y la lignina [32].

La madera es de procedencia vegetal y está constituida de distintas sustancias moleculares:

- La celulosa, sustancia que se halla en los vegetales, es la mitad de lo que está constituida de la madera.
- La lignina es otro de sus elementos, actúa para fortificar y endurecer la madera.
- La hemicelulosa, consiente en la unión fibrosa en la madera.
- Por último, dependiendo de la madera, se pueden hallar distintas sustancias en varias proporciones: resinas, almidón, oleínas, azúcares, taninos, entre otros.

Las circunstancias del desarrollo del árbol de cada madera, como la especie, determina en mayor medida los factores y proporciones [33]. Cuesta [29] realizó un estudio básico para establecer la agrupación de C, H, O, N y S que se halla en la madera sin alternar, previo a la pirólisis, esto se muestra en la Tabla 9.

Dicho estudio se ejecuta a través de un cromatógrafo de gases que establece el porcentaje de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre, como CO₂, H₂O, N₂ y SO₂ respectivamente [29].

Tabla 9. Análisis elemental de distintos tipos de madera [28]

Tipo de Madera	Análisis elemental				
	C (peso %)	H (peso %)	N (peso %)	O (peso %)	S (peso %)
Madera de eucalipto	48.65	6.16	0.28	44.97	-
Madera de haya	50.8	5.9	0.3	42.9	0.02
Madera de paulownia	44.73	6.12	0.87	48.28	-
Madera de pino brutia	50.18	5.14	0.45	43.96	-
Madera de pino radiata	49.3	6.42	0.04	42.5	0.09
Madera de bambú	39	6.1	0.6	54	0.018

1.6. Hornos pirolíticos

Un horno es un recinto que se encuentra aislado en el cual se transfiere la energía calorífica de una fuente hacia un elemento receptor. Este proceso energético tiene como objetivo: ablandar, calcinar, incinerar, fundir, realizar tratamientos térmicos o calentar un material de cualquier tipo [34].

1.6.1. Partes de hornos

- **Cimientos:** Es la parte del horno que se descansa en el suelo, su función es la de sostener al horno y sus componentes, su principal objetivo es resistir todas las cargas dinámicas y estáticas que provienen de este sin llegar a sufrir ningún deterioro [35].
- **Plataforma:** Es un plano que va entre los cimientos y la mampostería. Se los fabrica de algunos componentes como ladrillos refractarios y termoaislantes,

su edificación y espesor dependerá del tipo horno, tiene una superficie en la cual se puedan instalar las partes inferiores del horno [35].

- **Solera:** Es el lugar donde se colocan los materiales a calentarse o fundirse, tiene que ser completamente resistente e impermeable ya que tiene que resistir la capacidad del material sólido, a su vez debe ser químicamente estable [35].
- **Mampostería:** Posee paredes de ladrillo para reducir la pérdida de calor, salida de los gases y succión del aire exterior al el interior del horno. Tiene como objetivo asegurar la estabilidad y hermeticidad de la zona de trabajo. Para su diseño se debe predecir la dilatación debido al calentamiento irregular [35].
- **Quemadores:** Ejecutan la ignición dentro de la mampostería por medio de sus orificios donde ingresan el aire y el combustible al horno [35].
- **Ventiladores:** La quema de la ignición abandona el horno por medio de chimeneas y por los conductos de ventilación [35].
- **Bóveda:** Rodea la cámara de combustión y tiene forma de arco, su objetivo es la de soportar altas presiones y temperaturas ya que sus gases producto de la combustión en la parte superior se encuentran a una presión mayor a la normal [35].
- **Juntas térmicas:** Aseguran la integridad al mantener su solidez y además, tiene que ayudar la ampliación en el volumen de la mampostería que se genera por el calor, se elimina el escape de los gases o escoria [35].

1.6.2. Tipos de hornos

Hay diversos tipos de hornos que se pueden utilizar para la generación de biochar, la elección depende de algunas variables como son el tipo de material a tratar, el volumen de producción a generar, la resistencia mecánica del material, la capacidad de reciclo de los gases de combustión, entre otras [36].

Los hornos, en general, se pueden clasificar en diferentes tipos teniendo en cuenta varios aspectos [35]:

- a) Según su principio de calentamiento:
 - Combustible
 - Energía eléctrica
- b) Tipo de recinto:
 - Solera de ladrillos

- Cinta transportadora
- Solera giratoria
- De crisol
- c) Tipo de efecto en el producto:
 - Fusión
 - Recalentamiento
 - Tratamiento térmico
 - Especiales
- d) Forma de recuperación de los gases

1.6.3. Ventajas del horno metálico

Este tipo de hornos metálicos tienen las siguientes ventajas [37]:

- La materia prima se encuentra adentro del recipiente hermético, esto permite mejor manejo en la salida de los gases en el proceso de pirólisis.
- Se puede aprovechar todo el biochar conseguido en la pirólisis.
- Los hornos metálicos son fáciles de transportar.
- Su costo no es elevado y su mantenimiento es mínimo.
- Todo el carbón que se produce es utilizable y posee una eficiencia constante en la carbonización.

1.6.4. Desventajas de hornos metálicos

Como desventajas se tiene las siguientes [38]:

- La madera tiene que ser cortada en trozos medianos y secada durante 3 semanas.
- Tiene una vida alrededor de 2 - 3 años.
- Posee bajo hermetismo térmico de tal manera que existe pérdida de calor por las paredes del horno.
- Requiere un medio de transporte: camión, remolque, entre otros.

1.6.5. Balance térmico en hornos pirolíticos

La energía total E forma una parte considerable de los sistemas cerrados que constan de una masa fija se encuentran y en la práctica consiste en la energía interna U . Éste es un caso especial para los sistemas estacionarios, ya que no comprenden cambios en

la velocidad o elevación en el proceso. De tal modo que la relación del balance de energía se reduce a [14]:

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde:

Q : cantidad de transferencia de calor que entra o sale del sistema, [$^{\circ}\text{W}$].

m : masa, [kg].

c_v : calor específico a volumen constante, [kJ/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$].

ΔT : cambio de temperatura del sistema, [$^{\circ}\text{C}$].

Para realizar el balance térmico del horno se debe realizar una igualdad de calores, que actúan en el proceso. Es decir, el calor que se entrega al horno por la ignición de un combustible debe ser igual al calor que consume el proceso y las pérdidas del horno.

Esto se denomina de la siguiente manera:

- Q_1 : calor que se entrega al horno
- Q_2 : calor que utiliza en el horno para el proceso de calentamiento
- Q_3 : calor de los gases calientes que salen por la chimenea
- Q_4 : calor cedido por las paredes del horno

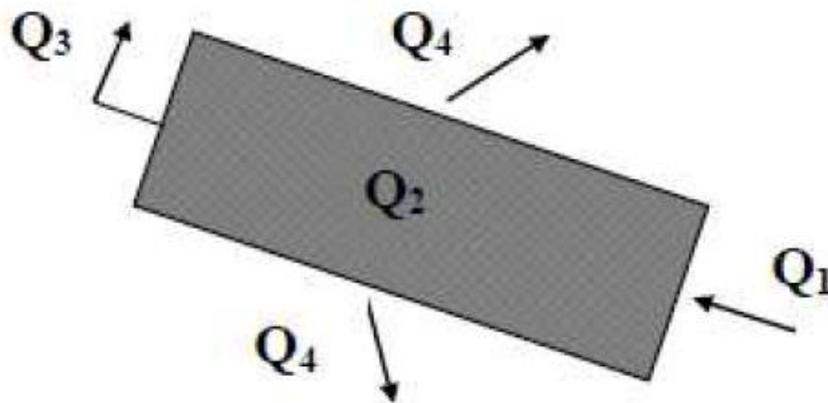


Figura 4. Balance de energía [14]

1.7. Formas de transferencia de calor

Según Cengel et al. [39] la transferencia de energía se produce del que posee la temperatura más alta hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se interrumpe cuando ambos llegan a una misma temperatura.

Hay 3 tipos de formas para transferir el calor como conducción, convección y radiación. Para que haya transferencia de calor se requiere de una diferencia de temperatura y todos estos procesos ocurren del medio que tiene la temperatura mayor hacia uno de temperatura menor [39].

1.8. Transferencia de calor por conducción

Cengel et al. [39] definen que, la transferencia de energía por conducción se da entre partículas más energéticas hacia las menos energéticas de una sustancia, la conducción puede darse entre los sólidos, líquidos o gases, también expresa que, la transferencia de calor a través de un medio en un sentido específico es directamente proporcional a la diferencia de temperatura y al área perpendicular, a su vez, es inversamente proporcional al trayecto en ese sentido. Esto se expone en forma diferencial por la ley de Fourier de la conducción de calor en forma unidimensional, en la Figura 5 se presenta la pendiente de la curva de temperatura en el diagrama T - x.

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Donde:

k : conducción térmica del material, [W/m · °C].

A : área de la pared, [m²].

$\frac{dT}{dx}$: gradiente de temperatura, [°C].

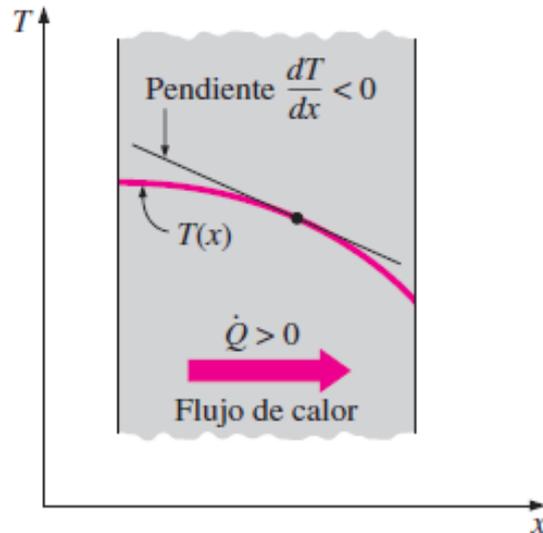


Figura 5. El gradiente de temperatura dT/dx [40]

1.9. Transferencia de calor por convección

La transferencia de energía por convección se da entre una superficie sólida y un líquido o gas que se encuentra adyacente y está en constante movimiento, en este proceso interviene la combinación de la conducción y el movimiento del fluido. Esto quiere decir que entre mayor sea el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor [39].

Cengel et al. [39] describen que, esta transferencia de calor es compleja ya que abarca al movimiento del fluido y la conducción del calor. El movimiento del fluido tiende a mejorar la transferencia poniendo en contacto las superficies más calientes y frías de ese fluido, esto quiere decir que la rapidez de transferencia de calor de un fluido es mayor por convección que por conducción.

La razón de la transferencia de calor por este medio es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa por la ley de Newton de enfriamiento como [39]:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Donde:

h : coeficiente de transferencia de calor por convección, $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

A_s : área superficial de transferencia de calor, $[m^2]$.

T_s : temperatura de la superficie, [°C].

T_∞ : temperatura del fluido lejos de la superficie, [°C].

CAPÍTULO II

ESTADO ACTUAL DE LAS TEGNOLOGÍAS DE HORNOS PIROLÍTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR

En procesos de generación de carbón se utiliza una gran variedad de hornos pirolíticos, la selección del tipo de horno a utilizar depende de varios factores como el tiempo de estadía, tipo de materia prima a utilizar y catalizador, entre otros. [37].

De modo que existen varios hornos para la producción de biochar, hace años con fosas cavadas de tierra, parvas, pasando por los hornos de ladrillo y finalmente hornos metálicos, todos estos son fijos excepto los hornos metálicos que pueden ser transportados hasta el lugar donde se produce la materia prima, caso contrario la madera debe ser transportada al lugar donde se realizará la carbonización [38].

La Overseas Development Administration, de Reino Unido, obtuvo un inmenso reconocimiento y prestigio por el Tropical Product Institute, (TPI) por sus siglas en inglés, desarrollando un horno TPI metálico y que puede ser transportable. El TPI es un horno óptimo en términos de construcción, economía, eficiencia, funcionamiento, productividad y robustez [38].

Para la producción de biochar se debe seguir los siguientes pasos: siembra de la materia prima, recolección de la madera, después hay que secarla y luego preparar la madera para carbonizar, ignición de la madera para obtener el biochar, tamizar el biochar, finalmente hay que almacenar y distribuir el carbón [41].

2.1. Horno de parvas

Es una alternativa a cavar una fosa, la función de este tipo de horno es amontonar la madera en el suelo y tapar con parva de tierra, es un procedimiento antiguo y se lo usa en varios países. El proceso es igual al de la fosa: la madera a carbonizar se confina dentro del recinto con ausencia al aire, está hecho de tierra. Tiene una gran ventaja ya que la leña será carbonizada y puede ser recogida sin apuro, colocada en posición para que el secado sea óptimo antes de tapar y secar [42].

En la Figura 6, se tiene un horno con diámetro de 4 m en su base y entre 1 y 1,5 m de altura, posee de 6 a 10 agujeros en su parte inferior y 1 en su parte superior de 20 cm de diámetro cada uno. Para la producción de biochar se utilizó leña de 2 m de largo de diferentes grosores para cubrir en su totalidad el horno [42].



Figura 6. Parva de tierra lista para su carbonización. Ghana [42]

El tiempo de quema de la biomasa depende del porcentaje de humedad de la madera, una vez terminado este proceso se procede a retirar el biochar, este tipo de hornos con las dimensiones mencionadas tiene un rendimiento por cada 4 toneladas de leña produce 1 tonelada de carbón.

Las parvas se adaptan a la elaboración de pequeña y gran escala de carbón vegetal, también posee algunas desventajas como son las filtraciones de aire que no se pueden controlar, también que es de difícil sellado y en ocasiones el biochar se hace cenizas en algunas zonas, en la Tabla 10, se pone en conocimientos algunas ventajas y desventajas de este horno.

Tabla 10. Características del horno de parvas [41]

Horno de parvas	
Ventajas	Desventajas
Movilidad	Exigente en cuanto la habilidad del operador
Inversiones nulas	Intensiva en mano de obra
Materias primas locales	Carbón de calidad variable, ensuciado por la cobertura
Carbonización de grandes troncos sin trocear	Sensible a las condiciones climáticas
Capacidad ajustable	Bajos rendimientos
No hay descarga	Contaminación importante
Uso de residuos de biomasa	

2.2. Fosas de tierra para fabricar biochar

Al utilizar la tierra para la carbonización está forma un capa protectora contra el oxígeno gracias a esto la madera queda aislada contra una pérdida enorme de calor, esta técnica es la más antigua para carbonizar. A pesar de los años esta técnica aún se usa para producir más carbón vegetal que cualquier otro método [42]. En la Figura 7, se aprecia una fosa de tierra en Ghana cargada de grandes trozos de madera lista para su funcionamiento.



Figura 7. Carbonera en fosa de tierra durante la carga. Ghana [42]

Algunas características de este horno es que su costo es bajo debido a que la materia prima se encuentra relativamente cerca, requiere una mínima inversión del capital ya que solo se necesita de una pala para realizar la excavación, como desventaja se desperdicia mucho recurso, es dificultoso controlar el desplazamiento de gases por lo que quema demasiada madera quedando en cenizas debido a que entra demasiado aire, entre otras que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características del horno fosa de tierra [41]

Horno fosa de tierra	
Ventajas	Desventajas
Materia prima local	Requiere un firme apropiado y con buenas características
Inversiones muy pequeñas	Importante mano de obra
Fácil de operar	Carbonero experimentado y hábil
Carbonización de grandes troncos sin trocear	Sensible a las condiciones climáticas
Capacidad ajustable	Bajos rendimientos
Descarga en un perímetro pequeño	Contaminación importante
Carbón relativamente limpio	

Las fosas de carbón son de gran tamaño y su combustión avanza gradualmente de un extremo a otro. Las grandes fosas rinden alrededor de 6 toneladas de carbón por combustión, son muy dificultosas de controlar, por otro lado, las fosas menores poseen una corriente de aire menor y ocasionan carbón más homogéneo, es de bajo rendimiento y la ocupación de la mano de obra es de menor eficiencia [42].

La figura 8, representa una fosa grande con un volumen cerca de 30 m^3 , que posee un volumen de carga de 26 m^3 , con canales de encendido y salida de humo en la parte inferior, mide 6 m de largo, 2,70 m de ancho y 1,20 m de profundidad. Se carga con trozos de madera de 2,4 m de largo, los gases calientes productos de la quema parcial secan la tierra y calientan la madera hasta el punto de carbonización alrededor de $280 \text{ }^\circ\text{C}$. Todo el proceso de quema tiene una duración de 20 a 30 días, la madera se reduce entre el 50 y 70 % de su volumen inicial, el proceso de enfriamiento está entre los 40 días dependiendo de las condiciones del clima [42].

