



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR
ELÉCTRICO DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A
BIOCHAR ALIMENTADO A TRAVÉS DE ENERGÍAS
RENOVABLES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: CARLOS ANDRÉS SIGUENCIA ORTÍZ

DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS COBOS TORRES, PhD.

CUENCA – ECUADOR

2021

*No me gradué en los
50 años de La Cato!*



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR ELÉCTRICO DE
CONVERSIÓN DE BIOMASA A BIOCHAR ALIMENTADO A
TRAVÉS DE ENERGÍAS RENOVABLES

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: CARLOS ANDRÉS SIGUENCIA ORTÍZ

DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS COBOS TORRES, PhD.

CUENCA - ECUADOR

2021

*Yo me gradué en los
50 años de La Cato!*

Declaratoria de Autor

Yo Carlos Andrés Siguencia Ortiz portador de la cédula de ciudadanía N° 0302381843. Declaro ser el autor de la obra: titulada “Diseño y construcción de un reactor eléctrico de conversión de biomasa a biochar alimentado a través de energías renovables”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 15 de Junio de 2021



F:

Carlos Andrés Siguencia Ortiz

C.I. 0302381843

Certificación

Se certifica que:

El informe de investigación titulado “Diseño y construcción de un reactor eléctrico de conversión de biomasa a biochar alimentado a través de energías renovables”, de autoría del estudiante Carlos Andrés Sigüencia Ortiz, con CC 0302381843 ecuatoriano, previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, cumple con la caracterización y estructura (parte protocolaria y parte expositiva) y se sujeta a la normativa pertinente exigida por el Consejo de Educación Superior, CES y la Universidad Católica de Cuenca, en consecuencia se autoriza su presentación para los trámites pertinentes.

Cuenca 15 de Junio de 2021



Asesor Científico

Dedicatoria

A mis padres, que con su valentía han forjado mi camino y me ha enseñado a ser quien soy; a mis abuelos Julio y Gilberto (†), quienes me inculcaron sus valores y sabiduría hasta el final de sus días; a mis hermanas Carla y Nayelli, que me apoyaron de diversas maneras y me impulsaron a llegar a mi meta.

Agradecimiento

Agradezco en primera instancia a Dios por su bendición y guía en el proceso para culminar mi trabajo de titulación; a mis padres por su apoyo incondicional, de manera especial a mi padre, por creer y confiar siempre en mí, por su dedicación y por ser el principal promotor de mis sueños; a mis hermanas por acompañarme en cada paso y alentarme en todo momento. Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Ing. Juan Carlos Cobos Torres, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y compartir conmigo sus conocimientos, por su paciencia, guía y apoyo durante todo este proceso. La culminación de este trabajo de titulación no habría sido posible sin todos ustedes.

Resumen

En el presente proyecto de investigación, se diseñó y construyó un reactor de pirolisis para la obtención de biochar. También, se realizó un estudio y simulación para la posible energización del sistema mediante energía solar fotovoltaica. El proceso de producción está enfocado en la pirolisis de biomasa, donde la materia prima es expuesta a un calentamiento gradual durante un período de tiempo, permitiendo así obtener un producto con alto contenido de carbono.

Para la validación del equipo se realizaron 6 pruebas, en las que se programó la variación de las condiciones de temperatura de trabajo y tiempo de pirolisis. Además, se verificó la influencia de dichos parámetros, en las características finales del carbón activado. Mediante el análisis de las pruebas, se determinaron las condiciones eficientes de funcionamiento, con las cuales se optimiza el tiempo, alcanzando el adecuado rendimiento del reactor.

Para el diseño y dimensionamiento de energización del sistema mediante paneles solares, se utilizó el programa PVsyst 7.2. El programa permitió dimensionar y simular 25 paneles solares conectados de la siguiente manera: 5 conjuntos de 5 paneles en serie. Así, se logra generar la potencia adecuada, la misma que será transformada mediante un inversor trifásico, a partir del cual se energiza el reactor eléctrico. Se optó por esta alternativa, ya que la universidad puede inyectar a la red de distribución energía cuando el reactor no sea utilizado. Siendo esta, una solución viable para el uso de energía renovable en el proyecto.

Palabras clave: Reactor, biochar, pirolisis, niquelinas, pirómetro, termocupla, lignina, biomasa, biodigestores, hemicelulosa, celulosa, inversor.

Abstract

In this research project, a pyrolysis reactor was designed and built to obtain biochar. Similarly, both a study and simulation were conducted for the possible energization of the system by photovoltaic solar energy. The production process is focused on the pyrolysis of biomass, where the raw material is exposed to gradual heating over some time, thus obtaining a product with high carbon content. For the validation of the equipment, 6 tests were performed, in which the variation of the working temperature and pyrolysis time conditions were programmed. Through the analysis of the tests, the efficient operating conditions were determined, with which the time is optimized, reaching the adequate performance of the reactor. The PVsyst 7.2 program was utilized for the design and sizing of the system energization through solar panels. The program allowed sizing and simulating 30 solar panels connected as follows: 5 sets of 6 panels in series. Thus, it is possible to generate adequate power, which will be transformed employing a three-phase inverter, from which the electrical reactor is energized. This alternative was chosen because the university can inject energy into the distribution network when the reactor is not being used. This is a viable solution for the use of renewable energy in the project.

Keywords: Biochar, Pyrolysis, Nickelines, Biomass, Biodigesters.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento	3
Dedicatoria.....	5
Resumen	7
Abstract.....	8
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Formulación del problema	2
1.2.1 Delimitación del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II.....	7
2. Fundamentación Teórica.....	7
2.1 Pirolisis	7
2.1.1 Pirolisis Lenta	8
2.1.2 Pirolisis Rápida.....	8
2.1.3 Pirolisis ultra rápida.....	8
2.2 Gasificación	8
2.3 Carbonización Hidrotérmica.....	9

2.4	Secuestro de carbono	9
2.5	Biochar.....	9
2.5.1	Producción de Biochar.....	10
2.5.2	Aplicaciones del biochar	11
2.6	Energías Renovables.....	11
2.7	Diseño de Reactores.....	12
2.8	Fuentes de Energía para el proceso de Pirolisis.....	13
2.9	Interruptor eléctrico	14
2.10	Contactador eléctrico.....	14
2.11	Sensor de Temperatura	14
2.12	Termocupla	14
2.13	Análisis Termo gravimétrico de la Madera	15
2.14	Descomposición térmica de la madera	15
CAPÍTULO III		17
3.	Desarrollo Metodológico.....	17
3.1	Tipo de Estudio	17
3.2	Condiciones del diseño del reactor en base en modelos planteados en investigaciones previas	17
3.3	Determinación de Variables del proceso	18
3.3.1	Temperatura.....	18
3.3.2	Presión	18
3.3.3	Tiempo de Residencia	19

3.3.4	Tipo de Madera.....	19
3.3.5	Humedad.....	19
3.4	Diseño del reactor de pirolisis para la obtención de biochar mediante niquelinas eléctricas	19
3.4.1	Diseño y dimensionamiento del recipiente para el reactor eléctrico	20
3.4.2	Sistema de calentamiento del reactor eléctrico.....	21
3.5	Sistema de control eléctrico	22
3.5.1	Interruptor eléctrico	22
3.5.2	Pirómetro	22
3.5.3	Contactador Eléctrico	23
3.5.4	Indicadores eléctricos para tablero de control	24
3.6	Construcción del reactor eléctrico.	25
3.6.1	Construcción del recipiente	25
3.7	Construcción del sistema eléctrico.....	25
3.7.1	Sistema de control para el reactor eléctrico.....	25
3.7.2	Sistema de fuerza (calentamiento).....	26
3.8	Diseño y dimensionamiento de alimentación del sistema mediante energía solar fotovoltaica.....	28
3.8.1	Evaluación de recursos energéticos en la ciudad de Cuenca.....	28
3.8.2	Determinación de radiación solar	28
3.8.3	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	33
3.8.4	Elementos principales utilizados para el diseño del sistema fotovoltaico	34

3.8.5 Inversor Eléctrico	35
CAPÍTULO IV	36
4. Análisis y Comparación de Resultados	36
4.1 Pruebas en el proceso de Pirolisis y obtención de Carbón activado	36
4.2 Comportamiento del sistema en funcionamiento.....	47
4.3 Ventajas y Desventajas del sistema	49
CAPÍTULO V.....	50
5. Conclusiones y Recomendaciones	50
5.1 Conclusiones	50
5.2 Recomendaciones	51
6. Referencias.....	a
7. Anexos.....	a
ANEXO A	a
ANEXO B.....	a
ANEXO C.....	a
ANEXO D	a
ANEXO E.....	a
ANEXO F.....	a
ANEXO G	a
ANEXO H	a
ANEXO I.....	a
ANEXO J.....	a

ANEXO K	a
ANEXO L.....	a
ANEXO M.....	a
ANEXO N	a
ANEXO O	a

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. <i>Radiación solar superficie horizontal. Cuenca – Ecuador, diferentes bases de datos.....</i>	29
Tabla 2. <i>Radiación solar efectiva sobre una superficie inclinada. Cuenca – Ecuador, diferentes bases de datos.</i>	32
Tabla 3. <i>Características técnicas de paneles solares YLD-36b</i>	34
Tabla 4. <i>Características técnicas del inversor Growatt 15000~22000TL3-SL.....</i>	35
Tabla 5. Datos de prueba 1	37
Tabla 6. Datos de prueba 2.	38
Tabla 7. Datos de prueba 3.	40
Tabla 8. Datos de prueba 4.	41
Tabla 9. Datos de prueba 5.	43
Tabla 10. Datos de prueba 6.	45
Tabla 11. Datos obtenidos durante la medición.....	47
Tabla 12. <i>Variación de potencia con respecto a la temperatura</i>	49

FIGURAS

Figura 1. Dimensiones del recipiente del reactor.	21
Figura 2. Niquelina eléctrica con base tipo rosca.	21
Figura 3. Diagrama de conexión eléctrica de las niquelinas.	22
Figura 4. Pantalla del pirómetro.	24
Figura 5. Pines de conexión del pirómetro PID REX-C100.	24
Figura 6. Reactor eléctrico.	26
Figura 7. Esquema de conexión monofásica del sistema de control.	27
Figura 8. Esquema de conexión general del sistema de control y fuerza.	27
Figura 9. <i>Radiación solar global Cuenca, Ecuador – Diferentes bases de datos.</i>	30
Figura 10. <i>Panel solar monocristalino.</i>	34
Figura 11. <i>Inversor eléctrico Growatt15000~22000TL3-SL.</i>	35
Figura 12. Biomasa.....	36
Figura 13. Representación gráfica de la prueba 1.	37
Figura 14. Resultado de la prueba 1.	38
Figura 15. Representación gráfica de la prueba 2.	39
Figura 16. Resultado de la prueba 2.	39
Figura 17. Representación gráfica de la prueba 3.	40
Figura 18. Resultado de la prueba 3.	41
Figura 19. <i>Representación gráfica de la prueba 4</i>	42
Figura 20. <i>Resultado de la prueba 4.</i>	42
Figura 21. <i>Representación gráfica de la prueba 5</i>	43
Figura 22. <i>Resultado de la prueba 5.</i>	44
Figura 23. <i>Comparación de la madera antes y después de la prueba 5.</i>	44
Figura 24. <i>Representación gráfica de la prueba 6</i>	45

Figura 25. <i>Resultado de la prueba 6</i>	46
Figura 26. <i>Analizador de redes eléctricas: a) pinzas amperimétricas, b) digitalizador.</i>	48
Figura 27. <i>Conexión del analizador de redes eléctricas</i>	48
Figura 28. <i>Diseño del reactor eléctrico y diseño de las niquelinas</i>	a
Figura 29. <i>Diseño de las partes del reactor Eléctrico</i>	a
Figura 30. <i>Diseño del reactor ensamblado</i>	a
Figura 31. <i>Diseño de la base que eleva al reactor</i>	a
Figura 32. <i>Diseño y dimensionamiento de las Niquelinas</i>	a
Figura 33. <i>Diseño de la ubicación y sujeción de las niquelinas dentro del reactor</i>	a
Figura 34. <i>Diseño y ubicación de la tapa del Reactor</i>	a
Figura 35. <i>Construcción de las niquelinas</i>	a
Figura 36. <i>Sujeción de las niquelinas en el recipiente</i>	a
Figura 37. <i>Ubicación de la biomasa en el interior del reactor</i>	a
Figura 38. <i>Medición de Voltajes y Corrientes de la fase A del sistema</i>	a
Figura 39. <i>Medición de Voltajes y Corrientes de la fase B del sistema</i>	b
Figura 40. <i>Medición de Voltajes y Corrientes de la fase C del sistema</i>	c
Figura 41. <i>Representación gráfica de las curvas de voltaje del sistema funcionando</i>	d
Figura 42. <i>Datos obtenidos de las fases del sistema</i>	e
Figura 43. <i>Potencia del sistema representada en kW al funcionar a 200 grados</i>	f
Figura 44. <i>Potencia Trifásica del sistema representada en kW al funcionar a 350 grados.</i>	g
Figura 45. <i>Representación gráfica de las curvas de corriente de cada fase</i>	h
Figura 46. <i>Peso de la materia prima antes del proceso de pirolisis</i>	a
Figura 47. <i>Peso de la materia prima despues del proceso de pirolisis.</i>	b

Figura 48. <i>Triangulo de potencias</i>	a
Figura 49. <i>Selección del tipo de Proyecto</i>	a
Figura 50. <i>Ubicación geográfica del País, región, ciudad del Proyecto</i>	b
Figura 51. <i>Parámetros de ubicación de los paneles solares</i>	c
Figura 52. <i>Selección de tipo de panel y tipo de inversor</i>	d
Figura 53. <i>Resultados de la simulación</i>	d
Figura 54. <i>PVsyst configuración y ubicación de los conjuntos de paneles solares</i>	e
Figura 55. <i>Rendimiento del sistema por mes</i>	f
Figura 56. <i>Energía diaria de salida del sistema simulado</i>	f
Figura 57. <i>Energía diaria de salida del inversor</i>	a
Figura 58. <i>Diseño de la ubicación de los paneles solares en la facultad de Postgrados</i> . b	
Figura 59. <i>Angulo de inclinación de paneles solares</i>	b
Figura 60. <i>Diseño de la ubicación de los paneles solares en la facultad de Postgrados</i> ..c	

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

En los últimos años se han generado mecanismos eficientes para la transformación de la basura en productos útiles, como puede ser el biochar que es un recurso renovable obtenido mediante pirolisis, su principal objetivo es evitar varios problemas ambientales, incluyendo la reparación productiva del suelo, el agua y los medios gaseosos.

Las técnicas de producción de biochar no avanzaron significativamente durante siglos. Los hornos para producir carbón están hechos de tierra, ladrillos e incluso acero. Pero estos hornos aún emiten muchas partículas y humo, incluidos los gases de efecto invernadero responsables de la alteración del clima

A nivel mundial se diseñan biodigestores con capacidades volumétricas diferentes, pero el horno tradicional puede producir un biochar de biosólidos de baja calidad (Gonzaga, 2017) por lo que es importante diseñar biodigestores que permitan obtener un biocarbón de alta calidad y con mínimos impactos ambientales.

En la presente investigación se diseñará un prototipo de un horno para elaboración de biochar, constará de una cámara interna y una externa con una puerta para ingresar la biomasa. Posteriormente utilizando latón se construirá el horno para pirolisis rápida; para calentar la cámara interna se utilizará paneles solares que permite aprovechar la radiación emitida por el sol y evita el uso de biomasa y combustibles fósiles como fuente de energía. La parte central del reactor estar atravesado por 4 niquelinas que nos permitirá obtener temperaturas que oscilen entre los 300 ° C y 700 ° C suficiente para carbonizar biomasa residual altamente lignificada. Se espera que la emisión de gases de efecto invernadero sean prácticamente nulas, Con este prototipo se

capturará carbón para múltiples aplicaciones ambientales, evitando su emisión a la atmósfera, de esta forma se contribuye a mitigar el cambio climático y se presenta una alternativa amigable con el ambiente para aprovechar la biomasa, secuestrar carbón y producir biochar.

1.2 Formulación del problema

Uno de los grandes problemas que se manifiestan en la sociedad actual, es el manejo inadecuado de los residuos sólidos. Los mismos, que representa una amenaza creciente en la salud de las personas, la contaminación del ambiente tanto en el aire, el agua, el suelo, evidencian como una de sus principales consecuencias el cambio climático.

Existe el interés permanente de organizaciones e investigadores para desarrollar e implementar técnicas amigables con el ambiente, para así recuperar la capacidad productiva de los suelos, por lo cual el biochar es una de las mejores posibilidades.

Se han generado mecanismos eficientes para la transformación de la basura en productos útiles, como puede ser el biochar que es un recurso renovable obtenido mediante pirolisis, su principal objetivo es evitar varios problemas ambientales, incluyendo la reparación productiva del suelo, el agua y los medios gaseosos y el secuestro de carbono, no obstante, en el proceso de obtención de biochar se presenta emisión de gases volátiles contaminantes (metano, monóxido de carbono y otros gases combustibles), el gas de pirolisis es principalmente una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) en una gama de compuestos volátiles.

En la producción convencional de biochar se quema diferentes tipos de combustibles fósiles que permiten alcanzar la temperatura necesaria para que se dé el proceso de pirolisis dentro del reactor. La manera más tradicional es quemar madera

para conseguir que el reactor se caliente, lo cual genera emisión de gases de efecto invernadero, humo y otros tipos de contaminación. Lo cual, representa una fuente importante de contaminación ambiental que contribuye al cambio climático.

1.2.1 Delimitación del problema

La producción de biochar en la actualidad requiere un gasto excesivo de energía, la cual se obtiene mediante la combustión de leña o combustibles fósiles, lo que genera grandes problemas ambientales que no son coherentes con la producción de biochar como solución ecológica.

El presente trabajo de titulación, se orienta en la construcción de un reactor eficiente energéticamente. El cual, va a calentarse mediante niquelinas eléctricas evitando así el uso de combustibles fósiles para generar el biochar, como también evitar producir gases de efecto invernadero que son los que causan daño al medio ambiente y así tener una gran ventaja en comparación con métodos convencionales. Por el costo de los paneles solares, no se va a poder energizar el reactor, pero se realizará el dimensionamiento y simulación necesarios. La aplicación de la correcta metodología del uso de la energía fotovoltaica permitirá hacer un análisis y dimensionamiento específico para la energización del reactor, pues uno de los objetivos busca el aprovechamiento de energía solar.

Existen pocas soluciones para mitigar el grave efecto de los cambios climáticos. Por lo que, resulta de gran importancia diseñar y construir un prototipo de reactor eléctrico capaz de producir biochar y su principal objetivo es reducir significativamente la emisión y generación de gases de efecto invernadero, de esta manera ayudamos a evitar la contaminación del ambiente.

1.3 Justificación

Los métodos convencionales de la producción de biochar emiten gases volátiles contaminantes como metano, monóxido de carbono y otros gases combustibles, y compuestos volátiles todos estos contaminantes de la atmosfera

En la producción de biochar los gases de efecto invernadero son una fuente importante de contaminación ambiental que contribuyen al cambio climático por lo que, la presente investigación, aportaría de manera significativa al medio ambiente mediante el diseño y construcción de un prototipo de horno (reactor) eléctrico capaz de producir la pirolisis de residuos orgánicos, La principal función es dimensionar la alimentación del reactor con energía solar fotovoltaica para que, en un futuro se pueda construir este sistema aprovechando la radiación solar

El reactor al realizar la pirolisis por calentamiento eléctrico sustituye el uso de combustibles fósiles, los cuales generan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, de esta manera secuestramos carbono y reducimos en gran porcentaje la contaminación del ambiente. La energía solar fotovoltaica es capaz de producir energía eléctrica y partir de ella con el uso de niquelinas se genera calor a temperatura adecuada para la obtención del biochar.

Con este procedimiento de obtención de material orgánico o biochar, se pretende la reconstrucción del suelo evitando contaminantes para el ambiente.

El análisis eléctrico tendrá diferentes puntos críticos a lo largo de la investigación y planificación con respecto al dimensionamiento de la cantidad de paneles solares capaces de generar la potencia adecuada para la carga consumida por el reactor. Finalmente, mediante este estudio se contribuirá a un diseño confiable para proyectos futuros.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Construir un sistema de conversión de biomasa a biochar alimentado por energías renovables mediante el diseño de un reactor eléctrico que sea eficiente energéticamente para reducir la emisión de gases de efecto invernadero evitando la utilización de combustibles fósiles.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisar la literatura científica mediante bases de datos científicas de calidad para contar con información actualizada sobre reactores y la generación de biochar.
- Diseñar un reactor eficiente energéticamente mediante software de simulación y cálculo de termodinámica para contar con un prototipo de reactor óptimo.
- Diseñar el sistema de calentamiento con niquelinas mediante el cálculo de intercambio de energía para contar con el sistema de calentamiento del reactor.
- Construir el reactor eléctrico mediante los diseños obtenidos para poder evaluar su funcionamiento.
- Calcular y simular el uso de paneles fotovoltaicos para alimentar el reactor mediante el uso de software adecuado para sistemas fotovoltaicos, con lo cual se podrá demostrar la factibilidad del uso de energías renovables.

- Evaluar el comportamiento del sistema propuesto de generación de biochar energizando con la red eléctrica y mediante un analizador de redes determinar la energía consumida, transformada y emitida durante el proceso.

CAPÍTULO II

2. Fundamentación Teórica

2.1 Pirolisis

Existen algunos procesos para obtener biochar. Entre los dos principales se encuentra la despolimerización termo catalítica y el proceso de pirolisis. La pirolisis es una tecnología termoquímica que permite transformar la biomasa en fuentes de energía renovable. Éstas pueden ser clasificadas en cuatro categorías generales: pirolisis lenta, pirolisis rápida, pirolisis ultrarrápida, gasificación y carbonización hidrotérmica. Hay que considerar que el proceso de la pirolisis debe ocurrir en ausencia completa de oxígeno, a diferencia de la gasificación que ocurre con una reducida cantidad de oxígeno (Brick et al., 2010).

La pirolisis es el proceso termoquímico usado para transformar biomasa y otros materiales orgánicos de baja densidad energética en líquidos de alta densidad energética (bioaceites), en sólidos de alta densidad energética (biochar o biocarbón) y en gas de baja densidad energética (Axelsson et al., 2012).

Las transformaciones que se producen durante el proceso de la pirolisis son complejas tanto a nivel físico y químico de la materia. Dependen tanto del proceso llevado a cabo (condiciones del reactor, tiempo, temperatura), así como naturaleza de la biomasa (humedad, porosidad, composición, entre otros). Como afirma (M., 2009), según el tipo de tecnología usada y de las propiedades de la materia prima utilizada se puede lograr un rendimiento de masa alrededor del 30-40% (base húmeda), con producciones de energía de cerca del 30% (contenida en el carbón) y contenidos de carbono fijado arriba del 90% de la biomasa original. A continuación, se detalla de manera resumida las categorías de pirolisis (M., 2009).

2.1.1 Pirolisis Lenta

Conocida como pirolisis convencional. Esta categoría se define por tiempos pausados de calentamiento de la biomasa, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los sólidos y el gas. El tiempo de residencia del gas puede ser mayor de 5 s, mientras que para la biomasa puede ser de minutos a días (Chan et al., 2019).

2.1.2 Pirolisis Rápida

El calentamiento es mayor a 200 °C por segundo y las temperaturas que prevalecen son usualmente mayores a los 550 °C. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos, como los bioaceites y gases. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso (Chan et al., 2019).

2.1.3 Pirolisis ultra rápida

Se caracteriza porque las temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso son moderadas (400-600 °C) y las tasas de calentamiento son menores a 2 °C por segundo. Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. En este sistema se produce considerablemente menos alquitrán y gas (Chan et al., 2019).