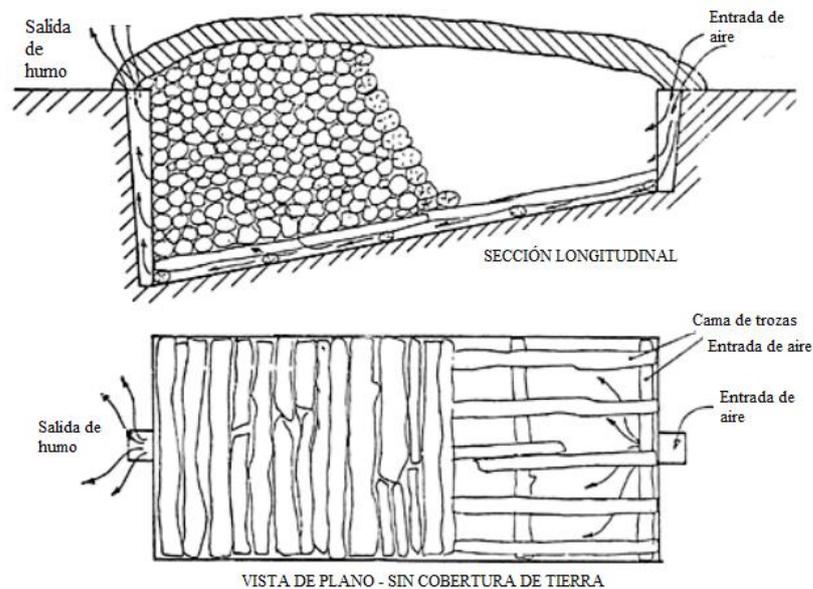


Figura 8. Esquema de un horno de fosa de tierra [42]

Este tipo de horno produce un rendimiento con una carga de 27 o 28 toneladas de madera alrededor de 6 toneladas de carbón con una relación 4,5:1.

2.3. Hornos de ladrillo

Este tipo de hornos representa una de las técnicas más efectivas para producir carbón, han demostrado ser una invención de capital moderna ya que requiere poca mano de obra y tener buen rendimiento de carbón vegetal de calidad para el uso industrial y doméstico [42].

Para tener éxito en la producción de carbón el horno de ladrillo tiene que ser sencillo en su construcción, que no se vea afectado por las tensiones térmicas al calentarse y enfriarse, que sea fuerte para soportar la carga y descarga por tensiones mecánicas, que se pueda controlar la entrada de aire al horno, permitiendo que se enfríe fácilmente y permitir un excelente aislamiento térmico, de lo contrario se producirían zonas frías en las paredes del horno, además, esto impide una ignición adecuada del carbón que puede provocar una formación de trozos de madera carbonizados parcialmente y de poco provecho. La capacidad de conservar el calor de carbonización en los hornos de ladrillo es una razón significativa por la gran eficacia de transformar la madera en biochar [42].

En la figura 9 se tiene un horno de ladrillo tipo media naranja con la vara radial de madera, está constituido por diámetro de 6 m y que posee dos puertas de 1,6 y 1,7 m con 1,10 m en su base y de 0,7 m en su parte superior para la carga y la descarga, en la parte superior posee una chimenea de 0,22 a 0,25 m de diámetro y en su base hay 10 agujeros distribuidos alrededor de 0,06 m de altura y 0,12 m de ancho para la salida de los gases de escape [42].

Para el proceso de pirólisis se carga trozos de leña alrededor de 1 y 1,3 m de largo este tipo de horno tiene una capacidad de 30 toneladas, cargar esta leña tiene un tiempo alrededor de 6 horas, luego se produce la quema que durará entre 6 y 7 días, una vez terminado el proceso de pirólisis llega el proceso de enfriamiento que tiene una duración de 3 a 4 días y finalmente se realiza la descarga que también durará entre 3 y 4 días [42].

El rendimiento de este horno tipo media naranja es por cada 30 toneladas de leña se producirá 7,5 toneladas de carbón vegetal con una relación de 4:1.



Figura 9. Construcción de un horno de ladrillo media naranja [42]

A continuación, en la figura 10, se tiene el horno de media naranja parcialmente terminado, se puede apreciar el enlace entre ladrillos de la pared que tiene doble espesor y como está formado los ladrillos que se asientan en la parte donde el espesor es sencillo.



Figura 10. Horno media naranja parcialmente completado [42]

En la Tabla 12, se presentan otras ventajas y desventajas de los hornos de ladrillo.

Tabla 12. Características de horno de ladrillo [41]

Horno de ladrillo	
Ventajas	Desventajas
Materia prima local	Su construcción necesita de un constructor habilidoso
Buen aislamiento térmico	Instalación fija
Fácil de operar	Costes de descarga
Carbón limpio y homogéneo	Capacidad determinada
Largo tiempo operativo	Enfriamiento lento
No es sensible a las condiciones climáticas	Contaminación importante
	Troceado de grandes troncos

2.4. Hornos por combustión

Cárdenas [35] en su investigación define que la energía calórica para el calentamiento en este tipo de hornos se produce por la incineración de combustibles, la ignición se la realiza por medio de quemadores que se comparan a los que se utilizan en calderas y centrales térmicas. El objetivo principal es mantener la temperatura interna y conseguir una atmósfera que se encuentre controlada y uniforme.

Para alcanzar una temperatura máxima es necesario que la ignición sea completa, esto quiere decir que se aproxima a la teoría sin exceso de combustible ni carburante [35].

2.5. Horno transportable de carbón TPI

Este horno fue de tipo vertical completamente de acero tipo Corten, este acero tiene propiedades químicas que resisten la corrosión sin perder sus propiedades mecánicas, tal como se ve en la Figura 11, tiene el suministro de transmisión de calor en su interior donde pasan todos los procesos de carboneo como: pirolisis, refrigeración y secado.

Este horno posee dos secciones cilíndricas una dentro de otra que encajan y cuenta con cuatro salidas de gases y una tapa en forma de cono en la parte superior, debido al gran

tamaño se necesitan de dos carboneros para realizar la descarga del carbón vegetal [42].

Las características importantes de este horno TPI son [42]:

- Para la fabricación se utiliza un plancha de acero con 3 mm de grosor para elaborar la base del horno; para su parte superior se utiliza una plancha de acero de 2 mm de grosor al igual para su tapa.
- Las dos parte principales del horno son cilíndricas.
- Se utilizan repisas tipo perfil de hierro con un ángulo de 50 mm, soportan la parte superior y la tapa, están soldadas en la parte superior interna de las secciones cilíndricas.
- Consta de ocho tubos para la entrada y salida de aire, ubicados por debajo de la sección inferior del horno. En la cara superior de cada canal, se ha previsto un collar para sujetar la chimenea durante el funcionamiento del horno.
- En la tapa del horno existen cuatro bocas de igual distancia, para la liberación de los gases.

Para la fabricación de biochar la madera deberá ser apilada aproximadamente tres semanas antes de ser carbonizada para que su beneficio sea máximo de carbón, el tamaño de los trozos de madera es entre 45 a 60 cm de largo con diámetro de 20 cm también se pueden colocar ramas con diámetros entre 4 y 13 cm, este horno tiene capacidad alrededor de 7 m³ [42].

El período de carbonización está alrededor de 8 a 10 horas después del encendido. La carbonización está completa cuando el humo se torna en color azul para luego tornarse un poco transparente esto sucede entre las 16 a 24 horas llegando a un temperatura de 1500 a 2000 °C, pasado este tiempo se procede al enfriamiento alrededor de 16 a 24 horas antes de abrir y descargar el producto final [42].

Por cada 3,852 kg de madera se producen 1,083 kg de carbón con una relación de 3,5:1.



Figura 11. Horno metálico TPI realizando la carbonización [42]

2.6. Principales ventajas y desventajas entre los hornos metálicos transportables y métodos tradicionales de fosas o parvas

A continuación se presentan algunas ventajas y desventajas de los hornos metálicos versus hornos de fosas [42]:

a. Ventajas:

- La madera para carbonizar y el biochar se encuentran dentro del horno hermético, esto permite un control máximo de ingreso de aire y el flujo de gases durante todo el proceso de ignición.
- Se requiere menos supervisión durante su funcionamiento, comparado con la fosa o parvas que su supervisión es constante.
- Se puede obtener una eficiencia constante alrededor del 24 % incluyendo carbonilla fina, con las fosas y parvas dan rendimientos menores.
- Se logra aprovechar todo el biochar logrado en el proceso, con las fosas y parvas parte del biochar se desperdicia en el terreno y lo poco que se rescata se encuentra contaminado.
- Los hornos metálicos están fabricados de tal modo que la tapa permite la descarga de agua en zonas con lluvia considerable, los métodos tradicionales funcionan con dificultad en ambientes húmedos.

- El ciclo total de producción de carbón vegetal en los hornos metálicos es entre 2 y 3 días.

b. Desventajas:

- Se debe tener capital inicial para cubrir la fabricación de los hornos metálicos, se necesita de habilidad, equipo y un taller mecánico fundamental.
- La materia prima debe ser cortada simétrica para una eficiencia máxima.
- Su traslado puede ser difícil por terrenos a desnivel.
- El tiempo útil de funcionamiento de los hornos metálicos es alrededor de 2 a 3 años.

2.7. Principales ventajas y desventajas de hornos metálicos comparados con hornos de ladrillo

A continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas de hornos metálicos versus los hornos de ladrillo [42]:

a. Ventajas:

- Los hornos metálicos consiguen ser desarmados con facilidad y montados donde se vaya a hacer la extracción de la madera, esto significa que se evita el transporte de la materia prima para la carbonización.
- El ciclo total de operación en los hornos metálicos es de 2 a 3 días, mientras que los hornos de ladrillo pueden durar 1 semana.

b. Desventajas:

- El valor de construcción de un horno metálico es mayor al del ladrillo con igual producción, por ende, para fabricarlo se necesita de mucha destreza para realizar trabajos en acero y de un taller mecánico.
- Los ladrillos ofrecen una mayor aislación térmica, una cantidad menor de madera se incinera durante el proceso de quema. Los hornos de ladrillo pueden carbonizar maderas de gran diámetro y se requiere menos cortes en la madera.
- Con los hornos metálicos no se puede recuperar los subproductos, mientras que en los hornos de ladrillos existe la posibilidad de recuperar los alquitranes condensables.

Los hornos metálicos para fabricación de biochar son una buena opción debido a que son fáciles de transportar y de fácil funcionamiento. Es muy importante recalcar que este tipo de hornos cuidan la salud de la persona que lo opera, ya que el operario no requiere ingresar al interior del horno para realizar el embolsado [43].

Los hornos metálicos buscan aprovechar los residuos que se encuentren en la bosques ya que es de fácil traslado, al contrario de los hornos fijos que se tiene un costo mayor para el transporte de leña y donde los hornos de parva exigen a una persona que posea capacidad carbonera muy extensa [43].

A continuación, en la Tabla 13 se presentan otras ventajas y desventajas de los hornos metálicos:

Tabla 13. Características del horno de acero [41]

Horno de acero	
Ventajas	Desventajas
Movilidad	Alta inversión
Ciclo corto debido a su rápido enfriamiento	Tiempo de vida (corto), depende del operario y de la calidad de los materiales.
Fácil de operar	Capacidad determinada
Carbón limpio y homogéneo	Troceado de grandes troncos
Descarga en un perímetro pequeño	Contaminación importante
No es sensible a las condiciones climáticas	

2.8. Estufa ANILA por Prof. Ravi Kumar (India)

Según Roth [44] este es un diseño para carbonizar biomasa de tamaño pequeño, el mismo que consiste de dos cilindros concéntricos de diferentes diámetros como se presenta en la Figura 12. El anillo formado entre el cilindro exterior e interior es el encargado para la producción de biochar, el mismo que cuenta con perforaciones en su parte inferior para la liberación de energía y gases producto de la combustión, mientras que, en el cilindro interior también provisto con perforaciones en su parte

inferior para la entrada de aire, es el que se encarga de aumentar la temperatura de pirólisis mediante una combustión completa.

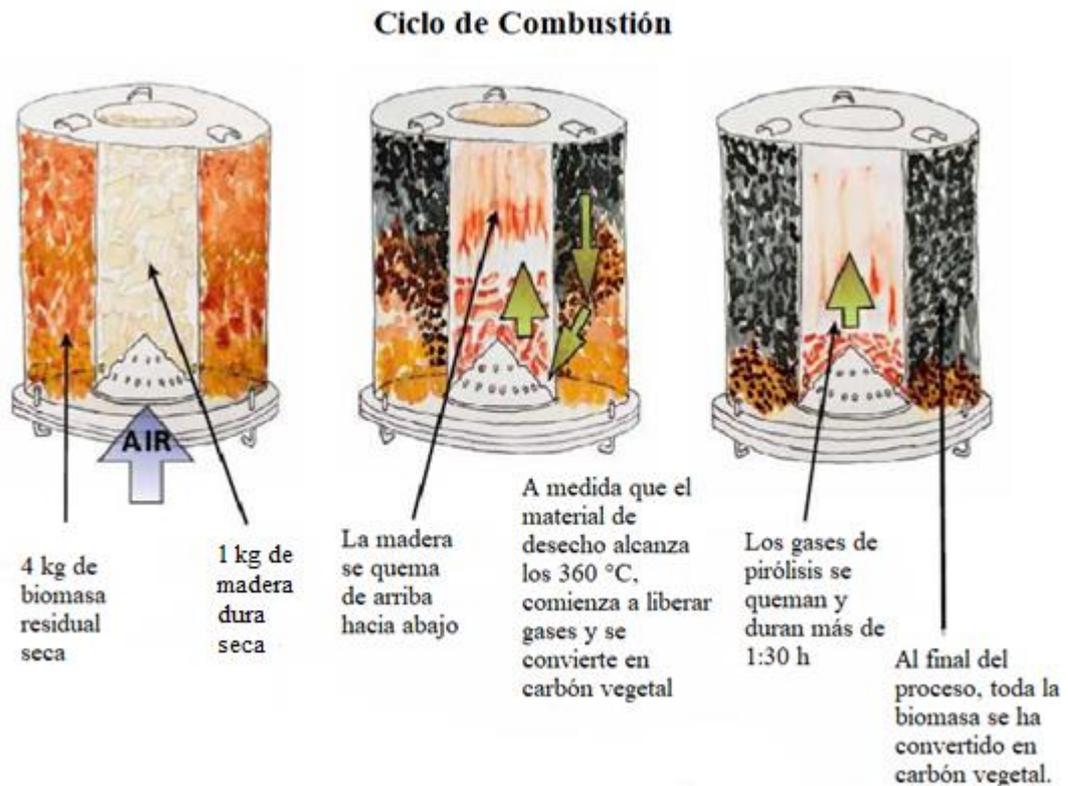


Figura 12. Estufa ANILA para producción de biochar [44]

2.9. ‘1G Toucan’ por Hugh McLaughlin

En el trabajo realizado por Roth [44] se muestra el diseño de un micro-gasificador, utilizado también para producción de biochar en cantidades pequeñas de alta pureza. Este diseño consiste en dos cilindros de diferente diámetro, colocados uno encima del otro como se presenta en la Figura 13.

El aire ingresa a través de orificios en la base del cilindro de mayor diámetro, el mismo que debe estar un poco más arriba del suelo mediante un soporte o alzas, además un aire secundario ingresa por encima del cilindro de mayor diámetro mediante orificios situados en el cilindro de menor diámetro.

El cilindro de mayor diámetro es el depósito de combustible principal, el cual no cuenta con ventilación lateral, por tal motivo al colocar el mismo al suelo se tapan las

entradas de aire de este y al cubrir la parte superior con tapaderas, el equipo queda totalmente sellado evitando la gasificación del carbón en un ambiente sin oxígeno, produciéndose así el biochar.



Figura 13. Micro-gasificador Toucan para producción de biochar [44]

2.10. Conclusión del capítulo

Por lo revisado anteriormente se ha optado por diseñar y construir un prototipo de horno pirolítico metálico, utilizando como guía el diseño de doble cilindro como se muestran en los diseños de Estufa ANILA y 1G Toucan debido a las grandes ventajas que ofrecen los mismos como: transportabilidad, seguridad, costo bajo de fabricación y durabilidad, además que la producción de biochar es más limpia, consistente, homogénea y de fácil uso.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL REACTOR DE PIRÓLISIS

Para el diseño del horno pirolítico de doble tambor hay que hacer una adaptación de los hornos de Estufa ANILA y 1G Toucan que tienen las principales características:

- a) Se dimensionan las secciones principales de acuerdo con la capacidad de 200 litros.
- b) Las dos partes principales del horno son cilíndricas.
- c) El material seleccionado es acero inoxidable para las condiciones de intemperie y temperatura.
- d) Los agujeros de entrada de aire están situados en la parte superior e inferior del horno.
- e) En la tapa superior del horno se encuentra una chimenea en forma de cono para la liberación de los gases hacia la atmósfera.

3.1. Características generales del equipo

a. Dimensiones

El equipo se diseña para trabajar de manera discontinua con una capacidad para 200 litros de biomasa de eucalipto, el cual presenta una densidad básica de $550 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Como la densidad está dada por la relación que existe entre la masa del eucalipto y el volumen que éste ocupa, el valor de masa del horno se determina por:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

$$m = V \times \rho$$

$$m = 0,2 \text{ m}^3 \times 550 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 110 \text{ kg}$$

Entonces se obtiene 110 kg de biomasa de eucalipto.

Para determinar las dimensiones del cilindro exterior del equipo se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$V = A_{cilindro} \times h_{cilindro} \quad (4)$$

$$A = \frac{d^2 \times \pi}{4} \quad (5)$$

Según Hernández y Recio [45] dicen que, para asegurar la menor compactación posible de biomasa en el horno, el valor más alto de transferencia de calor por convección (gases de la combustión), y por consecuencia menor tiempo en el proceso de pirólisis, el horno debe presentar una relación diámetro/altura que garantice que el cilindro tenga más altura que ancho. Por estas razones se ocupa la siguiente relación:

$$h_{cilindro} \times 1,5 = d_{cilindro} \quad (6)$$

Entonces sustituyendo Ecuación (6) en (4) se obtiene:

$$V = \frac{d^3 \times \pi \times 1,5}{4} \quad (7)$$

$$d^3 = \frac{V \times 4}{\pi \times 1,5}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{0,2m^3 \times 4}{\pi \times 1,5}}$$

$$d_{cilindro} = 0,5537 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$h_{cilindro} = 0,5537 \text{ m} \times 1,5$$

$$h_{cilindro} = 0,8306 \text{ m}$$

La altura del cilindro calculada anteriormente corresponde al volumen de biomasa utilizado, por lo tanto, para el correcto funcionamiento del equipo según Hernández y Recio [45], por razones técnicas se procede a calcular la altura real dada por la ecuación siguiente:

$$h_{Real} = h_{Cilindro} \times 1,2 \quad (8)$$

$$h_{Real} = 0,8306 \text{ m} \times 1,2$$

$$h_{Real} = 0,9967 \text{ m}$$

En los trabajos realizados por Guillermo [28] y Cuesta [29], mencionan que en un 100 % de biomasa, la producción de biochar está en un rango de 30 % a 35 %, por lo tanto, para dimensionar el cilindro interior del equipo se utilizará el 30 % de la biomasa total del eucalipto. Siendo el 30 % de esta igual a 60 litros ($0,06 \text{ m}^3$, 33 kg).

Aplicando las ecuaciones (7) y (8) se obtuvo lo siguiente:

$$d^3 = \frac{V \times 4}{\pi \times 1,5}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{0,06 \text{ m}^3 \times 4}{\pi \times 1,5}}$$

$$d_{Cilindro} = 0,3707 \text{ m}$$

Por lo tanto,

$$h_{Cilindro} = 0,3707 \text{ m} \times 1,5$$

$$h_{Cilindro} = 0,5561 \text{ m}$$

Altura de cilindro real:

$$h_{Real} = 0,5561 \text{ m} \times 1,2$$

$$h_{Real} = 0,6673 \text{ m}$$

b. Material

La selección adecuada del material para las partes que lo componen es de suma importancia ya que las propiedades físicas y químicas de este, están relacionadas intrínsecamente en el rendimiento, durabilidad y funcionamiento del equipo.

Debido a las condiciones de diseño requeridas como temperatura (550 °C) y resistencia a las condiciones de intemperie, además que la obtención del producto final (Biochar) sea lo más limpio posible, ya que mencionado producto será utilizado como muestra de laboratorio para pruebas posteriores de caracterización de este, por lo cual se ha optado por utilizar un material inoxidable.

En la Tabla 14, se muestran los aceros inoxidables austeníticos más usados:

Tabla 14. Aceros inoxidable austeníticos comunes [46]

GRADOS	Composición Química							Propiedades del acero	Aplicaciones	
	C	Cr	Ni	Mo	S	Mn	Si			
INOXIDABLES AUSTENÍTICOS	AISI 304	<0.08	18.0 – 20.0	8.0 – 10.5		0.03	<2.0	<1.0	Buena resistencia a la corrosión, excelentes propiedades de conformación en frío y soldabilidad. No se garantiza la resistencia a la corrosión intercrystalina.	Electrodomésticos, industria agrícola, alimenticia (cocinas, cubiertos, equipos de procesamiento), farmacéutica, arquitectura (fregaderos, fachadas, mobiliario urbano, etc.), equipos hospitalarios, industria criogénica (almacenamiento de gases licuados). Piezas varias para la industria petroquímica.
	AISI 304L	<0.03	18.0 – 20.0	8.0 – 12.0		0.03	<2.0	<1.0	Buena resistencia a la corrosión se puede trabajar en frío y soldar fácilmente. Resistencia a la corrosión intercrystalina hasta 350 °C	Procesos en general en donde las condiciones del medio (líquido, gases) son químicamente más agresivos (presencia de cloruros, peróxido de sodio, etc.). Ej: atmósferas marinas e industriales. Fabricación de equipos para la industria textil, petroquímica y de electrodomésticos. Industria farmacéutica.
	AISI 316	<0.08	16.0 – 18.5	10.0 – 14.0	2.0 – 3.0	0.03	<2.0	<0.03	Resistencia mejorada a los ácidos no oxidantes y a la corrosión extrema debido al contenido de molibdeno.	
	ASIS 316L	<0.03			2.0 – 3.0	0.03	<2.0	<0.03	Resistencia a la corrosión intercrystalina hasta los 400 °C y a la corrosión superficial. Es apto para el pulido.	
	AISI 310 S	<0.08	24.0 – 26.0	19.0 – 22.0		0.03	<2.0	<1.5	Insensible al resquebrajamiento a altas temperaturas. Buena resistencia a la oxidación hasta 1000 °C. Buena resistencia a la fluencia a alta temperatura.	Procesos que requieran resistencia mecánica y a la oxidación a altas temperaturas con resistencia al fenómeno de “escamado”. Hornos, calderas, cámaras de combustión, hornos para tratamiento térmico de aceros.

- a. **Aceros inoxidables (304/304L):** Presentan una excelente resistencia a la corrosión en una gran mayoría de medios corrosivos como: comestibles, químicos orgánicos, tintas y químicos inorgánicos. En servicio, la corrosión por ácido puede ser inhibida o acelerada por la presencia de otros agentes químicos [46].
- b. **Aceros inoxidables (316/316L):** Presentan una resistencia a la corrosión mayor a la de los aceros S.A.E. 304, en ambientes expuestos con presencia de ácidos sulfúricos tales como los encontrados en la industria de la pulpa y el papel. S.A.E. 316 tiene una muy buena resistencia al (Pitting) cuando se encuentra en presencia de ácidos fosfórico, acético y ambientes marinos bajo condiciones atmosféricas [46].

Por otro lado, se debe tomar en cuenta las propiedades mecánicas del material, las mismas se muestran a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente [46]

Grado	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Elongación (% en 50 mm)	Dureza brinell Max.	Propiedades para trabajo en frio
AISI 304	515	205	40	202	Muy Buena
AISI 304L	485	170	40	183	Muy Buena
AISI 316	515	205	40	217	Buena
AISI 316L	485	170	40	217	Buena
AISI 310S	515	205	40	217	Buena

En la Tabla 16, se presenta la resistencia a la tracción de los aceros inoxidables usados comúnmente a elevadas temperaturas con exposiciones cortas.

Tabla 16. Resistencia a la tracción a elevadas temperaturas [46]

Resistencia a la tracción (MPa) a elevadas temperaturas con exposiciones cortas					
Grado	Temperatura (°C)				
	100	300	500	700	900
304	530	480	400	270	90
316	540	500	450	320	120
210	540	510	470	340	130

La temperatura máxima de servicio continuo o intermitente que puede soportar un acero inoxidable sin perder alguna de sus propiedades en condiciones oxidantes se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 17. Máxima temperatura de servicio [46]

Máxima temperatura de servicio sugerida en condiciones oxidantes		
Grado	Servicio continuo (°C)	Servicio intermitente (°C)
304	925	850
316	925	870
310	1150	1035

Debido a lo mostrado, anteriormente, en propiedades, resistencia, temperatura de servicio, soldabilidad y a la facilidad de obtención del material en el país, se optó por utilizar un acero inoxidable austenítico AISI 304.

3.2. Balance de masa

Para el balance de masa del equipo a diseñar según Valverde [47], es la igualdad de la suma de masa combustible más masa del aire y la suma de masa de los gases de combustión más la masa de cenizas generadas de dicha combustión y localizadas en el interior del equipo.

$$m_a + m_c = m_{ce} + m_g \quad (9)$$

Donde:

m_a : masa del aire, [kg].

m_c : masa del combustible, [kg].

m_{ce} : masa de las cenizas, [kg].

m_g : masa de los gases de combustión, [kg].

3.2.1. Masa del combustible (m_c)

Para determinar la masa del combustible a utilizarse en el equipo se determina restando la biomasa total del eucalipto menos la de biochar a producirse.

$$m_c = m_{Total} - m_{biochar} \quad (10)$$

$$m_c = 110 \text{ kg} - 33 \text{ kg}$$

$$m_c = 77 \text{ kg}$$

3.2.2. Masa del aire (m_a)

Para determinar la cantidad de aire necesaria para efectuar la combustión de la biomasa del eucalipto según Valverde [47], se hace uso de la siguiente ecuación:

$$W_a = 11,53 C + 34,54 (H - (O/8)) + 4,295 S \quad (11)$$

Donde:

C: % de carbono del eucalipto.

H: % de hidrógeno del eucalipto.

O: % de oxígeno del eucalipto.

S: % de azufre del eucalipto.

Mediante el trabajo realizado por Cuesta [29] y Majofesa [33], se obtuvo la composición del eucalipto mediante un análisis elemental, el cual es el siguiente:

- Carbono = 48,65 %
- Hidrógeno = 16,16 %
- Oxígeno = 44,91 %

- Azufre = 0 %.

Remplazando lo anterior en la Ecuación (11), se obtuvo lo siguiente:

$$W_a = 11,53(0,4865) + 34,54(0,1616 - (0,4491/8) + 4,295(0)$$

$$W_a = 9,2520 \text{ (lb de aire/lb biomasa eucalipto)}$$

Para determinar el volumen específico de aire necesario para efectuar la combustión de la biomasa del eucalipto en condiciones estequiométricas según Valverde [47], se obtuvo mediante la siguiente Ecuación:

$$V = W_a \times R \frac{(t_a + 460)}{(P_a \times 144)} \quad (12)$$

Donde:

W_a : Cantidad de aire necesaria.

R: constante del aire, $[\frac{kJ}{kg \cdot K}]$.

t_a : Temperatura del aire, $[^{\circ}C]$.

P_a : Presión del aire, [hPa].

Los datos de temperatura de 20 °C (68 °F) y presión de 1015 hPa (14,721 Psia) promedio durante el día del Cantón Cayambe, los mismos que fueron tomados de INAMHI [48] y Worldmeteo [49] respectivamente, la constante del aire de $0.2870 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ ($53,33 \frac{ft \cdot Lbf}{Lbm \cdot R}$) obtenida de Cengel et al. [39], reemplazando estos valores en la ecuación (12) se tiene:

$$V = 9,2520 \times 53,33 \frac{(68 + 460)}{(14,721 \times 144)}$$

$$V = 122,897 \text{ ft}^3/\text{Lb}$$

$$V = 7,6564 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Al multiplicar el volumen específico del aire por la masa combustible del eucalipto (m_c) se tiene lo siguiente:

$$V = 7,6564 \frac{m^3}{kg} (77 kg)$$

$$V = 589,5429 m^3$$

Por último, para obtener la masa del aire (m_a), se despeja de la ecuación (3), con una densidad del aire de $1,204 kg/m^3$, la misma que fue obtenida de Cengel et al. [39], (Anexo 4), se tiene:

$$m_a = 589,5429 m^3 \times 1,204 kg/m^3$$

$$m_a = 708,2178 kg$$

3.2.3. Masa de las cenizas (m_{ce})

Para este cálculo fue necesario utilizar un prototipo de horno para la medición de masa de este, el mismo que fue construido para una capacidad total de 50 litros.

En una proporción directa de 4.

$$\frac{200 \text{ litros}}{50 \text{ litros}} = 4$$

La masa de cenizas y residuos obtenidos en el prototipo fueron de 0,62 kg y 0,32 kg respectivamente. Por lo tanto, la masa de las cenizas para el equipo de 200 litros se obtuvo como se muestra a continuación:

$$m_{ce} = (0,62 kg + 0,32 kg) \times 4$$

$$m_{ce} = 3,72 kg$$

3.2.4. Masa de los gases (m_g)

Para el cálculo de la masa de los gases (m_g), se la obtuvo despejando y reemplazando los valores obtenidos anteriormente de la ecuación (9) como se muestra a continuación:

$$m_a + m_c = m_{ce} + m_g$$

$$m_g = m_a + m_c - m_{ce}$$

$$m_g = 708,2178 kg + 77 kg - 3,72 kg$$

$$m_g = 781,4978 kg$$

3.3. Balance de energía

Se entiende al balance de energía o balance térmico del horno a la igualdad entre el calor disponible y la suma del calor utilizable con las pérdidas de calor.

$$Q_D = Q_u + \sum Q_i \quad (13)$$

Donde:

Q_D : Calor disponible, [MJ].

Q_u : Calor utilizable, [MJ].

$\sum Q_i$: Sumatoria de pérdidas de calor, [MJ].

3.3.1. Calor disponible (Q_D)

La energía administrada al horno se encuentra dado por: el calor ingresado con el combustible (Q_c), el calor ingresado con el aire (Q_a) y el calor remanente del carbón del mismo (Q_{ca}) de tal manera que el calor disponible está dado por la siguiente Ecuación [50].

$$Q_D = Q_c + Q_a + Q_{ca} \quad (2)$$

Para determinar el calor del combustible (Q_c) según Figuero [50], se utiliza la siguiente Ecuación:

$$Q_c = P_c \cdot m_c \cdot (1 - \% H) \quad (15)$$

Donde:

P_c : Poder calórico, [kJ/kg].

m_c : Masa del combustible, [kg].

H: Porcentaje de humedad.

El poder calórico de la leña del eucalipto es de 16000 kJ/kg y humedad de 7,73 %, fueron obtenidas de Iglesias [13] y Cuesta [29] respectivamente, al remplazar estos datos en la ecuación (15) se obtuvo lo siguiente:

$$Q_c = 16000 \text{ kJ/kg} \cdot 77 \text{ kg} \cdot (1 - 0,0773)$$

$$Q_c = 1136,766 \text{ MJ}$$

Para determinar el calor del aire (Q_a) según Figueroa [50], se utiliza la siguiente Ecuación:

$$Q_a = m_a \cdot ha \quad (36)$$

Donde:

ha: Entalpia (Aire), [kJ/kg].

m_a : Masa (Aire), [kg].

La masa del aire ($m_a = 708,2178 \text{ kg}$) dato obtenido anteriormente, la entalpia del aire a temperatura promedio de 20 °C (293 K) es 293,166 kJ/kg tomado de Cengel et al. [40] (Anexo 5), aplicando estos datos en la ecuación (14) se obtuvo:

$$Q_a = 798,2178 \text{ kg} \cdot 293,166 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_a = 0,2340 \text{ MJ}$$

De la misma manera que se obtuvo el calor del combustible con la ecuación (15), se procede a determinar el calor remanente del carbón (Q_{ca}), con un poder calórico de 28000 kJ/kg dato obtenido de Iglesias [13], humedad de 0 % y masa del carbón de 23,1 kg, la misma que es el 30 % de la masa del combustible, dando lo siguiente:

$$Q_{ca} = 28000 \text{ kJ/kg} \cdot 23,1 \text{ kg} \cdot (1 - 0)$$

$$Q_{ca} = 646,8 \text{ MJ}$$

Remplazando el calor del combustible (Q_c), el calor del aire (Q_a) y el calor remanente del carbón (Q_{ca}) en la Ecuación (14), entonces el calor disponible será:

$$Q_D = (1136,766 + 0,2340 + 646,8) \text{ MJ}$$

$$Q_D = 1783,8 \text{ MJ}$$

3.3.2. Calor utilizable (Q_u)

El calor utilizable según Figuro [50] está dado por el calor necesario para pasar de biomasa a biochar ($Q_{biochar}$) y el calor de evaporización del agua (Q_v) de la masa combustible (leña eucalipto) dentro del horno, de tal manera el calor utilizado está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_u = Q_{biochar} + Q_v \quad (17)$$

Donde:

$Q_{biochar}$: Calor del biochar, [MJ].

Q_v : Calor de evaporización, [MJ].

Para determinar el calor de evaporización (Q_v) según Figuro [50], se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_v = m_c \cdot (\% H) \cdot Cl \quad (48)$$

Donde:

m_c : Masa del combustible, [kg].

H: Porcentaje de humedad.

Cl: Calor de vaporización del agua, [kJ/kg].

Siendo la masa del combustible de 77 kg con 7,73 % de humedad datos obtenidos anteriormente y calor de vaporización del agua de 2257 kJ/kg obtenida de Cengel et al. [39] (Anexo 6). Al remplazar estos datos en la ecuación (18) se obtuvo lo siguiente:

$$Q_v = 77 \text{ kg} \cdot (0,0773) \cdot 2257 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_v = 13,4338 \text{ MJ}$$

Para calcular el calor del biochar necesario se utiliza la ecuación (14), con una masa de biochar a producirse de 33 kg, poder calórico del carbón de 28000 kJ/kg y humedad de 7,73 %, datos obtenido de Iglesias [13] y Cuesta [29] respectivamente.

$$Q_{biochar} = 28000 \text{ kJ/kg} \cdot 33 \text{ kg} \cdot (1 - 0,0773)$$

$$Q_{biochar} = 852,5748 \text{ MJ}$$

Remplazando el valor de ($Q_{biochar}$) y (Q_v) en la ecuación (17) se determina (Q_u), el cual se muestra a continuación:

$$Q_u = (852,5748 + 13,4338) \text{ MJ}$$

$$Q_u = 866,0086 \text{ MJ}$$

3.4. Pérdidas de calor (ΣQ_i)

Para determinar las pérdidas de calor del horno, no se tomaron en cuenta tanto la pérdida por combustión mecánica incompleta, así como también la pérdida por combustión química incompleta. Por lo tanto, la (ΣQ_i) está dada por la siguiente ecuación:

$$\Sigma Q_i = Q_g + Q_{cv} + Q_{rad} \quad (19)$$

Donde:

Q_g : calor de los gases, [kJ].