2.2 Gasificación

En este proceso la biomasa, especialmente madera, se procesa en dos pasos. La primera es la conversión de madera a carbón. Esencialmente, es la conversión que ocurre en la pirolisis lenta. Con el biochar obtenido, se realiza una nueva pirolisis a mayor temperatura que convierte el carbón a ceniza y es llamada gasificación de carbón. Si hay demasiado oxígeno entonces todo el carbón es consumido y sólo quedan cenizas. Si la cantidad de oxígeno es limitada, entonces sólo una parte del carbón es consumido y algunos remanentes salen por el fondo del gasificado (Capital, n.d.).

2.3 Carbonización Hidrotérmica

Consiste en aplicar calentamiento a materiales con gran contenido de agua, pulpa de café, estiércoles, algas, entre otros, que son sumergidos en agua, y aunque la temperatura es alta, no se llega a la ebullición (Brick et al., 2010).

2.4 Secuestro de carbono

Secuestro de carbono. En los últimos años, la captura y utilización de carbono (UCC) se ha propuesto como una posible solución tecnológica a los problemas de las emisiones de gases de efecto invernadero y la creciente demanda de energía (Al-Mamoori et al., 2017). A medida que el cambio climático global trasciende “las fronteras nacionales”, es imperativo hacer tratados efectivos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (por ejemplo, CO₂ en particular) al tiempo que mejora la eficiencia del uso de la energía (Szulejko et al., 2017).

2.5 Biochar

El biochar es un recurso renovable único obtenido mediante pirolisis, que tiene un potencial significativo para abordar varios problemas ambientales con los que nos hemos encontrado en los últimos años, incluida la reparación de contaminantes en el suelo, el agua y los medios gaseosos (Oliveira et al., 2017). El biochar es un producto de biomasa prometedor para la enmienda del suelo, la remediación y el secuestro de carbono (S. Li & Chen, 2018), se produce a partir de una variedad de materias primas de biomasa, como residuos agrícolas, astillas de madera, estiércol y desechos sólidos municipales, a través de una variedad de tratamientos térmicos, entre los cuales la pirolisis lenta es la más utilizada (Xie et al., 2015), es ampliamente considerado como una forma efectiva de secuestrar dióxido de carbono (Souradeep, 2018).

La temperatura de producción influye en las características del biochar (Narzari et al., 2017). La eficiencia de la producción de biochar a partir de biomasa depende en gran medida de la temperatura de pirolisis, la velocidad de calentamiento, el tipo y la composición de la materia prima, el tamaño de las partículas y las condiciones del reactor (Jakub, n.d.).

En el proceso de obtención de biochar se presenta emisión de gases volátiles contaminantes (metano, monóxido de carbono y otros gases combustibles), el gas de pirolisis es principalmente una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) con cantidades más bajas de CO₂, CH₄, H₂O y una gama de compuestos volátiles. En la producción convencional de biochar se quema biomasa que libera humo y gases de efecto invernadero que no se capturan adecuadamente, lo cual representa una fuente importante de contaminación ambiental que contribuyen al cambio climático. No hay país en el mundo que no haya experimentado los dramáticos efectos del cambio climático (PNUD, 2020).

2.5.1 Producción de Biochar

Se están empleando pequeñas estufas en países del tercer mundo para reducir el humo de los fuegos abiertos dentro de los hogares, quemar materiales de manera más eficiente y producir una enmienda del suelo al mismo tiempo (USBI, 2020).

El biochar se puede producir en un horno carbonizado. Un horno puede ser hecho de un tambor de aceite con un diseño simple. Tiene pequeños agujeros en la parte inferior (se levanta sobre ladrillos) y tiene un espacio entre la tapa y la cámara de pirolisis para permitir que entre una pequeña cantidad de aire (Narzari et al., 2015).

Las técnicas de producción de biochar no avanzaron significativamente durante siglos, excepto para usar hornos en lugar de montículos de tierra. Los hornos para

producir carbón están hechos de tierra, ladrillos e incluso acero. Pero estos hornos aún emiten muchas partículas y humo, incluidos los gases de efecto invernadero responsables de la alteración del clima global (USBI, 2020).

2.5.2 Aplicaciones del biochar

La pirolisis de biomasa con biochar devuelto al suelo es una posible estrategia para mitigar el cambio climático y reducir el consumo de combustibles fósiles (Hamedani et al., 2019).

El biochar podría potencialmente secuestrar 1 billón de toneladas de CO₂ anualmente que es esencialmente carbón vegetal de los desechos de árboles y/o granjas, tiene un gran potencial, dicen los investigadores, tanto para enriquecer los suelos como para absorber parte del exceso de dióxido de carbono que se acumula en la atmósfera y contribuye al calentamiento global (May et al., 2016).

2.6 Energías Renovables

Las actividades antropogénicas globales que resultan en la emisión de gases nocivos de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera han aumentado los desafíos que enfrenta el cambio climático (Elum & Momodu, 2017). Lograr soluciones a los problemas ambientales que enfrentamos hoy requiere acciones potenciales a largo plazo para el desarrollo sostenible. En este sentido, los recursos de energía renovable parecen ser una de las soluciones más eficientes y efectivas (Dincer, 2000).

La energía solar, entre otras fuentes de energía renovables, es una fuente de energía prometedora y de libre acceso para gestionar problemas a largo plazo en crisis energéticas (Kannan & Vakeesan, 2016). Los estudios sobre la energía fotovoltaica están aumentando y pueden desempeñar un papel importante para alcanzar una demanda de alta energía en todo el mundo (Gonçalves et al., 2017), el Ecuador por su

ubicación tiene un alto potencial para aprovechar la energía proveniente del sol. La energía solar es la más abundante, inagotable y limpia de todos los recursos de energía renovable hasta la fecha (Parida et al., 2011); el desarrollo de nuevas tecnologías de energía solar se considera una de las muchas soluciones clave para satisfacer una creciente demanda mundial de energía (Kabir, Kumar, Kumar, Adelodun, & Kim, 2018).

2.7 Diseño de Reactores

A nivel mundial se diseñan biodigestores con capacidades volumétricas diferentes, pero el horno tradicional puede producir un biochar de biosólidos de baja calidad (Gonzaga, 2017); por lo que es importante diseñar biodigestores que permitan obtener un biocarbón de alta calidad y con mínimos impactos ambientales.

Se han desarrollado y probado hornos para de producción de biochar para agricultores con una dimensión de 50.8 cm × 38.1 cm (altura × diámetro), utilizando tres configuraciones diferentes para optimizar el oxígeno (O₂) limitación y circulación de gas de síntesis: hermética sin circulación de gas de síntesis (Modelo I), semi-hermética con circulación de gas de síntesis externa (Modelo II) y semi-hermética con circulación de gas de síntesis interna (Modelo III) (Shamim, 2015) y todos ellos presentaron diferente eficiencia. También la tecnología basada en microondas es un método de calentamiento alternativo y ya se ha utilizado con éxito en la pirolisis de biomasa para la producción de biochar y biocombustibles gracias a su calentamiento rápido, volumétrico, selectivo y eficiente. (J. Li et al., 2016).

El tipo y la capacidad del reactor, temperatura de pirolisis, tiempo de residencia sólido, caudal de gas portador, el tiempo de residencia del vapor, así como el tipo y tamaño de la materia prima de biomasa son los parámetros que tienen mayor influencia

en los rendimientos del producto y sus propiedades (Brassard & Raghavan, 2017), por lo tanto, a tener en cuenta en el diseño del reactor.

2.8 Fuentes de Energía para el proceso de Pirolisis

Como ya se detalló anteriormente, la temperatura que debe alcanzar un horno para pirolisis depende de la materia a ser convertida en biochar y del tipo de pirolisis. En cualquier caso, se puede evidenciar que independientemente de la temperatura, existen estudios sobre la eficiente energética de los diferentes combustibles usados como fuente de energía. Así, por ejemplo (Negron, 2018) detalla que la eficiencia energética de un horno puede oscilar según el tipo de combustible. En el caso de combustibles fósiles, como el petróleo, gas y carbón tienen eficiencias térmicas entre 60 al 75% de acuerdo al nivel de tecnología usada, en cambio para el caso de la energía eléctrica existe una mayor eficiencia energética ya que existen menores pérdidas, logrando eficiencias entre 80 al 95%, claro dependiendo de la tecnología usada. Por esta razón, se da la tendencia moderna a utilizar energía eléctrica, pero el problema reside aún en el costo de la electricidad, lo cual se busca reducir con el uso de paneles solares en la presente investigación. (Negron, 2018)

Adicionalmente, a lo antes expuesto, se buscan alternativas mediante energías renovables, así (Valdez, 2012) detallan el proceso de pirolisis solar de cáscara de naranja. Demuestran en el estudio que es un proceso técnicamente factible que puede lograr disminuir la huella de carbono de este combustible en un 60% comparado con el petrodiesel. El sistema funciona mediante una parabólica que capta el calor solar y lo refleja. De igual manera, (Imaguer Galván & Rodríguez, 2017) presenta un estudio similar, pero afirma que están perfeccionando el reactor, pues están buscando un diseño que permita la rotación del calentador solar. Con esto se lograría una irradiación uniforme y por lo tanto una descomposición térmica más uniforme.

2.9 Interruptor eléctrico

El interruptor eléctrico es un dispositivo cuyo objetivo es abrir o cerrar el paso de corriente eléctrica en un circuito eléctrico. Entre sus funcionalidades se tiene que actúan al accionarlos: abren o cierran un circuito; se debe tener en cuenta que para los pulsadores o momentáneos se requiere mantener la presión sobre el actuante para que los contactos estén unidos (Bricos, 2021).

2.10 Contactor eléctrico

El contactor tiene como principal objetivo conectar o interrumpir la corriente eléctrica de una carga, estos nos permiten controlar toda clase de circuitos ya sea automática o manual. El funcionamiento está basado en cierre y apertura de circuitos eléctricos de cargas elevadas esto mediante la señal que se le da a la bobina o circuito de control que consta dentro del contactor (Vilches, 2013).

2.11 Sensor de Temperatura

Un sensor convierte una señal física de un tipo en una señal física de otra naturaleza. Ejemplificando una termocupla crea un voltaje que está referente con la temperatura, del mismo modo en una resistencia metálica se aprovecha el fenómeno de alteración de la resistencia con la temperatura para crear una señal de voltaje que sea proporcional a la temperatura (Cotarelo y Mori, 2019).

2.12 Termocupla

El funcionamiento de una termocupla se basa en el principio físico de la unión de dos alambres de metales diferentes que produce una diferencia de potencial en los dos extremos que no se encuentran en contacto que es función de la temperatura a la cual se encuentra. El voltaje producido en la unión es no lineal con respecto a la temperatura (Cotarelo y Mori, 2019).

2.13 Análisis Termo gravimétrico de la Madera

La biomasa lignocelulósica, es una mezcla compleja de polímeros de carbohidratos conocidos como celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de otras sustancias como extractables y cenizas, los cuales están contenidos en la pared celular de las plantas.

La exploración termogravimétrica (TGA) es una técnica usualmente usada para aprender las actitudes de descomposición de esta clase de materiales, en la decisión de las propiedades de la devolatilización y los límites cinéticos, como por ejemplo la energía de activación y el elemento preexponencial, así como la predominación de la temperatura y rapidez de calentamiento en el desarrollo de las actitudes de descomposición térmica (Yaman, 2004).

En los procesos de termoconversión la información relativa a el reparto de los productos y el desarrollo cinético se recibe, generalmente, por 2 vías clásicas (Yaman, 2004):

- Desde la curva de pérdida de masa, o curva termogravimétrica.
- Desde la dinámica de formación de los productos en reactores de pirolisis a pequeña escala.

2.14 Descomposición térmica de la madera

La descomposición es hecha por estudio termogravimétrico de pequeñas muestras, expone 2 regímenes de descomposición, y que el pico en el sector de descomposición a la menor temperatura puede estar asociado con la pirolisis de la hemicelulosa, y el pico a alta temperatura a la descomposición de la celulosa (Slopiecka et al., 2012).

Raveendran (1996) desarrolló estudios de la descomposición de residuos agrícolas, distinguiendo 5 intervalos de temperatura en los que se dice que tiene sitio la descomposición de los diferentes elementos de la biomasa lignocelulósica Tabla 1. En esta situación se observa que la descomposición de la lignina (más estable térmicamente comparada con la celulosa y hemicelulosa) se incluye en un extenso intervalo de temperatura, a partir de 350 °C hasta temperaturas mejores a los 500 °C (Slopiecka et al., 2012).