Q_{cv} : calor de convección, [kJ].

Q_{rad} : calor de radiación, [kJ].

3.4.1. Calor por radiación (Q_{rad})

Es el calor generado en las paredes del equipo debido a la temperatura y emisividad del material de este, por lo tanto, se determina este valor mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot [T_s^4 - T_{alr}^4] \quad (20)$$

Donde:

ε : emisividad.

σ : constante (Stefan Boltzmann), [$5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$] [39].

A_s : área superficial, [m^2].

T_s : temperatura superficial, [K].

T_{alr} : temperatura de los alrededores, [K].

Para determinar el área superficial del equipo, dado que el mismo tiene forma cilíndrica se aplica la siguiente Ecuación según Cengel et al. [39].

$$A_s = \pi \cdot d_{cilindro} \cdot h_{cilindro} \quad (21)$$

Remplazando los datos de diámetro y altura obtenidos anteriormente se tiene lo siguiente.

$$A_s = \pi \cdot 0,5537 \text{ m} \cdot 0,9967 \text{ m}$$
$$A_s = 1,7337 \text{ m}^2$$

El material para construcción del horno será acero inoxidable 304 [Cr (18 %), Ni (8 %)], por lo tanto tendrá un valor de emisividad de ($\varepsilon = 0,37$ a 500°C) según Fernández [51] (Anexo 7), las temperaturas de diseño $T_s = 550^\circ\text{C}$, temperatura a la que se desea llegar con el equipo y $T_{alr} = 20^\circ\text{C}$, temperatura promedio durante el día del cantón Cayambe, aplicando en la ecuación (20) se tiene:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot [T_s^4 - T_{alr}^4]$$
$$\dot{Q}_{rad} = 0,37 \cdot 5,6704 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot (1,7337 \text{ m}^2) \cdot [(823 \text{ K})^4 - (293 \text{ K})^4]$$
$$\dot{Q}_{rad} = 16,4193241 \text{ KW}$$

En los trabajos realizados por Guerra [2] e Iglesias [13] mencionan que, el tiempo estimado de quema y enfriamiento varía entre dos y tres horas, este tiempo depende de la hora del día y condiciones ambientales, por ende para el cálculo se tomará un tiempo promedio de 6 horas para todo el proceso.

Entonces al multiplicar por el tiempo de 6 horas al (\dot{Q}_{rad}) se tiene lo siguiente:

$$\dot{Q}_{rad} = 16419,3241 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times 21600 \text{ s}$$
$$\dot{Q}_{rad} = 354,6574 \text{ MJ}$$

3.4.2. Calor por convección (Q_{cv})

Para determinar el calor generado por el horno con su entorno o el calor entregado por convección al ambiente. El cálculo se realiza mediante la utilización de la ecuación siguiente:

$$\dot{Q}_{cv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (52)$$

Donde:

h : coeficiente convectivo, [$W/m^2 \cdot K$].

A_s : área superficial, [m^2].

T_s : temperatura superficial, [K].

T_{∞} : temperatura del fluido, [K].

El coeficiente convectivo o también llamado coeficiente de transferencia de calor por convección (h) no es una propiedad directa del fluido, según Cengel et al. [39] menciona que, el coeficiente convectivo es un factor, el cual puede ser determinado de forma experimental, el valor de dicho factor dependerá de todas y cada una de las variables que influyen sobre la convección, como lo son: configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. De modo que h está dado por la siguiente ecuación:

$$N_u = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (23)$$

Donde:

N_u : número promedio *de Nusselt*.

L_c : longitud característica (configuración geométrica), [m].

Para la determinar el número promedio de Nusselt, este equipo tiene forma de un cilindro vertical, primero se debe demostrar que se puede tratar como una placa vertical, para lo cual debe cumplir con la siguiente condición, la misma que según Cengel et al. [39] está dada por la siguiente Ecuación:

$$D \geq \frac{35 \cdot L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \quad (64)$$

Donde:

D: diámetro del cilindro, [m].

L: longitud del cilindro ($h_{cilindro}$), [m].

Gr_L : número de Grashof.

Para determinar el denominado número de Grashof, variable adimensional que representa los efectos de la convección natural, se calcula según Cengel et al. [39] mediante la siguiente Ecuación:

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot Lc^3}{\nu^2} \quad (25)$$

Donde:

g: aceleración gravitacional, [m/s^2].

β : coeficiente de expansión volumétrica, [$\frac{1}{T_f}$], [K^{-1}].

T_s : temperatura de la superficie, [$^{\circ}C$].

T_∞ : temperatura del fluido lejos de la superficie, [$^{\circ}C$].

Lc: longitud característica (configuración geométrica), [m].

ν : viscosidad cinemática del fluido, [m^2/s].

Antes de calcular (Gr_L), primero se debe obtener la temperatura de película (T_f) y longitud característica (Lc) del cilindro en este caso, lo cual se muestra a continuación mediante el uso de las ecuaciones (25) y (26) respectivamente.

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (26)$$

Considerando para nuestro caso $T_s = 550 \text{ }^{\circ}C$, temperatura a la que se desea llegar con el equipo y $T_\infty = 20 \text{ }^{\circ}C$, temperatura de película durante el día del Cantón Cayambe, se tiene:

$$T_f = \frac{(550 - 20) \text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_f = 265 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (538 K)}$$

Con el dato de la temperatura de película (T_f) obtenida anteriormente, se procede a determinar todas las propiedades del fluido a dicha temperatura, en este caso aire, obtenidos de Cengel et al. [39] y así también el coeficiente de expansión volumétrica (β).

A continuación se muestran las propiedades del aire a una presión de 1 (atm) obtenidas mediante interpolación lineal a $T_f = 265 \text{ }^\circ\text{C}$ del (Anexo 4) Cengel et al. [39].

- $Pr = 0,6944$
- $k = 0,04198 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$.
- $\nu = 4,2932 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$.
- $\beta = \frac{1}{538 \text{ K}} = 1,8587 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$.

Para el cálculo la longitud característica (L_c), para un cilindro es igual a:

$$L_c = \frac{V}{S} = \frac{As \cdot h_{cilindro}}{As} = h_{cilindro} \quad (27)$$

Donde ($h_{cilindro}$) es la altura de cilindro, entonces $L_c = 0,9967 \text{ m}$

Mediante los valores obtenidos anteriormente se procede a determinar el número de Grashof mediante la ecuación (25).

$$Gr_L = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (1,8587 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}) \cdot (823 \text{ K} - 293 \text{ K}) \cdot (0,9967 \text{ m})^3}{(4,2932 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2}$$

$$Gr_L = 5191,4097 \times 10^6$$

Entonces al aplicar los datos obtenidos en la Ecuación (24), se pudo obtener lo siguiente:

$$0,5537m \geq \frac{35 \cdot (0,9967m)}{(5191,4097 \times 10^6)^{\frac{1}{4}}}$$

$$0,5537 m \geq 0,1299 m$$

De modo que al equipo cilíndrico se lo puede considerar como placa vertical, por lo cual según Cengel et al. [39] se puede calcular el número promedio de Nusselt (N_u) de manera más exacta aplicando la siguiente formula.

$$N_u = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (28)$$

Donde:

Ra_L : número (Rayleigh).

Pr: número (Prandtl).

Para determinar el número de Rayleigh se la obtiene mediante la ecuación (28) y los datos obtenidos anteriormente.

$$Ra_l = Gr_l \cdot Pr \quad (29)$$

$$Ra_l = (5191,4097 \times 10^6) \cdot (0,6944)$$

$$Ra_l = 3604914896 (3,604 \times 10^9)$$

Al sustituir estos valores en la ecuación (27) se obtiene el valor del número promedio de Nusselt (N_u) como se muestra a continuación:

$$N_u = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(3604914896)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,6944} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$N_u = 182,4337$$

Al sustituir el valor anterior y despejar en la Ecuación (22) se obtiene el coeficiente convectivo (h) como se muestra a continuación:

$$h = \frac{(182,4337) \cdot (0,04198) \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,9967\text{m}}$$

$$h = 7,6839 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Entonces al remplazar el valor de (h) en la Ecuación (21) se obtiene el calor perdido por convención, el cual se muestra a continuación:

$$\dot{Q}_{cv} = 7,7839 \cdot (1,7337) \cdot (823 - 293)$$

$$\dot{Q}_{cv} = 7,1523221 \text{ kW}$$

De la misma manera al multiplicar el resultado anterior por el tiempo de 6 horas se tiene lo siguiente:

$$Q_{cv} = 7152,3221 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times 21600 \text{ s}$$

$$Q_{cv} = 154,4902 \text{ MJ}$$

3.4.3. Calor generado por los gases (Q_g)

Las pérdidas de calor ocasionadas por los gases de combustión se obtienen despejando del balance térmico Ecuación (13).

$$Q_D = Q_u + Q_g + Q_{cv} + Q_{rad}$$

$$Q_g = (1783.8 - 866,0086 - 354,6574 - 154,4902) \text{ MJ}$$

$$Q_g = 408.6438 \text{ MJ}$$

3.5. Eficiencia térmica del horno

Para obtener la eficiencia térmica, la misma que se representa como el cociente entre el calor total absorbido y el calor total entregado, se determina mediante la siguiente Ecuación [52].

$$e = \frac{\text{calor total absorbido}}{\text{calor total entregado}} \tag{30}$$

$$e = \frac{\text{calor total entregado} - \text{calor total perdido}}{\text{calor total entregado}}$$

Desglosando la ecuación anterior en función a los cálculos realizados anteriormente se tiene lo siguiente:

$$e = \frac{Q_D - \sum Q_i}{Q_D} \quad (31)$$

Al remplazar los valores obtenidos se tiene lo siguiente:

$$e = \frac{[1783,8 - (408,6438 + 154,4902 + 354,6574)] \text{ MJ}}{(1783,8) \text{ MJ}}$$
$$e = 0,4854 \text{ (48,5485 \%)}$$

CAPÍTULO IV

SIMULACIÓN DE UN HORNO PIROLÍTICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE HORNO

En este capítulo se muestra los resultados conseguidos a través simulación térmica en el cilindro interior del horno pirolítico de capacidad de 200 litros, las variaciones de temperatura dependerán del calor suministrado por la biomasa del eucalipto y del tiempo de residencia en el mismo (potencia calórica), se realizarán 4 simulaciones de la siguiente manera:

- Utilizando el calor suministrado por la biomasa combustible y tomando en cuenta las pérdidas de calor calculadas anteriormente, en un tiempo de operación continua de 6 horas con una temperatura ambiente de 20 °C, la misma que se da durante el día en la ciudad de Cayambe.
- Utilizando las mismas condiciones anteriores excepto la temperatura ambiente, en este caso se utilizará una temperatura de 9 °C, la misma que se da durante la noche y madrugada en la ciudad de Cayambe.
- Reduciendo el calor suministrado por la biomasa combustible en un 25 % de la inicial, en un tiempo de operación continua de 6 horas y temperatura ambiente de 20 °C (esto se da cuando se utiliza más hojarasca y ramas, en lugar de fuste o leña).
- Aumentando el calor suministrado por la biomasa combustible en un 25 % de la inicial, en un tiempo de operación continua de 6 horas y temperatura ambiente de 20 °C (esto sucede al colocar demasiada biomasa sólida o mala proporción de leña y hojarasca).

Por otro lado, se realizará la construcción de un prototipo de horno de capacidad de 50 litros, el cual será utilizado para realizar pruebas de funcionamiento, toma de muestras y validación del diseño.

4.1. Software

La simulación en los últimos años mediante el uso de software especializados ha sido utilizada cada vez más, es por ello que los programas CAD (diseño asistido por computadora), son usados frecuentemente, como ejemplo, lo es Solidworks Simulation del paquete de SOLIDWORKS, siendo de gran ayuda en análisis, cálculo y validación para empresas y estudiantes, con la única desventaja que utiliza gran recurso computacional, ya que, en la mayoría de computadores de bajos recursos computacionales no es posible realizar estos procesos [53].

4.2. SOLIDWORKS Simulation

Es un software de cálculo y validación, el cual sujeta a los diseños a condiciones similares a la realidad, aumentando de esta manera la calidad de los productos y al mismo tiempo reduce el costo de fabricación de prototipos. Sus principales funciones se muestran a continuación [53]:

- Reduce el número de prototipos, esto se debe a que es posible configurar y probar los productos mediante simulación antes de fabricarlos, evitando errores.
- Evalúa rendimientos de los productos y a la vez se puede mejorar la eficacia de estos en la fase de diseño, controlando así su vida útil, además, se optimizan los diseños gracias a la ayuda del análisis de simulación, adaptando el producto a los resultados calculados.
- Mediante pruebas virtuales en el desarrollo de producto incorporadas en CAD ayudan a comercializar más rápido a los productos, utilizando un menor número de prototipos optimizando el tiempo [53]:

SOLIDWORKS Simulation presenta sus productos asociados a continuación:

- SOLIDWORKS Simulation, presenta 3 paquetes: Standard, Professional y Premium.
- SOLIDWORKS Flow Simulation destinado a la dinámica de fluidos.
- SOLIDWORKS Plastics, destinado a la simulación de moldes y piezas plásticas, presenta 3 paquetes: Standard, Professional y Premium [53].

4.3. Simulación térmica del horno

A continuación, se muestra el proceso que se realizó en la simulación térmica del cilindro interior del horno mediante el uso del software SOLIDWORKS Simulation (Professional), en el cual se localizará la biomasa de eucalipto dispuesta para el proceso de pirolisis.

En primera instancia se procede a realizar el modelado en 3D de los componentes del horno mediante el programa SOLIDWORKS Professional 2019, tomando en cuenta las dimensiones calculadas anteriormente y material idóneo a utilizarse.

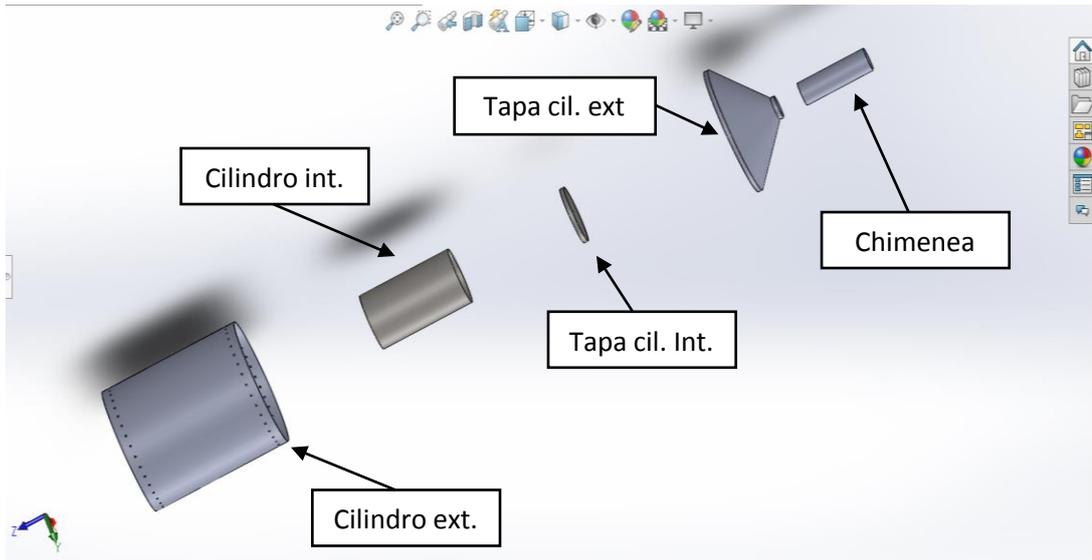


Figura 14. Partes y elementos del horno. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

En segunda instancia se realizó el ensamble del cilindro interior con su tapa, ya que en el mismo se colocará la biomasa del eucalipto a pirolizar, como se muestra en la siguiente Figura.

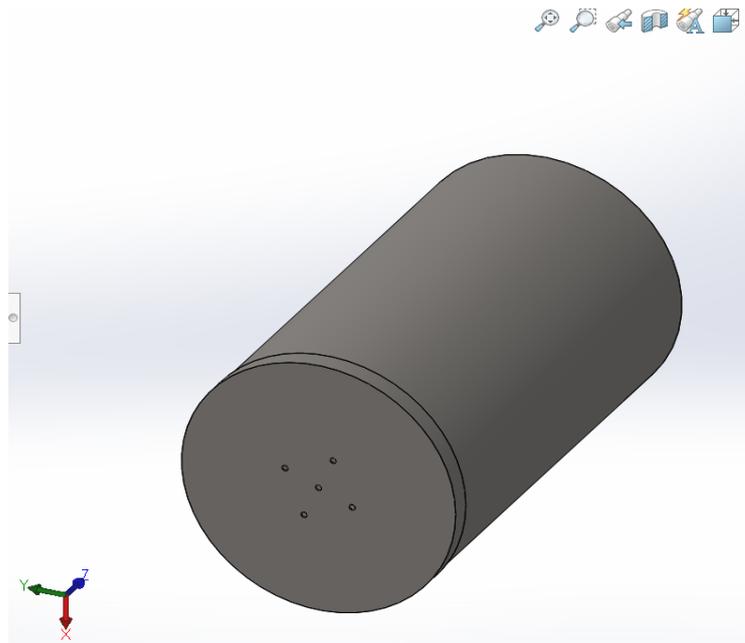


Figura 15. Ensamble cilindro interior y tapa. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

En la Figura 16 se muestra la asignación del material a utilizar, el cual es AISI 304.

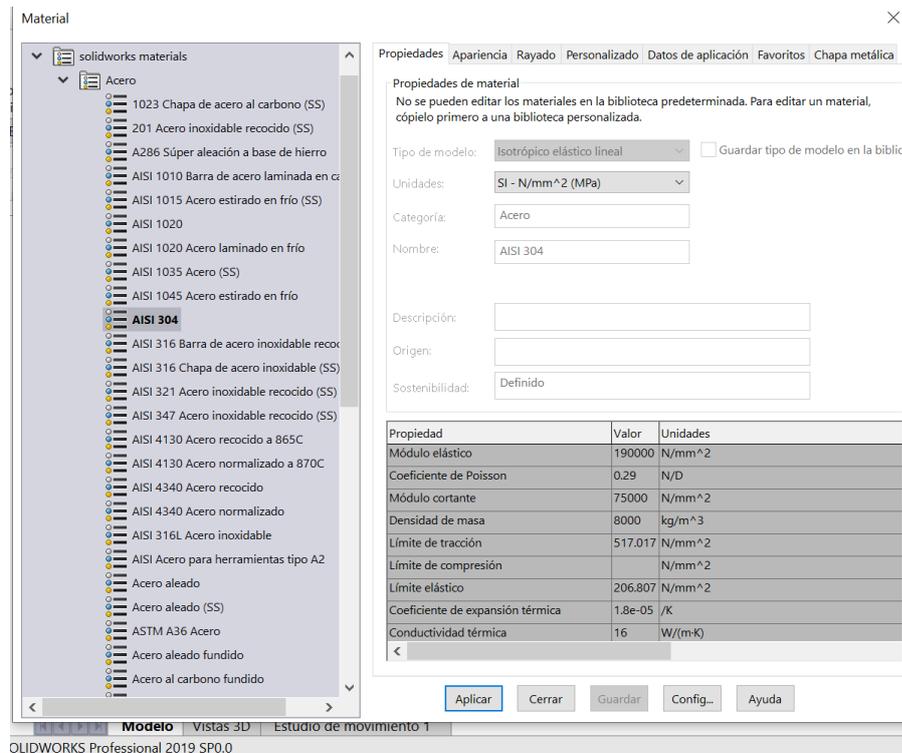


Figura 16. Asignación de material AISI 304. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

A continuación, en la Figura 17 se realizó la primera simulación mediante los siguientes datos de diseño.

- Material: acero AISI 304
- Potencia calórica: 10137,7129 [W]
- Coeficiente convectivo $h = 7,6839 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
- Temperatura ambiente: 20 °C

En este caso para conseguir la potencia calórica, esta se obtuvo mediante la diferencia del calor suministrado por la biomasa del eucalipto de: 1136,766 MJ y el sumatorio de las pérdidas de calor ($Q_c - \sum Q_i$), en un tiempo de operación del horno de 6 horas. Por lo tanto, como se puede observar en la Figura 17, la temperatura mínima y máxima obtenida mediante la simulación por convección es de 99,006 °C y 873,64 °C respectivamente, en la cual, la temperatura media de 486,32 °C se encuentra dentro del rango de temperatura deseada de 400 °C a 500 °C, logrando el proceso de pirolisis deseado.

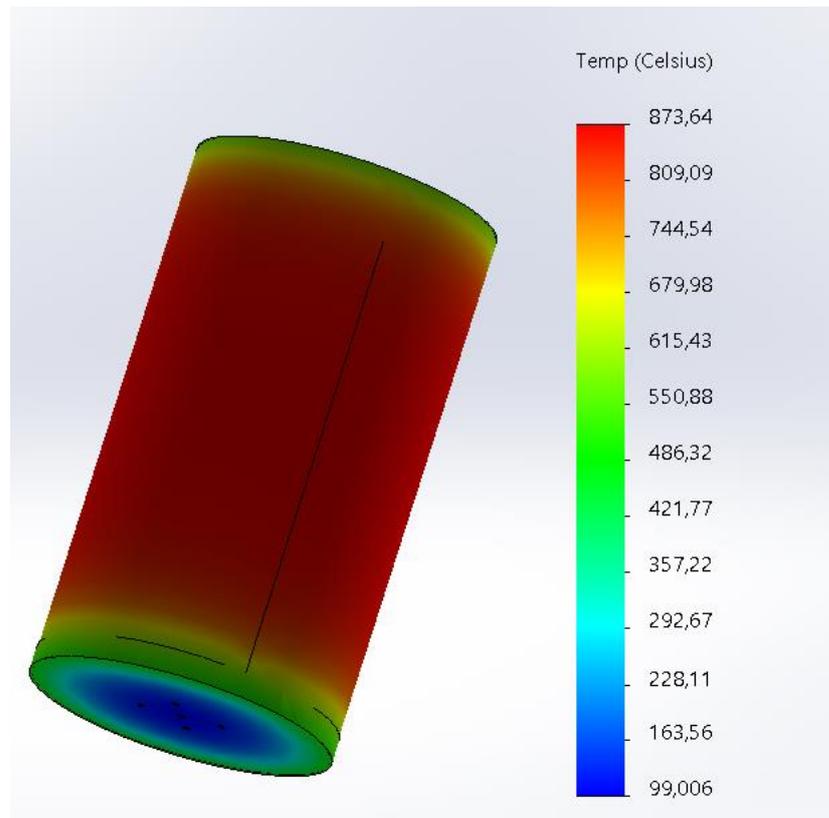


Figura 17. Simulación térmica por convección. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

La temperatura mínima en este caso se encuentra en la parte inferior del cilindro, esto se debe a que la misma no se encuentra en contacto directo con el combustible o potencia calórica.

Al variar el coeficiente convectivo para una temperatura ambiente de 9 °C , la misma que se da durante la noche y madrugada en la ciudad de Cayambe, con la misma potencia calórica y tiempo de operación, se obtuvo lo siguiente:

- Material: acero AISI 304
- Potencia calórica: 10137,7129 [W]
- Coeficiente convectivo $h= 9,4861 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
- Temperatura ambiente: 9 °C

En la Figura 18, se puede notar que la temperatura mínima y máxima obtenida mediante la simulación por convección es de 55,352 °C y 700,59 °C respectivamente, en la cual, la temperatura media de 377,97 °C no se encuentra dentro del rango de

temperatura deseada de 400 °C a 500 °C, por lo cual, una parte de la biomasa no llegaría a realizar el proceso de pirolisis en estas condiciones de temperatura ambiente.

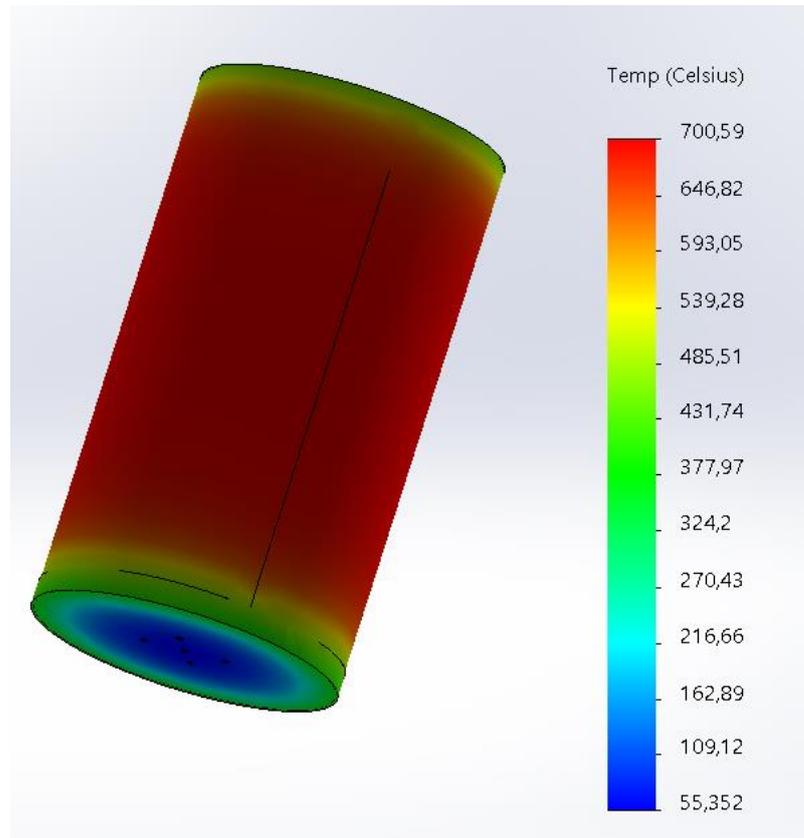


Figura 18: Simulación térmica por convección. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Por otro lado, al disminuir la potencia calórica un 25 % del anterior y el mismo tiempo de operación del horno, se obtuvo lo siguiente:

- Material: acero AISI 304
- Potencia calórica: 7603,2846 [W]
- Coeficiente convectivo $h = 7,6839 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
- Temperatura ambiente: 20 °C

En la Figura 19, la temperatura mínima y máxima obtenida mediante la simulación por convección es de 660,22 °C y 79,219 °C respectivamente, en la cual la temperatura media de 369,72 °C no cumple con el rango de temperatura de 400 °C a 500 °C para el proceso de pirolisis.

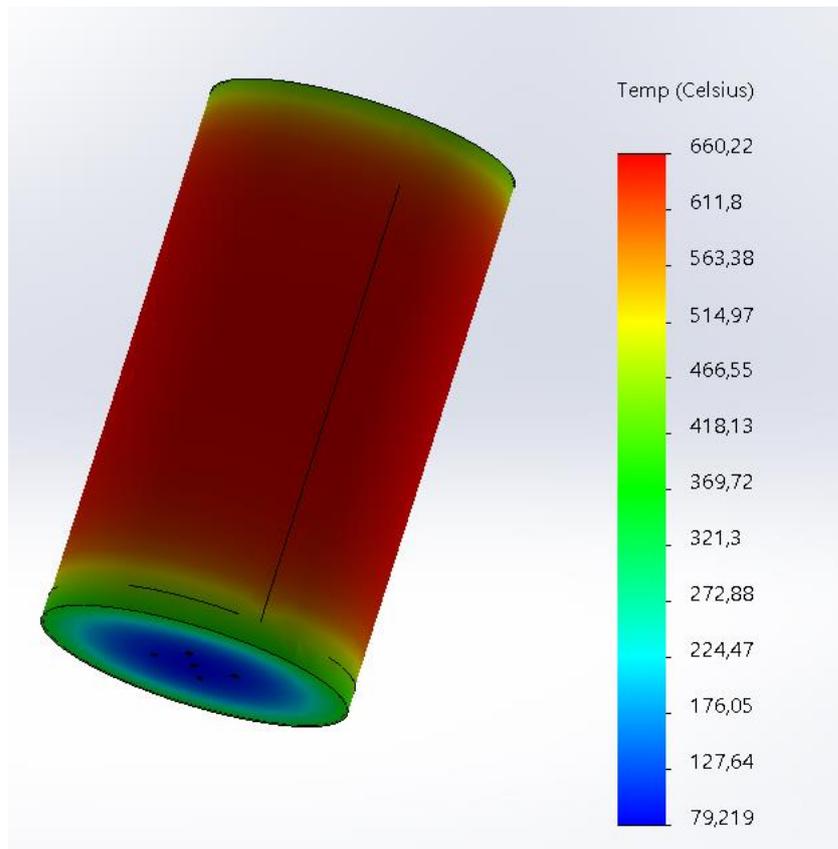


Figura 19. Simulación térmica por convección. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

La disminución del combustible no garantiza que se cumpla el proceso de pirolisis, ya que las temperaturas localizadas en las partes superior e inferior del horno no alcanzan el rango de temperatura para mencionado proceso.

Finalmente, al aumentar la potencia calórica en un 25 % de la inicial y el mismo tiempo de operación del horno, se obtuvo lo siguiente:

- Material: acero AISI 304
- Potencia calórica: 12672,1411 [W]
- Coeficiente convectivo $h= 7,6839 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
- Temperatura ambiente: 20 °C

Como se observa en la Figura 20, la temperatura mínima y máxima obtenida mediante la simulación por convección es de 1087,2 °C y 118,8 °C respectivamente, en la cual la temperatura media de 602,98 °C es mayor a la temperatura de 500 °C para el proceso de pirolisis, obteniendo un biochar con propiedades microscópicas no deseadas.

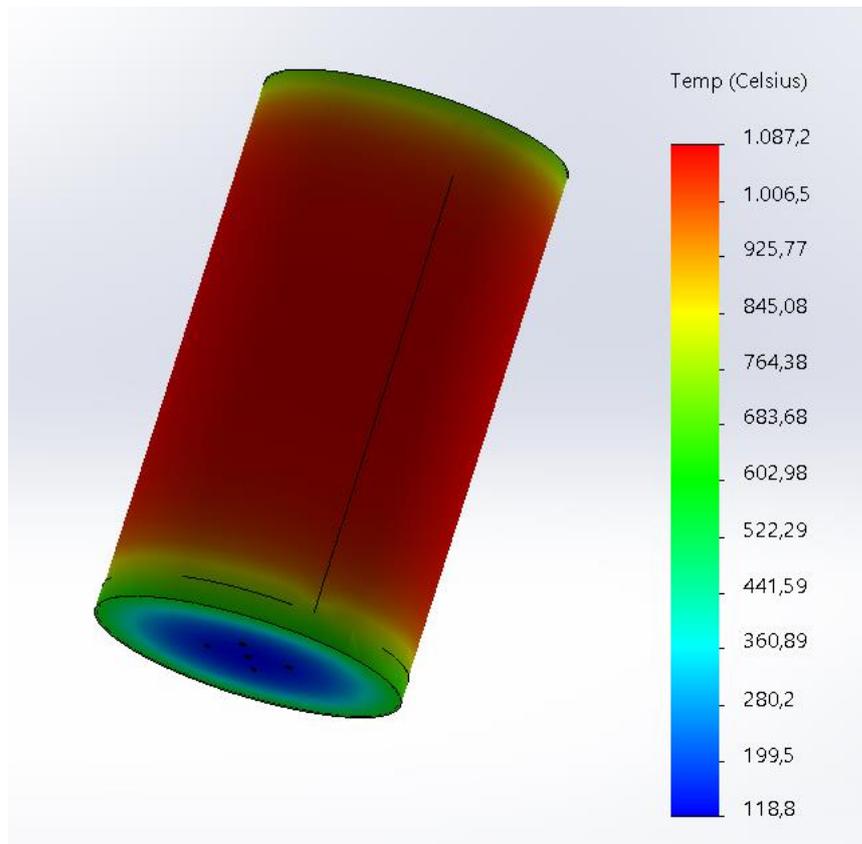


Figura 20. Simulación térmica por convección. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Al tener temperaturas mayores de 600 °C, el proceso pirolítico sería de pirolisis rápida, pero el tiempo de permanencia para este debería estar dentro del rango de 5 min a 30 min, en este caso el tiempo de operación simulado es de 6 horas, como consecuencia el biochar más cercano a las paredes del horno cambian de estructura y a su vez generan cenizas, además la temperatura máxima alcanzada supera a la temperatura de servicio del material, causando la pérdida de alguna de sus propiedades o a su vez la fundición del mismo.

4.4. Construcción y pruebas del prototipo

Para la construcción del prototipo de 50 litros de capacidad se basó en los cálculos realizados anteriormente para el equipo de 200 litros de capacidad con una proporción directa de 1: 4 obteniendo las siguiente: dimensiones:

Cilindro interior:

$$d_{cilindro} = 0,2335 \text{ m}$$

$$h_{cilindro} = 0,3502 \text{ m}$$

Cilindro exterior:

$$d_{cilindro} = 0,3488 \text{ m}$$

$$h_{cilindro} = 0,5232 \text{ m}$$

El material utilizado para la construcción del prototipo de 50 litros fue acero inoxidable AISI 304, el mismo que se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Prototipo de horno pirolítico de 50 litros de capacidad. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

4.4.1 Prueba del prototipo

En primera instancia se procede a pesar mediante una balanza digital tanto la biomasa del eucalipto para producción de biochar como la de biomasa a utilizar como combustible.

El prototipo de horno tiene una capacidad total de 50 litros, donde el 100 % de su biomasa es 27,5 kg, esta se presenta en las Figuras 22 y 23.



Figura 22. Biomasa de eucalipto seco 18,9 kg

La cantidad de hojarasca y ramas debe estar dentro del rango de 30 % al 40 %, y el resto será de biomasa solida (leña), para garantizar una proporción adecuada de biomasa combustible.



Figura 23. Biomasa de residuos eucalipto seco 8,7 kg

Del 100 % de biomasa, el 70 % (19,25 kg) de biomasa residual será utilizada como combustible y el 30 % (8,25 kg) para producción de biochar. Donde se procedió a pesar el cilindro interior del prototipo vacío y lleno, para la obtención mediante una diferencia de estos, el valor de biomasa de eucalipto para producción de biochar se presenta a continuación en la Tabla 18:

Tabla 18. Biomasa de eucalipto para producir biochar

Biomasa de eucalipto a pirolizar	(Kg)
Masa cilindro Interno Vacío	12,1
Masa cilindro Interno Lleno	3,4
Diferencia (lleno - vacío)	8,7

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Como siguiente paso se procedió a tapan e insertar el cilindro interior dentro del cilindro exterior, para luego llenar el mismo con la biomasa residual de eucalipto a utilizar como combustible, como se presenta en la Figura 24.