Las distintas biomásas vegetales se caracterizan por su variedad referente a contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y elementos extractables como terpenos, taninos, ácidos grasos, aceites y resinas; humedad y materia mineral. El contenido de dichos elementos juega un papel importante en el reparto y estructura de los productos de los procesos de termoconversión de la biomasa, que se alcanzan a determinadas condiciones de temperatura, sistema de calentamiento, atmósfera de actitud, entre otras (White et al., 2011).

CAPÍTULO III

3. Desarrollo Metodológico

3.1 Tipo de Estudio

El diseño y construcción de un reactor eléctrico de pirolisis térmica, es un proyecto de tipo tecnológico, experimental el mismo que tiene como objetivo la investigación y la puesta en prácticas de conocimientos adquiridos en cuanto tiene que ver a reactores eléctricos.

El presente estudio está basado en el diseño y construcción de un Reactor Eléctrico de Pirolisis Térmica, es un proyecto de tipo tecnológico, el mismo que se ha llevado a cabo por medio del procedimiento investigativo y experimental; con el fin de obtener como resultado un equipo que facilite la degradación térmica de la madera y al mismo tiempo sea amigable con el medioambiente.

En los próximos ítems se presentan los pasos a seguir para el diseño del reactor eléctrico el cual cumplirá la función de producción de carbón usando como materia prima la madera.

El diseño está basado en modelos y condiciones planteadas en literatura como temperatura, procedimiento de activación del carbón y proporción de materia para pruebas experimentales.

3.2 Condiciones del diseño del reactor en base en modelos planteados en investigaciones previas

Los parámetros iniciales son definidos por las condiciones de trabajo del reactor, dentro de las cuales está presente la temperatura de trabajo que se estima que esta entre 200 y 400°C, también se tomó en cuenta la presión máxima de trabajo del reactor en base a estudios anteriores y también a la norma para la construcción de recipientes y

calderas a presión establecida por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), de esta manera se analiza el tipo de materiales y dimensionamiento para la construcción del reactor y así tenga un correcto funcionamiento.

La capacidad de producción de 1306 (g) ya que de esta forma los resultados obtenidos son favorables para las pruebas realizadas. En concordancia con lo anterior la tecnología escogida para llevar a cabo en el diseño del equipo es un reactor “tipo caldera”, que según los estudios que se ha llevado a cabo, es empleado para pequeñas producciones o pruebas, como las establecidas en los objetivos del estudio.

Otro factor fundamental es el tiempo de trabajo, el cual se ha optado por un periodo máximo de 1 hora para la fase de pirolisis de la madera, por lo tanto, el material del reactor es de fundamental trascendencia debido a las condiciones de trabajo como temperatura y otros componentes que puedan perjudicar al equipo o al proceso de producción.

3.3 Determinación de Variables del proceso

3.3.1 Temperatura

La temperatura en el proceso de pirolisis es uno de los aspectos más importantes a considerar, ya que estará en diferentes valores en función a los productos que se deseen obtener, teniendo en cuenta que a mayor temperatura se tendrá mayor degradación de la madera en un proceso rápido, mientras que a menores temperaturas el proceso será más demorado.

3.3.2 Presión

La presión en el proceso de pirolisis es directamente proporcional a la temperatura es decir a mayor temperatura mayor generación de presión dentro del reactor y por ende la rapidez del proceso.

3.3.3 Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia dentro del proceso está relacionado con la calidad de producto que se deseen obtener, como también con la optimización del tiempo y la variación de la temperatura, todas estas variables son aplicadas dependiendo del tipo de madera que se va a usar para el proceso.

3.3.4 Tipo de Madera

La selección del tipo de madera es de vital importancia para el proceso pirolisis ya que de eso depende el tiempo y la temperatura que se debe aplicar al reactor para la obtención del biochar.

Es importante considerar el estado físico de la madera con esto se considera su humedad, grosor, longitud y sobre todo su dureza.

3.3.5 Humedad

La humedad está presente en ramas recientemente arrancadas de árboles como también en madera mojada. Estas al estar en estado húmedo hacen que el proceso de deshidratación y pirolisis se tarde más tiempo en comparación con la madera seca.

3.4 Diseño del reactor de pirolisis para la obtención de biochar mediante niquelinas eléctricas

Con la información recaudada y estudios previos se procede al diseño del reactor tomando en cuenta parámetros necesarios para el equipo en base a modelos teóricos y comerciales, esto nos será muy útil para facilitar la obtención de materiales necesarios para el armado del reactor y a su vez su correcto ensamblado y funcionamiento.

Los planos del reactor y los componentes que conforman el equipo se muestran en los anexos A, B, C, D, E y F.

3.4.1 Diseño y dimensionamiento del recipiente para el reactor eléctrico

En el diseño del recipiente, se establecieron las variables importantes para su operación como son la temperatura, presión y proporción de material a degradar, variables que son principales para el proceso de degradación de la madera que se lleva a cabo en el interior del reactor.

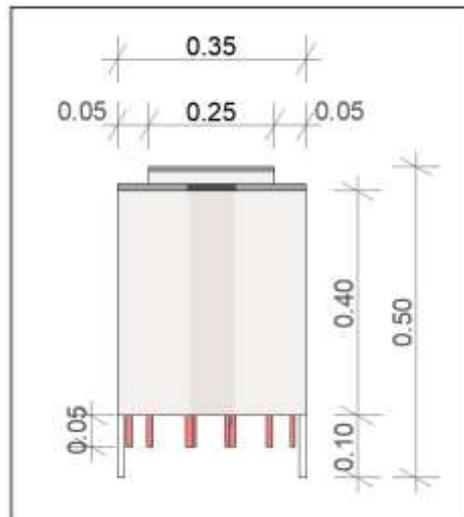
En el dimensionamiento del recipiente en forma de cilindro se estableció una presión de diseño de 40 psi, fundamentada en el código ASME G-27 para el diseño de recipientes a presión, y una temperatura de trabajo no superior a 450 °C.

En cuanto al cilindro consta de diámetro de 350 mm y altura de 400 mm, se obtuvo como resultado un volumen de 38,48 litros, para la validación del proyecto se utilizará solo el 50% equivalente es decir 1306 (g) de material a degradar, la razón es mantener la adecuada transferencia de calor como también mantener moderada la presión de reactor durante la pirolisis.

El espesor mínimo de pared del recipiente se calculó a partir de los fundamentos de la norma ASME, con la finalidad de seleccionar el espesor adecuado para el reactor como es el acero ASTM A36. El espesor mínimo de pared obtenido fue de 0,03mm estos cálculos se puede apreciar en el anexo G.

En la base se utilizó metal de 0,04mm de espesor esto se debe a que ahí irán sujetadas las niquelinas y es necesario sea de mayor grosor para su correcta fijación, mientras que para la tapa superior se utilizó metal de 0,03mm por el motivo de que es ahí por donde escapan los gases y se necesita sea de gran resistividad.

Figura 1. Dimensiones del recipiente del reactor.



Nota. Elaboración propia.

3.4.2 Sistema de calentamiento del reactor eléctrico.

Para el sistema de calentamiento del reactor se construyó tres resistencias eléctricas tipo cartucho cada una de 1800W.

Entre los materiales que constituyen las niquelinas eléctricas tenemos níquel, Cromo, cerámica, polímeros. acero inoxidable.

La parte baja de las resistencias son tipo rosca para la sujeción en la base del reactor como se puede apreciar en la Figura 2.

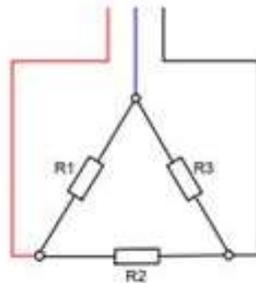
Figura 2. Niquelina eléctrica con base tipo rosca.



Nota. Elaboración propia.

Las niquelinas están conectadas en triángulo, como se puede apreciar en la Figura 3; la fase A esta representada en color azul, la fase B está representada en color rojo y la fase C está representada en color negro.

Figura 3. Diagrama de conexión eléctrica de las niquelinas.



Nota. Elaboración propia.

3.5 Sistema de control eléctrico

El diseño del control eléctrico para el presente proyecto es de tipo ON/OFF; está constituido por un interruptor eléctrico, pirómetro, termocupla, contactor, luz piloto los cuales cumplen con la función de controlar el sistema de energización de las niquelinas.

Los elementos eléctricos que fueron utilizados para el sistema de control, se exponen a continuación con sus características correspondientes.

3.5.1 Interruptor eléctrico

El interruptor eléctrico aplicado es de tipo SWICH, consta de dos polos: encendido y apagado, y su accionamiento es manual.

3.5.2 Pirómetro

El tipo de pirómetro usado es de tipo PID REX-C100, y consta de las características siguientes:

- Voltaje de alimentación: 100-240VAC.

- Frecuencia 50Hz/60Hz.
- Resolución 14 bits.
- Apto para Termopares tipo: K, J, S, E.
- Relé de alarma: normalmente abierto, capacidad 250 V/3A AC o 30 V/3A DC.
- Dimensión: 1/16 (48mm x 48mm x 110mm).
- Parámetros de control PID programables individualmente.
- Salida de relé: contacto capacidad 250 V CA.
- Consumo de energía: 10 VA.

En la pantalla del pirómetro, mostrada en la Figura 4, se pueden observar las simbologías y botones que significan lo siguiente:

- **SV:** Valor de ajuste.
- **PV:** Rango de medición.
- **SET:** Botón de acceso al menú.
- Flechas de ubicación en los dígitos de programación.

En la Figura 5 se muestra los pines de conexión del pirómetro.

3.5.3 Contactador Eléctrico

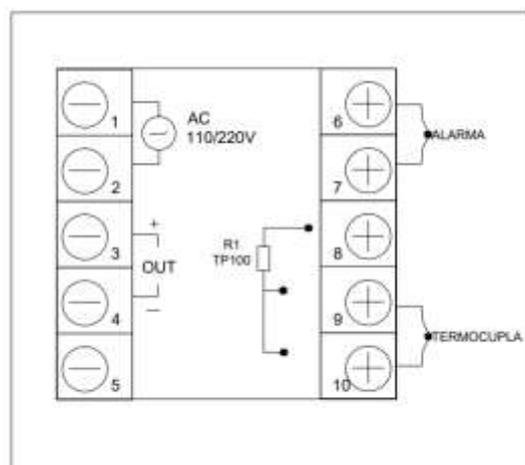
Se utiliza un contactor trifásico de 220V a 40A el cual nos será útil para la conexión y desconexión de cada una de las tres fases.

Figura 4. Pantalla del pirómetro.



Nota. Elaboración propia.

Figura 5. Pines de conexión del pirómetro PID REX-C100.



Nota. Elaboración propia.

3.5.4 Indicadores eléctricos para tablero de control

El indicador eléctrico o luz piloto en la caja de control será útil, ya que su principal objetivo es emitir una señal luminosa la cual servirá para saber si el sistema está encendido o apagado.

3.6 Construcción del reactor eléctrico.

3.6.1 Construcción del recipiente

El recipiente como se puede observar en la Figura 6, fue construido tomando en cuenta los espesores calculados en su diseño, y está constituido por las siguientes partes:

3.6.1.1 Pared cilíndrica

Al tener la plancha de metal se procede hacer el corte mediante una sierra industrial, luego de eso se le da la forma de cilindro donde se procede a la fijación de las piezas como es la base y la tapa superior para esto se utiliza la soldadura SMAW (soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos).

3.6.1.2 Tapa de acceso

La tapa está ubicada en la parte superior de la estructura, sirve para suministrar de materia prima al recipiente, de igual manera es necesaria para poder sacar la materia al finalizar el proceso de pirolisis.

3.6.1.3 Soporte del reactor o base elevadora

El soporte cumple un papel fundamental a la hora de la conexión eléctrica, eleva el reactor y provee un espacio en la parte baja para el cableado, de esta manera procura que los cables queden bien aislados y no tengan contacto con ninguna parte del recipiente para así evitar daños en el equipo y en los elementos eléctricos.