Figura 24. Preparación del prototipo de horno pirolítico para el encendido

A continuación, se procede a encender el prototipo de horno para una quema alrededor de 3 a 4 horas de duración como se presenta a continuación en la Figura 25.



Figura 25. Encendido del prototipo de horno pirolítico

Una vez empezada la combustión de la madera se comenzó a medir la temperatura del horno mediante un pirómetro, estas temperaturas fueron tomadas a lo largo del calentamiento y enfriamiento del equipo en distintos intervalos de tiempo tal como se presenta en la Tabla 19 a continuación:

Tabla 19. Toma de temperaturas del horno mediante pirómetro.

	Tiempo	Temperatura °C	
	Calentamiento		
	09:10	15.1	
	09:40	97.9	
	10:15	192.2	
	10:50	303.3	
	11:25	427.2	
	12:10	497.1	
Daniel	12.30	516.3	Elaborado por: Sinchire & Danny Topa

	Enfriamiento		
Luego de haber	12:50	450.6	culminado la quema
de la biomasa	13:15	396.0	combustible en su
totalidad, se procede	13:50	289.8	a esperar el
enfriamiento a	14:25	179.6	temperatura
ambiente del equipo,	15:00	83.1	el mismo que tardará
un lapso de 3 a 4	15:45	50.8	horas, para proceder
a verificar el			producto final, el

cual en este caso es el biochar, este proceso se presenta a continuación en la Figura 26.



Figura 26. Verificación del biochar. Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Para finalizar se procede a realizar las mediciones de masa del biochar producido, cenizas y residuos, los mismos que se muestran en la Tabla 20 y la Figura 27.

Tabla 20. Masa del biochar, cenizas y residuos obtenidos mediante el prototipo de horno pirolítico

Biomasa	Masa recipiente lleno (kg)	Masa recipiente vacío (kg)	Diferencia (lleno- vacío) (kg)
Biochar	6,2	3,4	2,8

Cenizas	2,31	1,69	0,62
Residuos	2,01	1,69	0,32

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa



Figura 27. Biochar, cenizas y residuos de la materia prima.

A continuación, en la Tabla 21 se presenta una comparación cualitativa del biochar obtenido mediante el proceso de pirolisis y el carbón obtenido mediante la combustión completa.

Tabla 21. Comparación cualitativa del biochar vs. carbón residual

Biochar	Carbón residual producto de la combustión
Anexo 19.	Anexo 20.



Limpio	Presenta cenizas
Alta porosidad	Baja porosidad
Compacto	Disperso
Conservación parcial de forma inicial	No tienen forma inicial
Alta consistencia	Baja consistencia
Homogéneo	Diferente

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

4.5. Eficiencia del prototipo de horno

Con los datos de tiempo y temperatura tomados anteriormente, se procede a determinar la eficiencia experimental del prototipo de horno pirolítico de 50 litros de capacidad como se muestra a continuación:

Para determinar la eficiencia del prototipo de horno se utiliza la ecuación (30).

$$e = \frac{\text{calor total emitido}}{\text{calor total entregado}}$$

Para determinar el calor emitido por el horno se utiliza la ecuación (20) multiplicado por el tiempo de funcionamiento del horno.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot [T_s^4] \times \text{tiempo}$$

Donde:

ε : emisividad = 0,37.

σ : constante (Stefan Boltzmann), $[5,6704 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4]$, [39].

A_s : área superficial, $[m^2]$

T_s : temperatura superficial, [°C]

Para determina el área superficial de un cilindro se utiliza la ecuación (21), con los datos de diámetro y altura del prototipo de horno obtenidos inicialmente.

$$A_s = \pi \cdot d_{cilindro} \cdot h_{cilindro}$$

$$A_s = \pi \cdot 0,2335 \text{ m} \cdot 0,3502 \text{ m}$$

$$A_s = 0,2569 \text{ m}^2$$

En la Tabla 22 se muestra el calor emitido total, resultado del sumatorio de los calores emitido en los distintos intervalos de tiempo y temperatura.

Tabla 22. Calor emitido en intervalos de tiempo y temperatura

Temperatura °C	Temperatura K	Tiempo min	T ⁴ K ⁴	Q _{rad} kJ
90,70	363,70	40	17497387271,74	226,341
192,20	465,20	75	46833738233,88	1135,928
303,30	576,30	110	110304816968,46	3923,90
427,20	700,20	145	240374517622,40	11271,642
497,10	770,10	190	351713058777,08	21610,90
516,00	789,00	210	387532395441,00	26318,315
450,60	723,60	230	274153776521,24	20391,672
396,00	669,00	255	200310848721,00	16518,683
289,80	562,80	290	100326660177,95	9409,035
179,60	452,60	325	41962195082,50	4410,342
83,10	356,10	360	16080068507,98	1872,066
50,80	323,80	405	10992775980,67	1439,770
ΣQ_{rad}				118528,598

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Se procede a calcular el calor entregado del combustible, el cual se determina utilizando la ecuación (15).

$$Q_c = Pc \cdot m_c \cdot (1 - \% H)$$

Donde:

P_c : Poder calórico.

m_c : Masa del combustible = 19,25 [kg].

H: Humedad.

El poder calórico de la leña del eucalipto de 16000 kJ/kg y humedad de 7,73 %, fueron obtenidas de Iglesias [13] y Cuesta [29] respectivamente, al remplazar estos datos en la ecuación (15) se obtuvo lo siguiente:

$$Q_c = 16000 \text{ kJ/kg} \cdot 19,25 \text{ kg} \cdot (1 - 0,0773)$$

$$Q_c = 284,1916 \text{ MJ}$$

Finalmente se reemplaza los valores obtenidos en la ecuación (30), obteniendo la eficiencia práctica del prototipo de horno pirolítico de 50 litros de capacidad.

$$e = \frac{118,5285 \text{ MJ}}{284,1916 \text{ MJ}} = 0,4170 = 41,7\%$$

4.6. Conclusión del capítulo

Durante la simulación utilizando el calor suministrado por la biomasa combustible a una temperatura ambiente de 20 °C, tomando en cuenta las pérdidas de calor y un tiempo de operación de 6 horas, se pudo demostrar que la temperatura media obtenida se encuentra dentro del rango de temperatura deseada de 400 a 550 °C, por lo tanto, se puede afirmar que el horno cumple con el requerimiento de temperatura para realizar el proceso de pirolisis de biomasa de eucalipto mediante el uso de este como combustible.

Además, en la prueba realizada con el prototipo de horno, se obtuvo 2,8 kg de biochar de un total de 8,7 kg de biomasa de eucalipto, el cual viene a ser el 32,18 %, encontrándose dentro del rango esperado de producción el cual es del 30 % al 35 %, igualmente se determinó la eficiencia practica del prototipo, la cual es 41,7 %, la misma que no difiere demasiado comparada a la eficiencia teórica calculada de 48,5 %.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

Después de haber realizado la etapa de diseño se debe tener en cuenta si el proyecto es o no rentable, por ende, se necesita realizar un estudio aproximado de los costos de inversión, costos de operación que aportaran una idea sobre si es conveniente realizar

el horno pirolítico de 200 litros. Los costos que involucran son: costos directos e indirectos, mano de obra, ente otros.

5.1. Costos directos

Los costos directos tienen relación con la fabricación o la realización de productos o servicios, mientras mayor sea el costo de fabricación del horno mayor será el costo de venta y el retorno de inversión.

5.1.1. Costo de materiales

Se tuvieron en cuenta todos los materiales que son necesarios para la construcción del horno pirolítico y se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Costo de materiales

Costos de Materiales				
Ítem	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
1	ACERO INOXIDABLE 304 N4 PULIDO 1.5 mm	2	111,32	222,64
2	Rollo De Alambre Mig 5kg / 0.9 Elektro Sd002.1	1	16,50	16,50
3	Electrodo (5Kg)	1	20,00	20,00
4	Discos de corte acero	3	12,50	37,50
5	Disco de pulir acero	3	8,50	25,50
6	Juego de brocas Acero Inox 6 - 16 mm	1	15,00	15,00
7	Cepillo circular de alambre	1	4,75	4,75
Subtotal				341,89
Iva 12%				41,03
Total				382,92

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

5.1.2. Costo de construcción

El costo de construcción es el lapso empleado en la fabricación y se lo calcula según el tiempo de mecanizado y el de utilización del equipo para la fabricación y se detalla en la Tabla 24.

Tabla 24. Tiempo de fabricación

Tiempo que se utiliza en cada etapa			
Ítem	Elemento	Tiempo en minutos (min)	Tiempo en horas (h)
1	Cilindro exterior	240	4,0
2	Tapa inferior cilindro exterior	60	1,0
3	Cilindro interior	180	3,0
4	Tapa inferior cilindro interior	45	0,75
5	Cono cilindro exterior	210	3,5
6	Chimenea	60	1,0
Tiempo Total		795	13,25

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

5.1.3. Costo del maquinado

Es el tiempo que se necesita para mecanizar y el tiempo muerto de una máquina, en la Tabla 25 se presenta los valores dependiendo de las horas que se trabaja.

Tabla 25. Costo de maquinado

Costo de maquinado			
Máquina	Tiempo en horas (h)	Costo de hora máquina (USD)	Costo total (USD)
Cortadora	2,5	11,25	28,13
Taladro	1,5	8,50	12,75
Soldadora	8,5	12,50	106,25
Moladora	3,5	8,50	27,75
Baroladora	4,5	22,50	101,25
Corte plasma	3,5	27,50	96,25
	24	Total	372,41

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

5.1.4. Costo de mano de obra

Es el trabajo realizado por el trabajador en la elaboración del horno pirolítico, en Ecuador el Ministerio del Trabajo tiene una tabla de cada sector (Anexo 1), el costo de mano de obra se calcula en la Tabla 26, que se detalla el valor dependiendo de las horas laboradas.

Tabla 26. Costo de mano de obra

Costo de mano de obra				
Tiempo en horas (h)	50% horas muertas	Tiempo total en horas (h)	Costo de 160 horas (USD)	Costo de mano de obra
24	12	36	408,56	91,93

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

5.2. Costos Indirectos

Son los valores que no logran medir directamente con algunos determinados bienes, sino que se debe asumir con criterio coherente.

5.2.1. Costo de insumos

Son los valores económicos de los materiales, como se desempeña y el tiempo del trabajador en realizar el cálculo y diseño del proyecto. Al valor se lo determina tomando el 30 % del valor total de todo el proyecto.

5.2.2. Costos adicionales

Es el valor que no se toma en cuenta y se presenta durante la construcción del equipo, ya que no son elevados se deben tomar en cuenta. Para determinar el costo se calcula el 10 % del costo total del proyecto.

5.3. Costo total del proyecto

Se determina mediante la suma de los costos directos y costos indirectos como se presenta en la Tabla 27.

Tabla 27. Costo total del proyecto

Costo total del proyecto		
Tipo de costo	Descripción	Valor (USD)
Costos directos	Costo de materiales	382,92
	Costo de maquinado	372,41
	Costo de mano de obra	91,93

Costos indirecto	Costo de diseño 30%	254,18
	Costos adicionales 10%	84,73
Total		1186,16

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Una vez determinado el valor total del proyecto hay que realizar el análisis financiero para determinar el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

5.4. Análisis financiero

Se calcula a través de interpretaciones del flujo de caja dando una idea la persona que invierte si se obtendrá la rentabilidad deseada, también en que tiempo se recuperará la inversión realizada. Para esto es necesario determinar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo que se va a recuperar la inversión (PRI) [54].

5.5. Depreciación

Se refiere a la vida útil del equipo, es decir, el tiempo en la cual estará en funcionamiento esto producirá una disminución periódica de su valor.

Para calcular la depreciación se aplica la siguiente Ecuación:

$$D = \frac{B}{N} \quad (32)$$

Donde:

D: depreciación por año, [\$ por año].

B: Valor total del proyecto, [USD].

N: Vida útil, [años]

$$D = \frac{1186,16}{3}$$

$$D = 395,39 \text{ USD/año}$$

5.6 Valor actual neto (VAN)

El valor actual neto es el encargado de medir el resto del valor obtenido después que la rentabilidad se haya obtenido y posteriormente la recuperación de la inversión

inicial, todo fue calculado con una tasa de interés del 8 % para un período de 12 meses como se muestra en la Tabla 28.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad (33)$$

Donde:

I_0 : Inversión al inicio del proyecto, [USD].

n : Número de periodos.

t : Periodos.

F_t : Flujo de dinero en cada periodo.

k : Interés de la inversión.

Tabla 28. Valor actual neto (VAN)

Periodo	FNE [USD]	Flujo activo [USD]
0	-1186,16	-1186,16
1	288,61	267,23
2	288,61	247,44
3	288,61	229,11
4	288,61	212,14
5	288,61	196,42
6	94,61	59,62
7	288,61	168,40
8	288,61	155,93
9	288,61	144,38
10	288,61	133,68
11	288,61	123,78
12	94,61	37,57
VAN		789,53

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

El resultado que se obtiene, según Chain [54], si el valor del VAN es mayor que 0, quiere decir cuánto se ganará con el proyecto una vez recuperada la inversión, ahora, si se tiene un VAN es igual a 0, quiere decir que el proyecto tiene una tasa deseada luego de recobrar la inversión inicial, el proyecto es grato ya que da a la persona que invierte lo que esperaba ganar, por último, si es VAN es menor que cero, muestra la suma faltante para poder superar la tasa deseada luego de recobrar la inversión.

5.7. Tasa interna de retorno (TIR)

Para Chain [54], la tasa interna de retorno calcula la rentabilidad del proyecto en porcentaje, se calcula con la ecuación (34) como se muestra en la Tabla 29.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 \quad (34)$$

Donde:

I_0 : Inversión al inicio del proyecto, [USD].

n : Número de periodos

t : Periodos

F_t : Flujo en cada periodo

k : Interés de la inversión

Tabla 29. Tasa interna de retorno (TIR)

Periodo	FNE [USD]	Flujo activo [USD]
0	-1.186,16	- 1.186,16
1	288,61	-897,55
2	288,61	-608,94
3	288,61	-320,33
4	288,61	-31,72
5	288,61	256,89

6	94,61	351,50
7	288,61	640,11
8	288,61	928,72
9	288,61	1.217,33
10	288,61	1.505,94
11	288,61	1.794,55
12	94,61	1.889,16
TIR		20,16%

Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

En la Tabla 29, se estima ocupar un FNE igual al calculado en el VAN, hay que tener en cuenta que cada seis meses se realizará un mantenimiento preventivo del horno, por ende, se reducirá el flujo neto efectivo en los periodos seis y doce. En un flujo de inversión puede darse varias situaciones como se muestra en la Tabla 30 [54]:

Tabla 30. Relación del VAN con la TIR [54]

VAN y TIR	Rentabilidad
VAN >0 y TIR >0	La rentabilidad es mayor a la exigida luego de recuperar todo lo invertido.
VAN =0 y TIR >0	La rentabilidad es igual a la exigida luego de recuperar todo lo invertido.
VAN <0 y TIR >0	La rentabilidad es menor a la exigida luego de recuperar todo lo invertido
VAN <0 y TIR =0	La rentabilidad es 0, pero se recobra la inversión total.
VAN <0 y TIR <0	La rentabilidad es 0 y no se recobra la inversión total.

5.6. Periodo de recuperación de la inversión (PRI)

Chain [54] expresa que, el tiempo para recuperar lo invertido es la tercera norma más usada para valorar un proyecto y posee como objetivo saber en qué determinado tiempo se recuperará lo invertido inicialmente, el cálculo se realiza a partir de la ecuación (35).

$$PRI = N + \frac{|F_a|}{F_{a+1}} \quad (35)$$

Donde:

N : Número de periodos con flujo negativo

F_a : Último valor negativo del flujo acumulado

F_{a+1} : Primer valor positivo del flujo acumulado

Para el cálculo de recuperación de lo invertido se utiliza la ecuación (35) y los datos obtenidos en la Tabla 29.

$$PRI = 5 \text{ meses} + \frac{|-31,72 \text{ USD}|}{256,89 \text{ USD}}$$

$$PRI = 5.12 \text{ meses}$$

$$PRI \approx 5 \text{ meses}$$

Este resultado corrobora con los datos de la Tabla 29, donde el resultado es positivo en el mes cinco.

5.8. Conclusión del capítulo

Al realizar el análisis financiero se puede determinar la rentabilidad del proyecto, una vez calculado todos los indicadores se tiene el costo total del proyecto que es de 1186,16 USD, a su vez también se calculó el costo de mantenimiento preventivo con valor de 94,61 USD, este costo se deberá asumir cada seis meses.

El resultado de los indicadores financieros del VAN con 789,53 USD y la TIR con un 20,16 %, ambos se calcularon en un periodo de 12 meses, muestra que la recuperación de la inversión del proyecto será a partir del mes 5.

CONCLUSIONES GENERALES

Mediante la revisión bibliográfica, se pudo constatar que la producción de biochar en condiciones controladas para enriquecer los suelos de cultivos, es considerada una alternativa adecuada para incitar a una agricultura sostenible en las comunidades en donde los suelos de cultivo son pobres en nutrientes, aprovechando la biomasa del eucalipto para mejorar la fertilidad de estos, ya que el eucalipto presenta un 30 % de nutrientes en el fuste y el 70 % en las ramas, corteza y hojas.

Tomando en cuenta las tecnologías de hornos existentes para la generación de biochar, se llegó a la conclusión que el horno pirolítico de doble cilindro metálico, es la mejor

opción para la producción de biochar mediante el uso de biomasa de eucalipto, debido a las grandes ventajas que este presenta comparado con métodos tradicionales como transportabilidad, seguridad, fácil uso, menor tiempo de funcionamiento, aprovechamiento de la biomasa residual de eucalipto como combustible y el aprovechamiento de los gases del proceso de pirolisis para elevar la temperatura del horno.

Se diseñó un horno pirolítico de doble cilindro en acero inoxidable AISI 304 de 200 litros de capacidad, el mismo que cuenta de dos partes principales: zona de pirolisis y zona de combustión, obteniendo una eficiencia teórica de 48,5 % mediante los cálculos realizados de balance de masa, balance de energía y pérdidas de calor, asumiendo una temperatura ambiente de 20 °C, poder calórico y humedad del eucalipto de 16000 *kJ/kg* y 7,73 % respectivamente.

Mediante la simulación en el Software SolidWorks se pudo corroborar que, al usar la biomasa de eucalipto como combustible, la temperatura media se encuentra dentro del rango de temperatura esperada de 400 a 500 °C, demostrando la fiabilidad del horno para realizar el proceso de pirolisis, en un tiempo de residencia de 6 horas.

Se demostró que el horno diseñado para la generación del biochar solicitado, es dependiente de la temperatura ambiente y cantidad de combustible utilizado, puesto que en los resultados de las simulaciones realizadas al tomar una temperatura de 9 °C no alcanza la temperatura para el proceso de pirolisis, por otra parte, al disminuir el combustible en un 25 %, el cual representa utilizar más hojarasca y menor leña, la temperatura del horno disminuye, por lo cual no se realiza el proceso pirolítico.

Mediante la prueba del prototipo de horno de 50 litros realizada a una temperatura ambiente de 16 °C y no a la temperatura de 20 °C a la cual se diseñó, se comprobó la validez del mismo, ya que el prototipo alcanzó una eficiencia experimental de 41,7 % a una temperatura máxima de 500 °C necesarios para el proceso de pirolisis, además, que el tiempo de quema y de enfriamiento están en un intervalo esperado de 3 a 4 horas, obteniendo un porcentaje de 32,18 % de biochar limpio, consistente y homogéneo, el cual se encuentra dentro del rango del 30 % al 35 % esperado.

Mediante el análisis financiero del VAN y TIR que en ambos casos tienen valores mayores que 0 se determinó que el proyecto es rentable y factible para la generación de biochar ya que el costo inicial de inversión es de 1180,54 USD para una producción de materia de 110 kg al mes, al costo total del proyecto se lo podrá recuperar en un periodo de 5 meses.

RECOMENDACIONES GENERALES

Se recomienda aprovechar toda la masa residual del eucalipto como lo son las ramas, hojarasca, fuste, corteza, entre otros, ya que los mismos aportan un porcentaje de nutrientes al suelo al degradarse.

Para una correcta combustión se recomienda usar biomasa seca (7,73 % de humedad), ya que la madera o biomasa residual fresca no llegaría a quemarse, por lo cual no llegaría a producirse las condiciones de temperatura para el proceso de pirolisis.

Es recomendable usar la cantidad necesaria de biomasa de combustible (77 kg), ya que al usar menos de esta no se garantiza las condiciones de temperatura para la generación

de biochar de buena calidad y al usar mayor cantidad de combustible, el horno podría sufrir daños en su estructura.

Con el fin de asegurar el cumplimiento del proceso de pirolisis se recomienda encender el equipo en el día (12:00 horas) en temperaturas superiores a 10 °C, ya que en temperaturas bajas no se garantiza las condiciones de temperatura para el proceso de pirolisis.

REFERENCIAS

- [1] C. García-Izquierdo, J. G. Rosas-Mayoral, M. E. Sánchez-Morán, J. Pascual-Valero, and M. T. Hernández-Fernández, *Enmiendas orgánicas de nueva generación : Biochar y otras biomoléculas*. Mundi-Prensa, 2014.
- [2] P. Guerra Laura, “Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana.,” *Univ. Nac. Agrar. La Molina*, p. 101, 2014.
- [3] Lehmann and J. S, *Biochar for Environmental Management*. 2009.
- [4] A. Escalante *et al.*, “Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil,” *Terra Latinoam.*, vol. 34, pp. 367–382, 2016.

- [5] M. A. Gilces Reyna, “Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. Tesis de Master. Universidad de Valladolid. España,” p. 120 pp, 2014.
- [6] G. Torres-Sallan, O. Ortiz, J. M. Ubalde, X. Sort, and J. M. Alcañiz, “El biocarbón (biochar): una forma de secuestrar carbono y de transferir menos contaminantes al subsuelo y acuíferos,” no. May 2014, p. 40037, 2014.
- [7] S. Mahimairaja and S. Shenbagavalli, “Production and Characterization of Biochar From Different Biological Wastes,” *Int. J. Plant, Anim. Environ. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 197–201, 2012.
- [8] D. P. Abenza, “Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta.,” *Eur. Union’s Eco-Management Audit Scheme*, pp. 5–8, 2005.
- [9] J. A. Ortiz Pozas, “Proyecto básico de una planta de biomasa de Eucalipto Globulus en España,” *Cepeda, F.(comp.), La corrupción Adm. en ...*, p. 174, 2012.
- [10] M. Balboa, “Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de Pinus pinaster Ait., Eucalyptus globulus Labill. Y Quercus robur L. En Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela,” p. 256, 2005.
- [11] J. Álvarez González, M. Balboa Murias, A. Merino, and R. Rodríguez-Soalleiro, “Estimación de la biomasa arbórea de ‘Eucalyptus globulus’ y ‘Pinus pinaster’ en Galicia,” vol. 1, pp. 21–30, 2012.
- [12] L. Chiliquinga and M. Jiménez, “Análisis energético del biocarbón de aplicación múltiple por combustión de biomasa leñosa. Tesis de Maestría. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE del Ecuador,” p. 192, 2015.
- [13] S. F. Iglesias, “Aplicación de Biochar a partir de biomasa residual de Eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano,” 2018.
- [14] S. Anchaluiza and E. Suárez R., “Efectos del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicas de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*; Myrtaceae) en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador,” *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 5, no. 2, 2013.
- [15] G. Balmelli and F. Resquin, “Evaluación productiva de orígenes de Eucalyptus globulus en zonas litoral y norte.,” *Ser. Técnica INIA*, vol. 149, pp. 1–19, 2005.
- [16] E. Ceccon and M. Martínez-Ramos, “Aspectos ambientales referentes al establecimiento de plantaciones de eucalipto de gran escala en áreas tropicales: Aplicación al caso de México,” *Interciencia*, vol. 24, no. 6, pp. 352–359, 1999.

- [17] J. Moreno, G. López, and R. Siche, “Modeling and optimization of extraction process of eucalyptus essential oil (*Eucalyptus globulus*),” *Sci. Agropecu.*, vol. 1, pp. 147–154, 2010.
- [18] FAO, *El eucalipto en la repoblación forestal*. 1981.
- [19] R. Dopazo Amoedo, D. Vega Nieva, L. Ortíz Torres, and E. Martínez Chamorro, “El aprovechamiento de biomasa residual y de cultivos energéticos: experiencias recientes y modelos de producción de biomasa forestal en montes gallegos,” *Montes y Soc. Quinto Congr. For. Español*, pp. 1–13, 2009.
- [20] R. Martínez, H. Azpiroz, J. Rodríguez, V. Cetina, and M. Gutiérrez, “Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*,” *Ra Ximhai*, vol. 2, no. 3, pp. 815–846, 2006.
- [21] E. Peña, M. Flórez, and G. Camargo, “EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN , DE LOS RESIDUOS MADERABLES , INDIVIDUALES vs MEZCLA EN UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO EN EL JARDÍN BOTÁNICO,” 2015.
- [22] A. ESPINA LIZANA, “Densidad básica de la madera de *Eucalyptus globulus* en dos sitios en Chile,” *Cybertesis.Uach.Cl*, 2006.
- [23] E. Forestal, “EUCALIPTO.pdf.” .
- [24] CEUPE, “¿Qué es la pirólisis?” [Online]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>. [Accessed: 08-Sep-2019].
- [25] M. Klug, “Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa,” vol. 26, pp. 1–4, 2012.
- [26] A. Gómez, W. Klose, and S. Rincón, *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*. 2008.
- [27] K. G. ROBERTS, B. A. GLOY, S. JOSEPH, N. R. SCOTT, and J. LEHMANN, “Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic and climate change potential,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 91, no. 5, p. 32, 2009.
- [28] J. G. Rosas Mayoral, “Producción de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirólisis en reactor a escala piloto y en reactor móvil energéticamente sostenible,” p. 231, 2015.
- [29] E. Cuesta Astorga, “Trabajo Fin de Grado PIRÓLISIS : OBTENCIÓN DE VINAGRE DE (Valorisation of sawdust through pyrolysis : obtaining wood vinegar . A review),” 2019.

- [30] G. A. Obando, “Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS),” p. 83, 2015.
- [31] Antonio Jesús, “Pirólisis - Ingeniería Química,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis>. [Accessed: 08-Sep-2019].
- [32] F. Paz Fong, “Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina,” 2008.
- [33] Majofesa, “Conoce la composición de la madera, un material extraordinario - Majofesa.” .
- [34] V. López Pérez and W. Ramírez Montesdeoca, “Diseño de un Horno para Tratamiento Térmico del Rodete de la Turbina Francis,” 2011.
- [35] A. D. Cárdenas, “Diseño y simulación de un horno rotatorio para materiales celulósicos,” 2014.
- [36] F. Céliz and I. Forneris, “Diseño de una planta de generación de carbón activado obtenido a partir de carozos de aceitunas mediante activación térmica,” 2018.
- [37] G. Bermeo Tene and B. Córdova Balcázar, “Diseño y construcción de un reactor de pirólisis de combustión lenta con una capacidad de 10kg a escala de laboratorio para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradable,” 2014.
- [38] R. I. Guillen, “Adaptación de horno metálico para fabricación de carbón vegetal aprovechando raleos en bosques energéticos,” pp. 1–68, 2011.
- [39] Y. A. Cengel and G. J. Afshun, *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Fundamentos y aplicaciones*, vol. 4 ed. 2011.
- [40] Y. Cengel and M. Boles, “TERMODINÁMICA DE CENGEL 8va EDICION,” vol. 8 edition, p. 1009, 2008.
- [41] L. O. Serrano, “Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas,” 2009.
- [42] FAO, *Métodos para fabricar carbón vegetal*, no. c. 1983.
- [43] TEKNYCAMPO, “Hornos para Elaboración de Carbón.” [Online]. Available: <https://www.teknycampo.com.ar/productos-de-teknycampo/hornos-para-elaboracion-de-carbon/>. [Accessed: 30-Jun-2020].
- [44] C. Roth, “Micro-gasificación,” vol. 1, 2011.
- [45] A. Fuentes Hernández and Á. Recio Recio, “PROPUESTA DE DISEÑO DE UN HORNO-REACTOR PARA REALIZAR LA PIRÓLISIS DE LA

- CÁSCARA DE ARROZ,” *Tecnol. Química*, vol. XXV, no. 2, pp. 87–98, 2005.
- [46] S. G. Laufgang, “Aceros inoxidables,” *Termo Soldex S.a, Trat. Term. Sold.*, p. 2, 2003.
- [47] A. Valverde G., B. Sarria López, and J. Monteagudo Yanes, “Evaluación De La Eficiencia Energética De Un Horno Que Utiliza Como Combustible Cascarilla De Arroz,” *Sci. Tech.*, vol. 5, no. 37, pp. 175–180, 2007.
- [48] “INAMHI - PRONÓSTICO.” [Online]. Available: <http://186.42.174.241/InamhiPronostico/>. [Accessed: 07-Nov-2019].
- [49] “El tiempo en Cayambe, Ecuador - Worldmeteo.” [Online]. Available: <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/ecuador/cayambe/tiempo-105508/>. [Accessed: 07-Nov-2019].
- [50] K. Figuero, “ANALISIS TERMICO DE HORNOS ARTESANALES PARA PANADERIAS,” p. 111, 1989.
- [51] P. Fernández Díez, “Transmisión de calor,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, p. 68.
- [52] S. Biset and M. E. Ferreyra, “Cálculo riguroso de eficiencia de hornos de proceso,” p. 19, 2013.
- [53] “SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve.” [Online]. Available: <https://solid-bi.es/solidworks/>. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [54] N. Sapag Chain, *Proyectos de inversión: formulación y evaluación.*, vol. Segunda. 2011.

ANEXOS

Anexo 1. Estructuras ocupacionales – Salarios mínimos, sectores y tarifas.

COMISIÓN SECTORIAL No. 8 “METALMECÁNICA”

RAMAS DE
ACTIVIDAD
ECONÓMICA:

1.- INDUSTRIAS BÁSICAS DEL HIERRO, ACERO Y METALES NO FERROSOS

2.- FABRICACIÓN DE MUEBLES Y ACCESORIOS METÁLICOS

3.- FABRICACIÓN DE OTROS PRODUCTOS METÁLICOS (ENVASES, RECIPIENTES, UTENSILLOS DE USO DOMÉSTICO, PRODUCTOS DE TORNILLERÍA, CLAVOS, TUERCAS ARTÍCULOS DE ALAMBRE), EXCEPTO MAQUINARIA Y EQUIPOS

4.- FABRICACIÓN DE PRODUCTOS METÁLICOS ESTRUCTURALES

CARGO / ACTIVIDAD	ESTRUCTURA OCUPACIONAL	COMENTARIOS / DETALLES DEL CARGO O ACTIVIDAD	CÓDIGO IESS	SALARIO MÍNIMO SECTORIAL 2019
JEFE DE PRIMER NIVEL DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	B1	INCLUYE: JEFE DE MANTENIMIENTO, JEFE DE DISTRIBUCIÓN Y LOGÍSTICA, JEFE DE CONTROL DE CALIDAD, JEFE DE RECURSOS HUMANOS, JEFE DE PRODUCCIÓN, JEFE DE BODEGA, JEFE DE PLANTA, JEFE DE PROYECTO, JEFE DE VENTAS, JEFE DE COMPRAS	081000000 0001	409,23
JEFE / COORDINADOR DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	B2	INCLUYE: JEFE DE SECCIÓN, JEFE DE INSTALACIÓN, JEFE DE TALLER, JEFE DE ENDEREZADOR, JEFE DE MAESTRANZA, JEFE DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS; JEFE DE MATRICEROS INCLUYE RODILLOS Y CAJAS DE LAMINACIÓN, JEFE DE TALLERES DE REPETIDORES, JEFE DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO	080428930 0002	409,11
ANALISTA / ESPECIALISTA / INSPECTOR / SUPERVISOR DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	B3	INCLUYE: SUPERVISOR DE PRODUCCIÓN, SUPERVISOR DE MANTENIMIENTO MECÁNICO, SUPERVISOR DE MANTENIMIENTO ELÉCTRICO, SUPERVISOR DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS, SUPERVISOR DE PATIOS Y MOVIMIENTO, SUPERVISOR DE ENDEREZADORA, SUPERVISOR DE BODEGA, SUPERVISOR DE ABASTECIMIENTO DE MATERIA PRIMA, INSPECTOR DE CONTROL DE CALIDAD, INSPECTOR DE PALANQUILLA, INSPECTOR MANTENIMIENTO ELÉCTRICO PREVENTIVO, INSPECTOR MANTENIMIENTO MECÁNICO PREVENTIVO	083000000 0003	408,95
TÉCNICOS DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	C1	INCLUYE: OPERADOR OXICORTE DIGITAL, OPERADOR BAROLADORA DIGITAL, ELECTROMECAÁNICO, ELECTRÓNICO, OPERADOR DE CORTE DE HILO, OPERADOR DE MÁQUINAS DE ELECTROROSIÓN, PREPARADOR DE COLORES, OPERADOR DE SECCIÓN, TORNERO, SOLDADOR ESPECIALIZADO, ELECTRICISTA ESPECIALIZADO, MECÁNICO ESPECIALIZADO, OPERADOR SENIOR	082000000 0006	408,84
OPERADOR GENERAL DE MAQUINARIA/EQUIPO DEL	C2	INCLUYE: OPERADOR JUNIOR, CERRAJERO	082000000 0005	408,56

SECTOR DE METALMECÁNICA				
ESMALTADOR Y ENLOZADOR DE UTENSILIOS DE USO DOMÉSTICO	C3		0804289900106	408,56
AUXILIAR / AYUDANTE DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	D2	INCLUYE: AYUDANTES EN GENERAL	0820000000009	406,04
AUXILIAR / AYUDANTE DEL SECTOR DE METALMECÁNICA SIN EXPERIENCIA	E2	INCLUYE: AYUDANTES SIN EXPERIENCIA PREVIA	0820000000010	403,49

RAMAS DE ACTIVIDAD ECONÓMICA:

6.- FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA

CARGO / ACTIVIDAD	ESTRUCTURA OCUPACIONAL	COMENTARIOS / DETALLES DEL CARGO O ACTIVIDAD	CÓDIGO IESS	SALARIO MÍNIMO O SECTORIAL 2019
JEFE DE PRIMER NIVEL DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	B1	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	0810000001001	409,23
JEFE/COORDINADOR DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	B2	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	0820000001002	409,11
ANALISTA / ESPECIALISTA / INSPECTOR / SUPERVISOR DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	B3	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	0830000001003	408,95
OPERADOR ESPECIALIZADO DE MAQUINARIA / EQUIPO DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	C1	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	0810000001004	408,84
OPERADOR GENERAL DE	C2	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	0820000001005	408,56

MAQUINARIA / EQUIPO DEL SECTOR DE METALMECÁNICA				
TÉCNICOS DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	C2	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	082000000 1006	408,56
AUXILIAR / AYUDANTE DEL SECTOR DE METALMECÁNICA	D2	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	082000000 1007	406,04
AUXILIAR / AYUDANTE DEL SECTOR DE METALMECÁNICA SIN EXPERIENCIA	E2	FABRICACIÓN DE CUCHILLERÍA, HERRAMIENTAS MANUALES Y ARTÍCULOS DE FERRETERÍA	082000000 1008	403,49

Fuente: Ministerio de trabajo

Anexo 2. Factores de conversión [39].