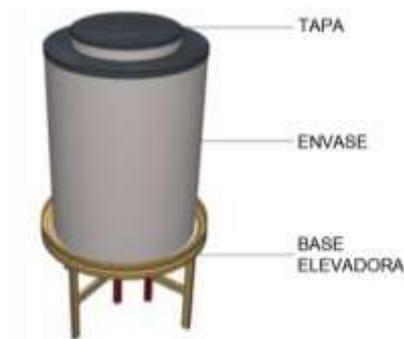
3.7 Construcción del sistema eléctrico

La construcción del sistema eléctrico se divide en: parte de control y de fuerza.

3.7.1 Sistema de control para el reactor eléctrico

El sistema de control está representado en el circuito de la Figura 7 donde se puede observar que el interruptor de encendido está conectado a una de las fases de la red.

Figura 6. Reactor eléctrico.



Nota. Elaboración propia.

El interruptor enciende al pirómetro, el cual dependiendo de la temperatura a la que este programado y de la temperatura que está censando, emite la señal a la bobina del contactor, que cumple la función de cerrar o abrir el circuito de fuerza.

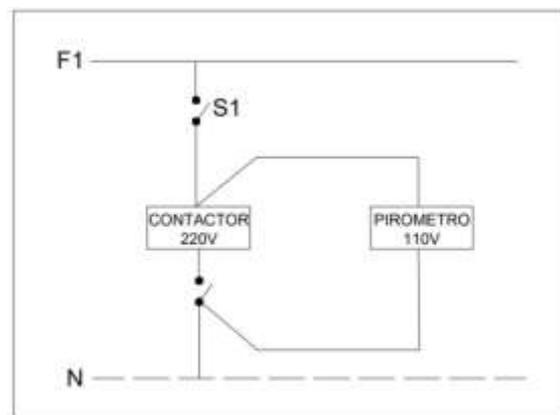
Cuando el contactor está en modo “normalmente cerrado”, significa que el circuito está cerrado, es decir las niquelinas están siendo energizadas y esto es reflejado en el indicador de la luz piloto que se tiene en la caja de control.

Cuando el contactor está en modo “normalmente abierto” las niquelinas están sin energizar, esto se debe a que el pirómetro no manda señal de cerrado a la bobina del contactor, debido a que la temperatura censada debe estar en un rango superior a la temperatura que se programa como límite en el pirómetro; como también puede ser que el sistema este apagado, esto certifica si el indicador de la luz piloto está apagado.

3.7.2 Sistema de fuerza (calentamiento)

El sistema de calentamiento del reactor está constituido por tres niquelinas eléctricas, cada una de 1800W, las cuales están fijadas en la base interior del recipiente. Sus conectores quedan expuestos en la parte exterior baja del cilindro, donde serán conectados en triángulo, como se muestra en la Figura 8.

Figura 7. Esquema de conexión monofásica del sistema de control.

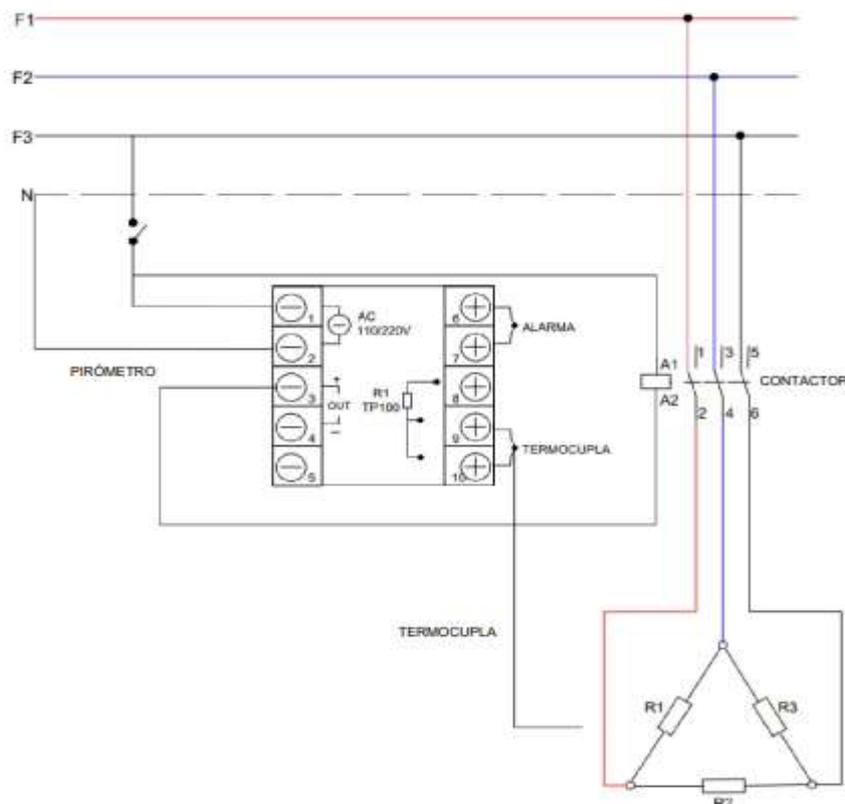


Nota. Elaboración propia.

La fijación de las niquelinas se puede apreciar en el ANEXO H.

En los nodos de conexión se alimenta con 220V en cada una de las tres fases, estas están controladas por el contactor, creando así un sistema equilibrado con respecto a las corrientes de cada fase.

Figura 8. Esquema de conexión general del sistema de control y fuerza.



Nota. Elaboración propia.

3.8 Diseño y dimensionamiento de alimentación del sistema mediante energía solar fotovoltaica

El consumo eléctrico cumple un papel fundamental al momento de hacer el dimensionamiento para la energización del sistema.

Para el funcionamiento del reactor se tiene un consumo eléctrico de 8.9 kW, dicho consumo debe ser abastecido por una cantidad considerable de paneles solares

3.8.1 Recursos energéticos en la ciudad de Cuenca

El análisis del potencial energético existente en la ciudad de Cuenca en base a los recursos de energía solar, delimita la información que es pertinente para evaluar el dimensionamiento y los cálculos necesarios para satisfacer la demanda de consumo energético eléctrico del sistema.

3.8.2 Datos de radiación solar

Para determinar la radiación solar incidente en la ciudad de Cuenca, se analiza las diferentes bases de datos de radiación extrayendo la información disponible en organizaciones que realizan la medición de radiación solar a nivel mundial como son la NASA, Solar Electricity Handbook, software Censol y el Atlas Solar de Ecuador elaborado por el Consejo Nacional de Electricidad - CONELEC, teniendo como resultado una base de datos de la radiación solar global para la zona de estudio que están representados en kWh/día como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Radiación solar superficie horizontal. Cuenca – Ecuador, diferentes bases de datos.

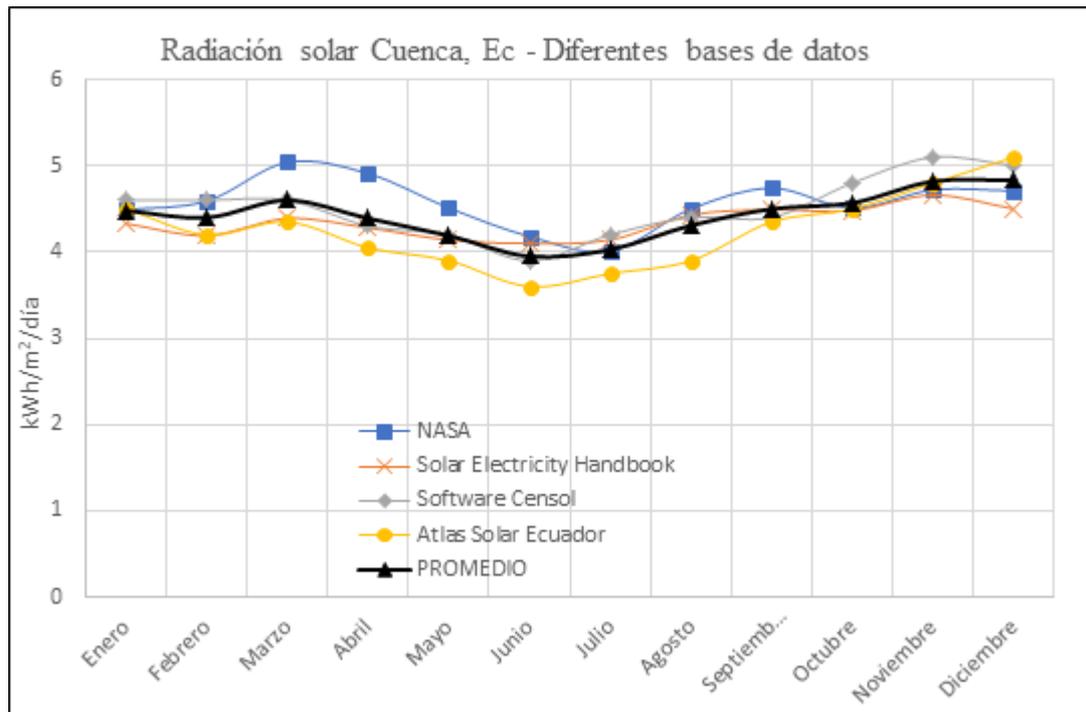
MES	NASA [kWh/m ² /día]	Solar Electricity Handbook [kWh/m ² /día]	Software Censol [kWh/m ² / día]	Atlas Solar Ecuador [kWh/m ² /día]	PROMEDIO [kWh/m ² /día]
Enero	4,49	4,33	4,60	4,50	4,48
Febrero	4,59	4,19	4,60	4,20	4,40
Marzo	5,04	4,39	4,60	4,35	4,60
Abril	4,91	4,28	4,30	4,05	4,39
Mayo	4,51	4,14	4,20	3,90	4,19
Junio	4,18	4,10	3,90	3,60	3,95
Julio	4,01	4,14	4,20	3,75	4,03
Agosto	4,50	4,43	4,40	3,90	4,31
Septiembre	4,74	4,49	4,40	4,35	4,50
Octubre	4,51	4,48	4,80	4,50	4,57
Noviembre	4,72	4,66	5,10	4,80	4,82
Diciembre	4,71	4,50	5,00	5,10	4,83
Media Anual Irradiación Global	4,58	4,34	4,51	4,25	4,42
Diaria – Sup. horizontal					
Mayor Anual	5,04	4,66	5,10	5,10	4,83
Menor Anual	4,01	4,1	3,9	3,6	3,95

Nota. Recuperado de (Matute, 2020)

Los datos obtenidos que se presentan en la Tabla 1, corresponden a valores de radiación solar global mensual promedio en una superficie horizontal, es decir, a 0° de inclinación, con esos valores se calcula el promedio de radiación global mensual entre las bases de datos, teniendo como resultado que, en la ciudad de Cuenca, Ecuador existe 4,42 kWh/m² en promedio, lo que quiere decir que en la urbe se puede aprovechar 4,42 horas de sol al día, siendo utilizable para cualquier sistema solar.

En la Figura 9, se muestra un análisis de la radiación solar global mensual representada gráficamente, con el fin de tener un modelo de la variación de la radiación en los diferentes meses, y poder analizar los meses en que existe mayor radiación y los meses con menor radiación.

Figura 9. Radiación solar global Cuenca, Ecuador – Diferentes bases de datos.



Nota. Recuperado de (Matute, 2020)

Para la aplicación de sistemas solares fotovoltaicos, es necesario determinar la radiación solar sobre superficies inclinadas, ya que el panel solar debe ir ubicado de tal forma que se aproveche la mayor cantidad de radiación solar; para ello se requieren de dos datos principales: la radiación solar global media mensual (detallada en la Tabla 1) y la latitud de la zona de estudio.

A continuación, con estos datos es necesario calcular dos factores importantes que definen el rendimiento del sistema solar que son: el ángulo de inclinación óptimo β y la orientación óptima α (azimut) de los paneles solares.

Donde, el ángulo de inclinación β determina el ángulo de la ubicación del panel solar con respecto al plano horizontal y la orientación α (azimut) que es el ángulo de orientación donde se aprovecha de forma óptima la radiación solar a lo largo de todo el

año, es decir que, el panel solar deberá inclinarse hacia el Sur en el hemisferio Norte y hacia el Norte en el hemisferio Sur. (Matute, 2020)

La ciudad de Cuenca está ubicada al sur del país que está dentro de la línea ecuatorial, cuyas coordenadas geográficas son: Latitud -2.9005500 y Longitud -79.0045300, por lo tanto, con el dato de la Latitud se procede a calcular el ángulo de inclinación óptima para la ubicación de los paneles solares, mediante la siguiente ecuación (Barros et al., 2018).

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 * |\varphi|$$

Dónde:

β_{opt} : Ángulo de inclinación óptima (°)

φ : Latitud de la zona del proyecto (valor absoluto).

Se tiene como resultado que el ángulo de inclinación óptima es 5,70 °, sin embargo, según la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-11 de Energías Renovables, recomienda que el ángulo de inclinación del panel solar sea de hasta $\beta = 15^\circ$ para aprovechar la mayor cantidad de energía solar durante el año (Cámara de la construcción de Quito, 2011) ya que para fines constructivos y de mantenimiento esta inclinación evita acumulación de polvo y basura en los paneles solares, de tal manera que ayuda a los sistemas solares a auto-limpiarse con la lluvia, pero, es necesario realizar mantenimientos temporales.

Para el ángulo de orientación para efectos de cálculo se considera con un $\alpha=0^\circ$, es decir, que se recomienda orientar los paneles solares hacia el Norte (línea equinoccial), para un mejor aprovechamiento de la radiación solar.

Posteriormente, en la Tabla 2 se detalla los valores calculados de radiación efectiva sobre una superficie inclinada, considerando un ángulo de inclinación para los paneles solares de $\beta = 15^\circ$ con un azimut $\alpha = 0^\circ$; es decir con orientación al Norte, así mismo se considera los coeficientes de perdidas, teniendo como resultado la estimación de los valores de la irradiación efectiva incidente sobre la superficie de los paneles solares.

Tabla 2. Radiación solar efectiva sobre una superficie inclinada. Cuenca – Ecuador, diferentes bases de datos.

MES	NASA [kWh/m ² /día]	Solar Electricity Handbook [kWh/m ² /día]	Software Censol [kWh/m ² /día]	Atlas Solar Ecuador [kWh/m ² /día]	PROMEDIO [kWh/m ² /día]
Enero	4,17	4,02	4,28	4,18	4,16
Febrero	4,27	3,89	4,28	3,90	4,09
Marzo	4,68	4,08	4,28	4,04	4,27
Abril	4,56	3,98	4,00	3,76	4,08
Mayo	4,19	3,85	3,90	3,63	3,89
Junio	3,89	3,81	3,63	3,35	3,67
Julio	3,73	3,85	3,90	3,49	3,74
Agosto	4,18	4,12	4,09	3,63	4,00
Septiembre	4,41	4,17	4,09	4,04	4,18
Octubre	4,19	4,16	4,46	4,18	4,25
Noviembre	4,39	4,33	4,74	4,46	4,48
Diciembre	4,38	4,18	4,65	4,74	4,49
Media Anual Irradiación Global	4,25	4,04	4,19	3,95	4,11
Diaria – Sup. inclinada 15°					
Mayor Anual	4,68	4,33	4,74	4,74	4,49
Menor Anual	3,73	3,81	3,63	3,35	3,67

Nota. Recuperado de (Matute, 2020)

Se observa en la Tabla 2 que los valores de irradiación con una inclinación del panel de $\beta = 15^\circ$, se puede decir que los valores de radiación promedio se encuentran sobre los 4 kWh/m²/día, lo que quiere decir que en la ciudad de Cuenca existe al menos

4 horas de sol al día siendo una radiación aprovechable y aplicable para cualquier sistema solar fotovoltaico.

La potencia trifásica de operación del rector es de 8.9KW, el cálculo y datos de la potencia del reactor está representado en los anexos K y M.

3.8.3 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Mediante la utilización del software PVsist 7.2 se pudo dimensionar el sistema de la siguiente manera: 5 filas de 5 paneles de 400W en serie, como resultado se tiene 5 entradas con una potencia de 10000W.

El voltaje generado por cada panel es de 40V, al estar conectados en serie los voltajes se suman, generando así en cada fila de 5 paneles un total de 200V.

La corriente de generación de cada panel es de 10A, al tener 5 filas de paneles solares en paralelo las corrientes se suman teniendo así 50 A.

Todas las variables antes mencionadas tanto como potencia, voltaje y corriente cumplen con los rangos de operación proporcionados en la Tabla de funcionamiento de la marca proveedora del inversor.

Los resultados y simulación del programa se pueden apreciar en el Anexo N.

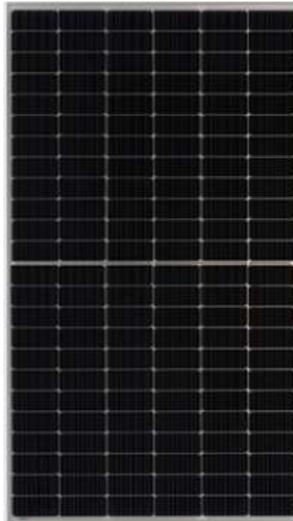
El diseño de la ubicación de los paneles solares se puede apreciar en el Anexo O, donde se propone ubicar los paneles de una manera estratégica tomando en cuenta tanto orientación como inclinación, esto para aprovechar la mayor radiación solar para el correcto funcionamiento del sistema.

3.8.4 Elementos principales utilizados para el diseño del sistema fotovoltaico

3.8.4.1 Panel monocristalino YLD-36b

Los paneles solares que se utilizó para el dimensionamiento del sistema son de la, marca YINGLI SOLAR ya que son eficientes y los que podemos encontrar en nuestro mercado local, el panel solar se puede apreciar en la Figura 10.

Figura 10. *Panel solar monocristalino.*



Nota. Elaboración propia.

Las características y parámetros de operación del panel según el proveedor se detallada en la Tabla 3.

Tabla 3. *Características* técnicas de paneles solares YLD-36b

PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE PANEL YLD-36B	
Energía salida	400W
Voltaje de operación	40V
Corriente	9.73A
Voltaje circuito abierto	50V
Máximo voltaje del sistema	1000V Dc - 1500V Dc
Dimensiones (L/ W/ H)	2008mm/1002mm/40mm
Peso	22.7 kg

Nota. Elaboración propia.

3.8.5 Inversor Eléctrico

El inversor eléctrico para el diseño se utilizó de la marca Growatt modelo 15000~22000TL3-SL, el cual se puede apreciar en la Figura 11.

Figura 11. *Inversor eléctrico Growatt15000~22000TL3-SL*



Nota. Elaboración propia.

Las especificaciones y características técnicas del inversor están detalladas en la Tabla 4.

Tabla 4. *Características técnicas del inversor Growatt 15000~22000TL3-SL*

CARACTERÍSTICAS INVERSOR GROWATT 15000 TL3-SL	
Potencia Máxima Recomendada	1950W
Voltaje máximo	800V
Voltaje mínimo de operación	250V
MPPT Rango de voltaje	200/650V
Máxima entrada corriente	64A
AC nominal salida	15000W
Máxima AC Aparente	16600VA
Voltaje nominal en AC	127/229V
Corriente máxima de salida	60A
Eficiencia	98.80%
Dimensiones (W / H / D)	470/45/270mm

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

4. Análisis y Comparación de Resultados

4.1 Pruebas en el proceso de Pirolisis y obtención de Carbón activado

Para las pruebas y funcionamiento del reactor se utilizó como materia prima residuos forestales como: ramas de ciprés, pino, quinua, las cuales se aprecia en la Figura 12.

Figura 12. *Biomasa*



Nota. Elaboración propia.

Se utilizó el 50 por ciento de la capacidad del recipiente para que el calentamiento de la madera sea uniforme y tener la facilidad al momento de sacar los resultados al final del proceso. Esto se ve reflejado gráficamente en el anexo I.

Se ejecutaron 6 pruebas con diferentes tiempos de pirolisis y temperatura; cada una de ellas conjuntamente con sus resultados se describe a continuación.

En la prueba 1, el tiempo de calentamiento del reactor hasta llegar a los 100 °C, fue de 5 minutos; mientras que el tiempo de pirólisis fue de 30 minutos.

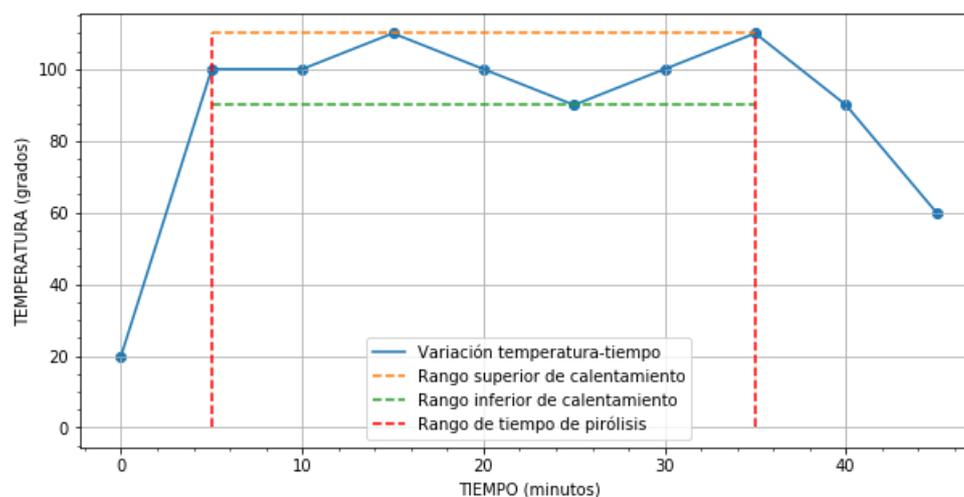
Para la extracción de la materia prima final, se esperó un tiempo de 10 minutos de enfriamiento del reactor. En la Tabla 5, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 1; y en la Figura 13 su representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirólisis.

Tabla 5. Datos de prueba 1

PRUEBA 1						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
26/3/2021	Ciprés	100 °C	15:00h	5 min	15:35 h	10 min

Nota. Elaboración propia.

Figura 13. Representación gráfica de la prueba 1.



Nota. Elaboración propia.

En la prueba 1 se pudo constatar, que el tiempo y la temperatura no son suficientes para generar un proceso adecuado de pirólisis, según los resultados esperados, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. *Resultado de la prueba 1.*

Nota. Elaboración propia.

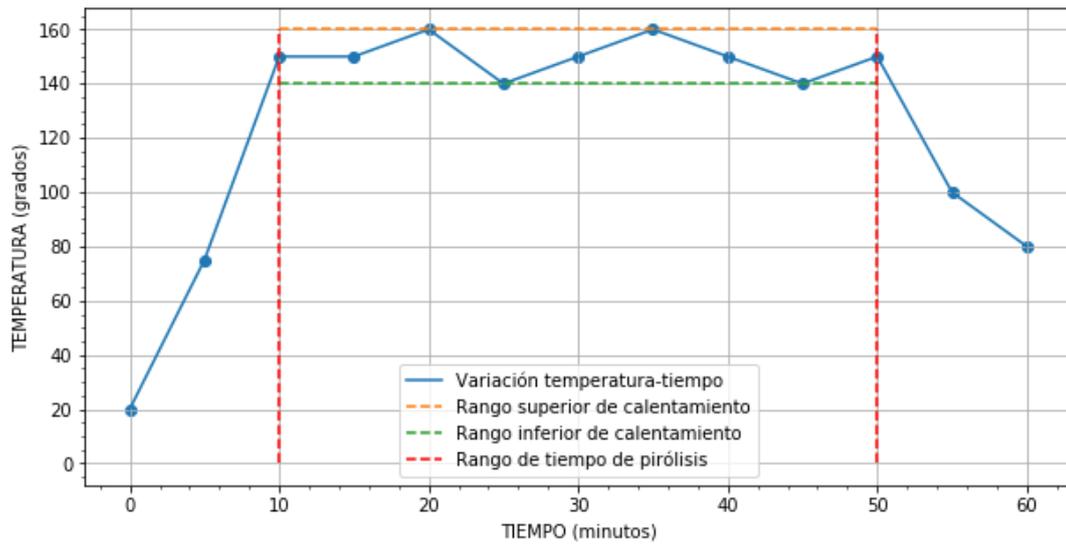
En la prueba 2, el tiempo de calentamiento se programó a 40 min a una temperatura constante de 150 °C, el tiempo que el reactor tomo en calentarse y llegar a dicha temperatura fue de 10 minutos; Para la extracción de la materia prima final, se esperó un tiempo de 10 minutos de enfriamiento del reactor. En la Tabla 6, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 2; y en la Figura 15 su representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

Tabla 6. *Datos de prueba 2.*

PRUEBA 2						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
26/3/2021	Ciprés	150 °C	16:00h	10 min	16:50 h	10 min

Nota. Elaboración propia.