DIMENSIÓN	MÉTRICA	MÉTRICA/INGLESA
Aceleración	1 m/s ² = 100 cm/s ²	1 m/s ² = 3.2808 ft/s ² 1 ft/s ² = 0.3048* m/s ²
Área	1 m ² = 10 ⁴ cm ² = 10 ⁶ mm ² = 10 ⁻⁶ km ²	1 m ² = 1 550 in ² = 10.764 ft ² 1 ft ² = 144 in ² = 0.09290304* m ²
Densidad	1 g/cm ³ = 1 kg/L = 1 000 kg/m ³	1 g/cm ³ = 62.428 lbm/ft ³ = 0.036127 lbm/in ³ 1 lbm/in ³ = 1 728 lbm/ft ³ 1 kg/m ³ = 0.062428 lbm/ft ³
Energía, calor, trabajo, energía interna, entalpía	1 kJ = 1 000 J = 1 000 Nm = 1 kPa · m ³ 1 kJ/kg = 1 000 m ² /s ² 1 kWh = 3 600 kJ 1 cal [†] = 4.184 J 1 IT cal [†] = 4.1868 J 1 Cal [†] = 4.1868 kJ	1 kJ = 0.94782 Btu 1 Btu = 1.055056 kJ = 5.40395 psia · ft ³ = 778.169 lbf · ft 1 Btu/lbm = 25 037 ft ² /s ² = 2.326* kJ/kg 1 kJ/kg = 0.430 Btu/lbm 1 kWh = 3 412.14 Btu 1 therm = 10 ⁵ Btu = 1.055 × 10 ⁵ kJ (gas natural)
Fuerza	1 N = 1 kg · m/s ² = 10 ⁵ dina 1 kgf = 9.80665 N	1 N = 0.22481 lbf 1 lbf = 32.174 lbm · ft/s ² = 4.44822 N
Flujo de calor	1 W/cm ² = 10 ⁴ W/m ²	1 W/m ² = 0.3171 Btu/h · ft ²
Rapidez de generación de calor	1 W/cm ³ = 10 ⁶ W/m ³	1 W/m ³ = 0.09665 Btu/h · ft ³
Coefficiente de transferencia de calor	1 W/m ² · °C = 1 W/m ² · K	1 W/m ² · °C = 0.17612 Btu/h · ft ² · °F
Longitud	1 m = 100 cm = 1 000 mm 1 km = 1 000 m	1 m = 39.370 in = 3.2808 ft = 1.0926 yd 1 ft = 12 in = 0.3048* m 1 milla = 5 280 ft = 1.6093 km 1 in = 2.54* cm
Masa	1 kg = 1 000 g 1 tonelada métrica = 1 000 kg	1 kg = 2.2046226 lbm 1 lbm = 0.45359237* kg 1 onza = 28.3495 g 1 slug = 32.174 lbm = 14.5939 kg 1 tonelada corta = 2 000 lbm = 907.1847 kg
Potencia, rapidez de transferencia de calor	1 W = 1 J/s 1 kW = 1 000 W = 1.341 hp 1 hp [‡] = 745.7 W	1 kW = 3 412.14 Btu/h = 737.56 lbf · ft/s 1 hp = 550 lbf · ft/s = 0.7068 Btu/s = 42.41 Btu/min = 2 544.5 Btu/h = 0.74570 kW 1 hp de caldera = 33 475 Btu/h 1 Btu/h = 1.055056 kJ/h 1 tonelada de refrigeración = 200 Btu/min
Presión	1 Pa = 1 N/m ² 1 kPa = 10 ³ Pa = 10 ⁻³ MPa 1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bars = 760 mmHg a 0°C = 1.03323 kgf/cm ² 1 mmHg = 0.1333 kPa	1 Pa = 1.4504 × 10 ⁻⁴ psia = 0.020886 lbf/ft ² 1 psia = 144 lbf/ft ² = 6.894757 kPa 1 atm = 14.696 psia = 29.92 inHg a 30°F 1 inHg = 3.387 kPa
Calor específico	1 kJ/kg · °C = 1 kJ/kg · K = 1 J/g · °C	1 Btu/lbm · °F = 4.1868 kJ/kg · °C 1 Btu/lbmol · R = 4.1868 kJ/kmol · K 1 kJ/kg · °C = 0.23885 Btu/lbm · °F = 0.23885 Btu/lbm · R

* Factor de conversión exacto entre unidades métricas e Inglesas.

† Originalmente, la caloría se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua en 1°C, pero varía con la presión. La caloría de la tabla Internacional de vapor (IT) (preferida en general por los Ingenieros) es, por definición, exactamente 4.1868 J y corresponde al calor específico del agua a 15°C. La caloría termodinámica (generalmente preferida por los físicos) es, por definición, exactamente igual a 4.184 J y corresponde al calor específico del agua a la temperatura ambiente. La diferencia entre las dos es alrededor del 0.06%, lo cual es despreciable. La Caloría, con letra inicial mayúscula, que usan los especialistas en nutrición en realidad es una kilocaloría (1 000 calorías IT).

‡ Caballo de potencia mecánico. El caballo de potencia eléctrico se toma exactamente como 746 W.

Anexo 3. Masa molar, constante de gas y calores específicos de ciertas sustancias [39].

TABLA A-11

Masa molar, constante de gas y calores específicos de ciertas sustancias

Sustancia	Masa molar, M , lbm/lbmol	Constante de gas R^*		Calores específicos a 77°F		
		Btu/ lbm · R	psia · ft ³ / lbm · R	c_p , Btu/lbm · R	c_v , Btu/lbm · R	$k = c_p/c_v$
Aire	28.97	0.06855	0.3704	0.2400	0.1715	1.400
Amoniaco, NH ₃	17.03	0.1166	0.6301	0.4999	0.3834	1.304
Argón, Ar	39.95	0.04970	0.2686	0.1243	0.07457	1.667
Bromo, Br ₂	159.81	0.01242	0.06714	0.0538	0.04137	1.300
Isobutano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.03415	0.1846	0.3972	0.3631	1.094
<i>n</i> -Butano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.03415	0.1846	0.4046	0.3705	1.092
Carbono, bióxido de, CO ₂	44.01	0.04512	0.2438	0.2016	0.1564	1.288
Carbono, monóxido de, CO	28.01	0.07089	0.3831	0.2482	0.1772	1.400
Cloruro, Cl ₂	70.905	0.02802	0.1514	0.1142	0.08618	1.325
Clorodifluorometano (R-22), CHClF ₂	86.47	0.02297	0.1241	0.1552	0.1322	1.174
Etano, C ₂ H ₆	30.070	0.06604	0.3569	0.4166	0.3506	1.188
Etileno, C ₂ H ₄	28.054	0.07079	0.3826	0.3647	0.2940	1.241
Fluoruro, F ₂	38.00	0.05224	0.2823	0.1967	0.1445	1.362
Helio, He	4.003	0.4961	2.681	1.2403	0.7442	1.667
<i>n</i> -Heptano, C ₇ H ₁₆	100.20	0.01982	0.1071	0.3939	0.3740	1.053
<i>n</i> -Hexano, C ₆ H ₁₄	86.18	0.02304	0.1245	0.3951	0.3721	1.062
Hidrógeno, H ₂	2.016	0.9850	5.323	3.416	2.431	1.405
Kriptón, Kr	83.80	0.02370	0.1281	0.05923	0.03554	1.667
Metano, CH ₄	16.04	0.1238	0.6688	0.5317	0.4080	1.303
Neón, Ne	20.183	0.09838	0.5316	0.2460	0.1476	1.667
Nitrógeno, N ₂	28.01	0.07089	0.3831	0.2484	0.1774	1.400
Óxido nítrico, NO	30.006	0.06618	0.3577	0.2387	0.1725	1.384
Nitrógeno, bióxido de, NO ₂	46.006	0.04512	0.2438	0.1925	0.1474	1.306
Oxígeno, O ₂	32.00	0.06205	0.3353	0.2193	0.1572	1.395
<i>n</i> -Pentano, C ₅ H ₁₂	72.15	0.02752	0.1487	0.3974	0.3700	1.074
Propano, C ₃ H ₈	44.097	0.04502	0.2433	0.3986	0.3535	1.127
Propileno, C ₃ H ₆	42.08	0.04720	0.2550	0.3657	0.3184	1.148
Agua, H ₂ O	18.015	0.1102	0.5957	0.4455	0.3351	1.329
Sulfuro dióxido de, SO ₂	64.06	0.03100	0.1675	0.1488	0.1178	1.263
Tetraclorometano, CCl ₄	153.82	0.01291	0.06976	0.1293	0.1164	1.111
Tetrafluoroetano (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.01946	0.1052	0.1991	0.1796	1.108
Trifluoroetano (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.02363	0.1277	0.2219	0.1983	1.119
Xenón, Xe	131.30	0.01512	0.08173	0.03781	0.02269	1.667

*La constante de gas se calculó de $R = R_u/M$, donde $R_u = 1.9859$ Btu/lbmol · R = 10.732 psia · ft³/lbmol · R es la constante de gas universal y M es la masa molar.

Fuente: Valores de calores específicos se obtuvieron principalmente de rutinas de propiedad preparadas por The National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.

Anexo 4. Propiedades del aire a la presión de 1 atm [39].

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-B.

Anexo 5. Propiedades de gas ideal aire [40]

TABLA A-17

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Anexo 6. Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes [40]

TABLA A-3

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes

a) Líquidos

Sustancia	Datos de ebullición a 1 atm		Datos de congelación		Propiedades de líquidos		
	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión h_{if} , kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , kJ/kg · K
Aceite comestible (ligero)					25	910	1.80
Agua	100	2257	0.0	333.7	0	1000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22
Alcohol etílico	78.6	855	-156	108	20	789	2.84
Amoniaco	-33.3	1357	-77.7	322.4	-33.3	682	4.43
					-20	665	4.52
					0	639	4.60
					25	602	4.80
Argón	-185.9	161.6	-189.3	28	-185.6	1394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
n-Butano	-0.5	385.2	-138.5	80.3	-0.5	601	2.31
Dióxido de carbono	-78.4*	230.5 (a 0°C)	-56.6	—	0	298	0.59
Etanol	78.2	838.3	-114.2	109	25	783	2.46
Etilén glicol	198.1	800.1	-10.8	181.1	20	1109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1261	2.32
Helio	-268.9	22.8	—	—	-268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	-252.8	445.7	-259.2	59.5	-252.8	70.7	10.0
Isobutano	-11.7	367.1	-160	105.7	-11.7	593.8	2.28
Mercurio	356.7	294.7	-38.9	11.4	25	13,560	0.139
Metano	-161.5	510.4	-182.2	58.4	-161.5	423	3.49
					-100	301	5.79
Metanol	64.5	1100	-97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	-195.8	198.6	-210	25.3	-195.8	809	2.06
					-160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	-57.5	180.7	20	703	2.10
Oxígeno	-183	212.7	-218.8	13.7	-183	1141	1.71
Petróleo	—	230-384	—	—	20	640	2.0
Propano	-42.1	427.8	-187.7	80.0	-42.1	581	2.25
					0	529	2.53
					50	449	3.13
Queroseno	204-293	251	-24.9	—	20	820	2.00
Refrigerante 134a	-26.1	217.0	-96.6	—	-50	1443	1.23
Salmuera (20% de cloruro de sodio a base másica)	103.9	—	-17.4	—	20	1150	3.11
					-26.1	1374	1.27
					0	1295	1.34
					25	1207	1.43

* Temperatura de sublimación. (A presiones por debajo de la presión de punto triple de 518 kPa, el dióxido de carbono existe como un sólido o un gas. También, la temperatura de punto de congelamiento del dióxido de carbono es la temperatura de punto triple de -56.5°C.)

Anexo 7. Propiedades térmicas de algunos aceros y aleaciones especiales.

Tabla IV.19.- Propiedades térmicas de algunos aceros y aleaciones especiales

	Temper. fusión °C	Densidad ρ gr/cm ³	Calor específico c_p		Conductiv. térmica k_s		Emisividad ϵ	
			°C	Kcal/kg°C	°C	Kcal/hm°C	°C	%
Acero Cr (15%), Ni (10%)		7,7	20	0,11	0	14	20	0,58
					400	16	500	0,65
					800	19		
Acero Cr (18%), Ni (8%)		7,7	20	0,11	800	19	20	0,31
							500	0,37
Acero Mn (13%), Ni (20%)		7,7	20	0,11	0	12	500	0,93 oxid.
					300	15		
					500	16		
Acero Mn (13%)			20	0,12	0	11		
					400	16,9		
					800	18,2		
Acero (0,2%C a 0,6%C)	1127	7,86	20	0,1	20	54	20	3 (pulido)
	a		1000	0,15	500	32	1000	22 (pulido)
	1400				1000	23	500	92 (oxidado)
Acero 1% C	1430	7,8	20	0,11	0	38	200	10 (pulido)
					400	30,9		80 (oxidado)
					800	25		
Acero 1,5%C		7,7	20	0,11	0	31	25	80 (Oxidado)
					400	28	200	79 (Oxidado)
					800	25	600	79 (Oxidado)
Acero al Cr (11%)		7,84	50 a 100	0,118	0	41		
					400	33		
					800	22		
Acero al Cr (10%)		7,74	50 a 100	0,113	0	32		
					400	26		
					800	25		
Acero al Cr (20%)		7,6	20	0,11	0	19	20	10 (pulido)
					400	19	800	38 (pulido)
					800	22		
Acero al wolframio W (2%)		7,96	20	0,106	0	54		
					600	39		
Hierro forjado		7,84	20	0,11	20	51	20	3 (pulido)
					500	37	1000	22 (pulido)
					1000	30	600	98 (oxidado)
Fundición 4% C	1147	7,9	20	0,1	100	45	200	0,2 (pulido)
					500	37	200	64 (oxidado)
Ni (80%) Cr (14%)	1425	8,51	20	0,11	0	12	300	20 (oxi. pul)
					400	15	800	22 (oxi. pul)
					800	16	300	70 (oxidado)
							800	87 (oxidado)
Ni (57%), Mo (20%), Fe (20%)	1330	8,51	20	0,094	20	9	200	26
					400	15	200	55 (oxidado)
					800	20	500	23 (pulido)
Ni (62%), Mo (30%), Fe (5%)	1350	9,24	20	0,091	20	9,7	20	15
							800	23
							900	68 (oxidado)
Ni (58%), Mo (17%), Fe (5%), Cr (15%), W (5%)	1305	8,94	20	0,092	25	10,9	20	9 (pulido)
							800	23 (pulido)

Anexo 8. Biomasa de eucalipto (Fuste).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 9. Biomasa de eucalipto (Ramas y hojarasca).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 10. Biomasa de eucalipto (Ramas y hojarasca).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 11. Masa cilindro interior de prototipo de horno pirolítico de 50 Litros (Vacío).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 12. Masa cilindro interior de prototipo de horno pirolítico de 50 Litros (Lleno).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 13. Preparación del prototipo de horno pirolítico de 50 Litros (Llenado con fuste de eucalipto).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 14. Preparación del prototipo de horno pirolítico de 50 Litros (Llenado con ramas y hojarasca de eucalipto).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 15. Encendido del prototipo de horno pirolítico de 50 Litros, (09:00h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 16. Encendido del prototipo de horno pirolítico de 50 Litros, (09:40h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 17. Temperatura en etapa de calentamiento, (10:10h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 18. Temperatura etapa de carbonización, (10:40h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 19. Temperatura etapa de carbonización, (11:05h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 20. Temperatura alcanzada en el horno pirolítico, (12:10h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 21. Temperatura etapa de enfriamiento, (12:40h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 22. Temperatura etapa de enfriamiento, (13:05h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 23. Temperatura etapa de enfriamiento, (13:40h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 24. Temperatura etapa de enfriamiento, (14:50)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 25. Temperatura etapa de enfriamiento, (15:15h)



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 26. Extracción del biochar producido.



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 27. Masa del biochar producido.



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 28. Biochar producido.



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 29. Cenizas y residuos (Producto de la combustión de la biomasa de eucalipto).



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 30. Masa de recipiente de cristal vacío



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 31. Masa de cenizas.



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa

Anexo 32. Masa de residuos.



Elaborado por: Daniel Sinchire & Danny Topa