Figura 15. Representación gráfica de la prueba 2.



Nota. Elaboración propia

En la prueba 2 al elevar la temperatura 50 grados más que en la prueba 1 se pudo constatar, que el tiempo y la temperatura no son suficientes para generar un proceso adecuado de pirólisis según los resultados esperados, como se muestra en la Figura 16

Figura 16. Resultado de la prueba 2.



Nota. Elaboración propia

En la prueba 3, se procedió a elevar la temperatura a 200°C, el tiempo que le tomo al reactor en llegar a la temperatura mencionada es de 10 minutos, Una vez llegada a la temperatura de 200°C se tomó el tiempo de 40 min, para la extracción de la

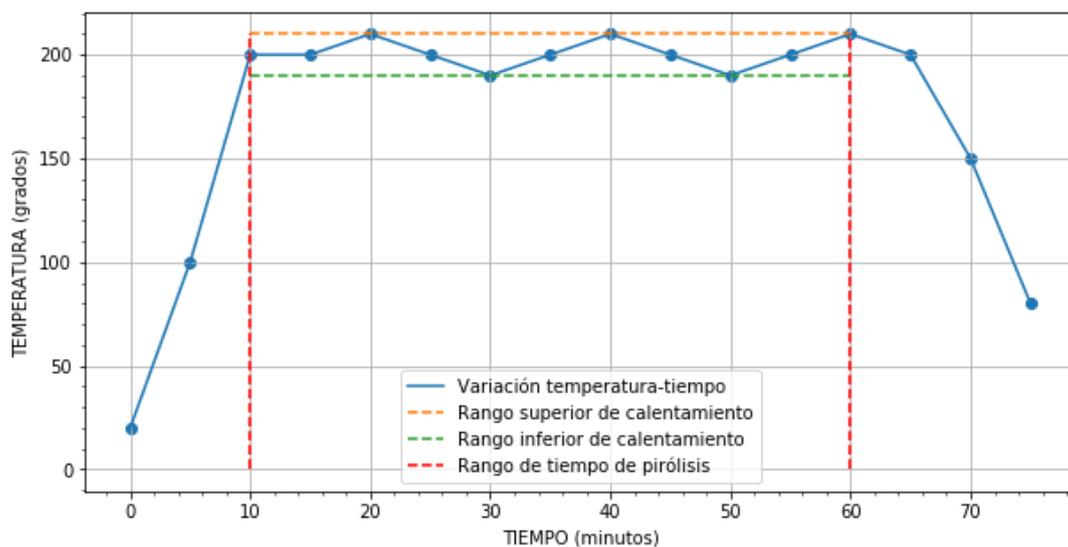
muestra final, se esperó un tiempo de 12 minutos de enfriamiento del reactor. En la Tabla 7, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 3; y en la Figura 17 su representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirólisis.

Tabla 7. Datos de prueba 3.

PRUEBA 3						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
29/3/2021	Ciprés	200 °C	10:00h	10 min	10:50 h	12 min

Nota. Elaboración propia.

Figura 17. Representación gráfica de la prueba 3.



Nota. Elaboración propia

En la prueba 3 al elevar la temperatura a 200 grados se pudo constatar, que las ramas de ciprés solo se carbonizan la parte exterior es decir la celulosa, siendo así un proceso incompleto de pirólisis como se puede observar en la Figura 18.

Figura 18. Resultado de la prueba 3.

Nota. Elaboración propia

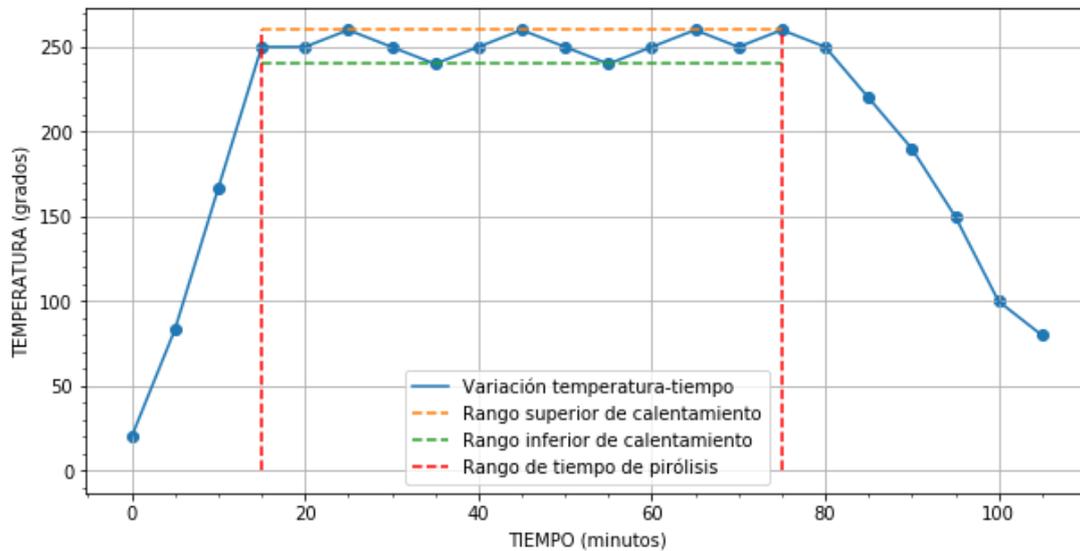
En la prueba 4, se procedió a elevar la temperatura a 250°C, el tiempo que le tomo al reactor en llegar a la temperatura mencionada es de 15 minutos, Una vez llegada a la temperatura se tomó el tiempo de 60 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 15 minutos de enfriamiento del reactor. En la Tabla 8, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 4; y en la Figura 19 la representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirólisis.

Tabla 8. Datos de prueba 4.

PRUEBA 4						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
29/3/2021	Ciprés	250 °C	11:30h	15 min	12:45 h	15 min

Nota. Elaboración propia.

Figura 19. Representación gráfica de la prueba 4



Nota. Elaboración propia.

En la prueba 4 con la temperatura de 250 grados y una hora de pirólisis se pudo constatar, que las ramas de ciprés se carbonizaron en un 80 por ciento tomando en cuenta que para quebrar las ramas se tenía que hacer una pequeña fuerza con las manos, empezando así a sentir la eficiencia del reactor, los resultados de pirólisis como se puede observar en la Figura 20.

Figura 20. Resultado de la prueba 4.



Nota. Elaboración propia.

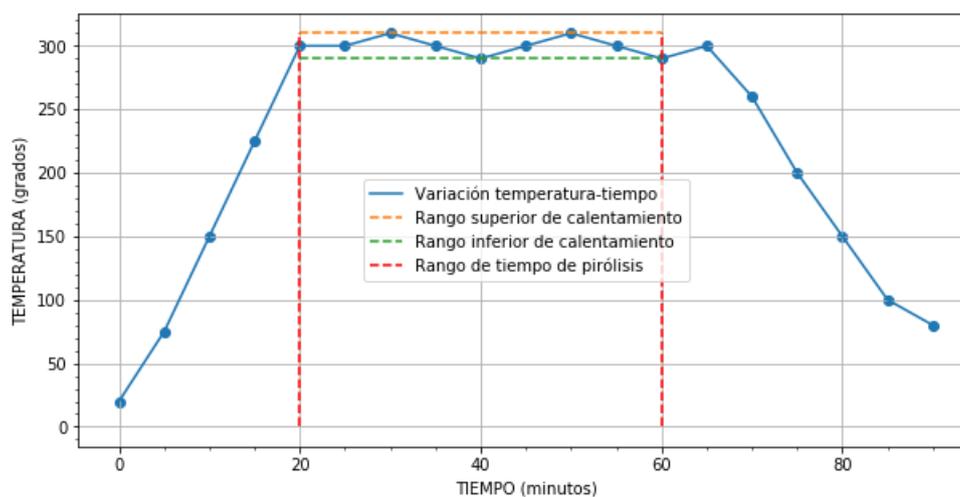
En la prueba 5, se elevó la temperatura a 300°C, el tiempo que le tomo al reactor en llegar a la temperatura mencionada es de 20 minutos. Una vez llegada a la temperatura se tomó el tiempo de 30 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 25 minutos de enfriamiento del reactor. En la Tabla 9, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 5; y en la Figura 21 la representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirólisis.

Tabla 9. Datos de prueba 5.

PRUEBA 5						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
29/3/2021	Ciprés	300 °C	14:00h	20 min	15:00 h	25 min

Nota. Elaboración propia.

Figura 21. Representación gráfica de la prueba 5



Nota. Elaboración propia.

En la prueba 5 al aumentar la temperatura a 300 grados y proceder a 30 min de pirólisis se pudo constatar, que las ramas de ciprés se carbonizaron por completo, al tener contacto con las ramas conservan su forma física, es necesario someterle una

pequeña fuerza para que se descomponga siendo esta una de las pruebas más eficientes del reactor, los resultados de pirolisis como se puede observar en las Figuras 22 y 23.

Figura 22. *Resultado de la prueba 5.*



Nota. Elaboración propia.

Figura 23. *Comparación de la madera antes y después de la prueba 5.*



Nota. Elaboración propia.

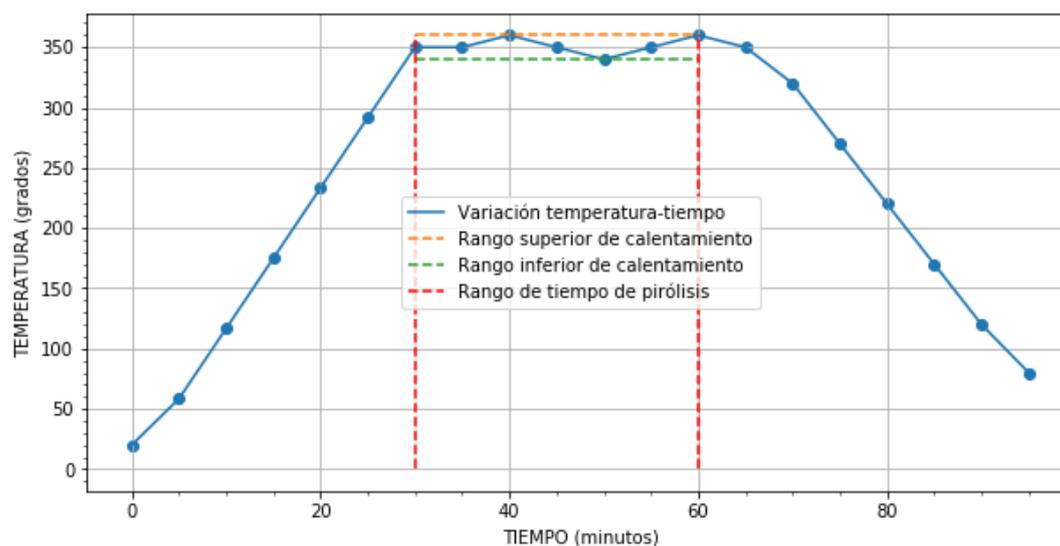
En la prueba 6, se elevó la temperatura a 350°C, el tiempo que le tomo al reactor en llegar a la temperatura mencionada es de 25 minutos, Una vez llegada a la temperatura se tomó el tiempo de 30 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 30 minutos de enfriamiento del reactor. En la Tabla 10, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 6; y en la Figura 24 la representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

Tabla 10. Datos de prueba 6.

PRUEBA 6						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
29/3/2021	Ciprés	350 °C	16:00h	25 min	16:55 h	30 min

Nota. Elaboración propia.

Figura 24. Representación gráfica de la prueba 6



Nota. Elaboración propia.

En la prueba 6 al aumentar la temperatura a 350 grados y un tiempo de pirolisis de 30 min se pudo constatar, que las ramas de ciprés se carbonizaron por

completo, al tener contacto con las ramas pierden su forma física se carboniza la parte de la lignina y la celulosa, siendo esta la prueba con resultados más favorables ya que el proceso de pirolisis tiene como resultado la carbonización de las ramas por completo obteniendo así biocarbón o biochar, los resultados de pirolisis como se puede observar en la Figuras 25.

Figura 25. Resultado de la prueba 6



(a)



(b)

Nota. Elaboración propia.

Entre la validación de resultados de las pruebas se puede apreciar que la materia prima en este caso las ramas durante el proceso de pirolisis sufren de deshidratación ya sea de la lignina y la celulosa, haciendo que las ramas pierdan notoriamente su peso al comparar el peso inicial con el peso del resultado cuando ya se muestran como biocarbon, Esta comparación se puede apreciar en el anexo L.

4.2 Comportamiento del sistema en funcionamiento

El sistema está alimentado por la red trifásica, se procedió a hacer las mediciones de voltajes, corrientes, potencia.

Las mediciones fueron hechas con de un analizador de redes eléctricas marca FLUKE, mostrado en la Figura 26.

Para obtener los valores a los que está operando el sistema la conexión recomendada por el manual del analizador se muestra en la Figura 27. Los datos obtenidos en el proceso de medición, se muestran en la Tabla 11.

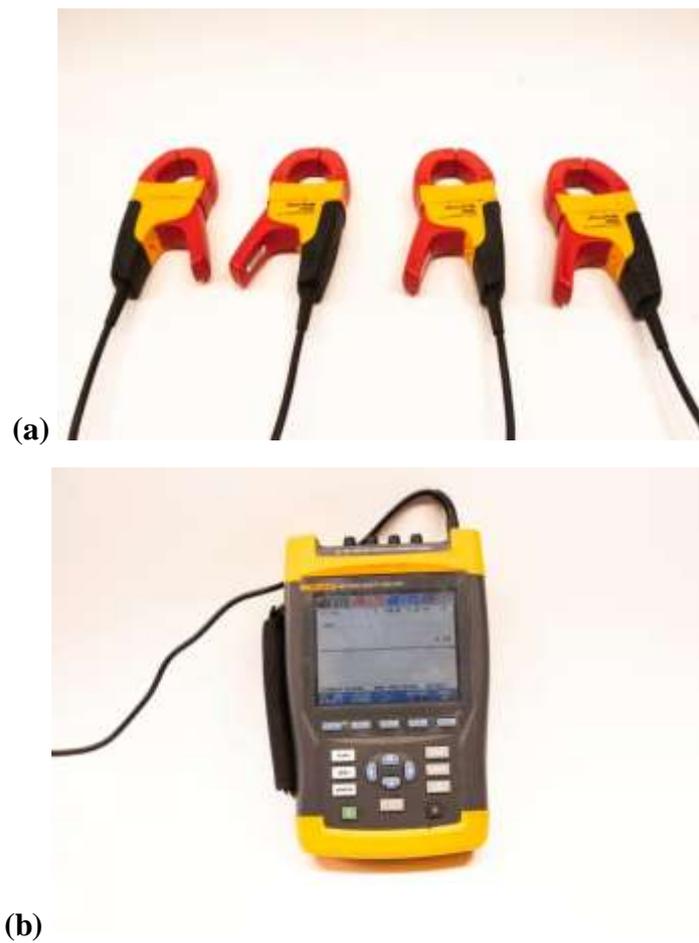
Tabla 11. Datos obtenidos durante la medición.

	Corrientes	Voltajes	Potencia	Frecuencia
Fase 1	24 A	222V	3.0 KW	60 Hz
fase 2	23 A	222 V	2.9 KW	60 Hz
fase 3	24 A	223 V	3.9 KW	60 Hz

Nota. Elaboración propia.

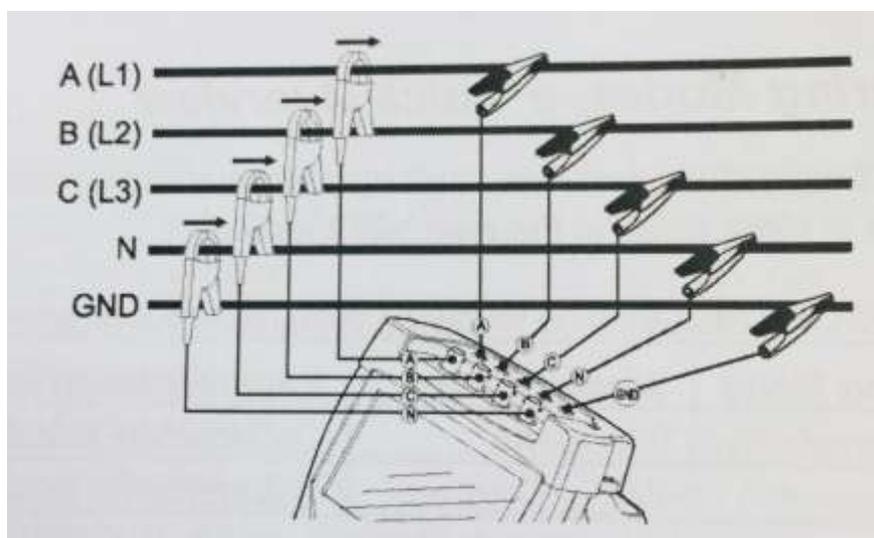
Al realizar la variación en la temperatura se pudo notar que cambia la potencia como se puede apreciar en la Tabla 12.

Figura 26. Analizador de redes eléctricas: a) pinzas amperimétricas, b) digitalizador.



Nota. Elaboración propia.

Figura 27. Conexión del analizador de redes eléctricas



Nota. Instructivo FLUKE

Tabla 12. *Variación de potencia con respecto a la temperatura*

Temperatura	Potencia Total
150 °C	8.7 KW
250 °C	8.8 KW
350 °C	8,9 KW

Nota. Elaboración propia.

Las curvas y capturas de los datos de medición se adjuntan en el anexo K.

4.3 Ventajas y Desventajas del sistema

Entre las principales ventajas al construir un reactor eléctrico para producción de biochar, se tienen:

- Omitir el uso de combustibles fósiles
- Reducir la contaminación al medio ambiente
- Optimización de tiempo de producción
- Producción de biocarbon para reparación productiva del suelo
- Uso de residuos agrícolas como materia prima
- Diseño para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica
- Portátil y de fácil maniobrabilidad
- Fácil programación y variación del valor de temperatura

Desventajas

- Consumo eléctrico
- Bajas cantidades de producción
- Perdidas térmicas por falta de aislamiento

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

En conclusión, al diseñar y construir del reactor eléctrico se pudo obtener biochar de una manera amigable con el medio ambiente.

Para verificar el correcto funcionamiento del reactor se procedió hacer pruebas con variaciones de tiempo y temperatura las cuales sirven para elegir el proceso de pirolisis eficaz, capaz de optimizar el tiempo y mejorar la producción de biochar.

En base al diseño se logró construir las niquelinas con la forma y características necesarias y adecuadas para el buen funcionamiento del reactor.

Al realizar las pruebas, se pudo verificar que la prueba 6 es la favorable, ya que se optimiza tiempo y se tiene los resultados deseados.

Se diseñó y se calculó el número de paneles fotovoltaicos necesarios para alimentar el reactor eléctrico, siendo este un estudio futuro el cual será el aprovechamiento de las energías renovables.

Se logró evaluar el comportamiento del sistema realizado mediciones de parámetros de operación los cuales se logró evidenciar están debidamente balanceados.

Con respecto al consumo eléctrico se pudo verificar que el equipo para su funcionamiento tiene un consumo de 8.9Kv.

Al realizar los cálculos y obtener los parámetros necesarios para el dimensionamiento de paneles se procedió a simular el sistema en el programa PVsyst donde dicho software calcula el número de paneles solares y el número de filas para su

conexión. Esto dependiendo de los valores y características de operación del tipo de paneles y el inversor seleccionado.

5.2 Recomendaciones

Cuando se vaya a utilizar el reactor es importante leer el instructivo de uso que se muestra en el anexo J para así estar al tanto de los riesgos que genera el reactor al momento de su operación y evitar accidentes tanto humanos como materiales.

El presente proyecto es el comienzo para futuras investigaciones, en donde se pueda mejorar el proceso de pirolisis como también la obtención de biochar.

Se recomienda mejorar el sistema de control, utilizando un sistema amortiguado evitando los picos generados al momento de conexión y desconexión ya que el sistema utilizado es de tipo ON/OFF que conecta y desconecta el sistema de calentamiento.

Al realizar el diseño y dimensionamiento de alimentación del reactor por energía solar fotovoltaica se debe tomar en cuenta un rango de 1.3 de sobre dimensionamiento por perdidas, como también realizar los cálculos y simulaciones tomando en cuenta los datos de radiación solar de la ciudad y así tener valores con los cuales se pueda dimensionar el sistema, empezando por los valores de los meses de menor radiación solar.

6. Referencias

- Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A., & Rezaei, F. (2017). Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technology*, 5, 834–849.
<https://doi.org/10.1002/ente.201600747>
- Axelsson, L., Franzén, M., Ostwald, M., Berndes, G., Lakshmi, G., & Ravindranath, N. H. (2012). Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256.
<https://doi.org/10.1002/bbb>
- Barros, A., Nascimento, D., & Aguiar, C. (2018). Economic Feasibility Study of Photovoltaic Panels Installation by PVsyst 6.73 Simulator. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5, 154–162.
<https://doi.org/10.22161/ijaers.5.9.18>
- Brassard, P., & Raghavan, V. (2017). *ScienceDirect Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production : A review. 1.*
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020>
- Brick, S., Lehmann, J., & Kramer, J. (2010). *Biochar : Assessing the Promise and Risks To Guide U . S . Policy Author. November.*
- Cámara de la construcción de Quito. (2011). Norma Ecuatoriana De Construcción, Nec - 11. *Capítulo 14 Energías Renovables*, 110.
- Capital, C. L. (n.d.). *Highlights from this Month ' s News Welcome to Our New Corporate Members ...*
- Chan, Y. H., Cheah, K. W., How, B. S., Loy, A. C. M., Shahbaz, M., Singh, H. K. G., Yusuf, N. R., Shuhaili, A. F. A., Yusup, S., Ghani, W. A. W. A. K., Rambli, J.,

- Kansha, Y., Lam, H. L., Hong, B. H., & Ngan, S. L. (2019). An overview of biomass thermochemical conversion technologies in Malaysia. *Science of the Total Environment*, 680(May), 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.211>
- Dincer, I. (2000). *Renewable energy and sustainable development : a crucial review*. 4, 157–175.
- Elum, Z., & Momodu, A. (2017). Climate change mitigation and renewable energy for sustainable development in Nigeria: A discourse approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.040>
- Gonçalves, P., Sampaio, V., Orestes, M., & González, A. (2017). *Photovoltaic solar energy : Conceptual framework*. 74(December 2016), 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- Hamedani, S. R., Kuppens, T., Malina, R., Bocci, E., Colantoni, A., & Villarini, M. (2019). *Life Cycle Assessment and Environmental Valuation of Biochar Production : Two Case Studies in Belgium*. 1, 1–21.
- Jakub, E. M. (n.d.). *BIOCHAR AS AN ECO-ADDITION IN WASTEWATER AND WASTEWATER SLUDGE TREATMENT PROCESSES IN NON-URBAN- IZED AREAS*. <https://doi.org/10.35603/eps2019/issue2.01>
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). *Solar energy for future world : - A review*. 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- Li, J., Dai, J., Liu, G., Zhang, H., Gao, Z., Fu, J., & He, Y. (2016). Biomass and Bioenergy Biochar from microwave pyrolysis of biomass : A review. *Biomass and Bioenergy*, 94, 228–244. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.010>
- Li, S., & Chen, G. (2018). Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral

characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. *Waste Management*, 78, 198–207.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.048>

Matute, A. (2020). *Guía didáctica para la implementación de medidas basadas en eficiencia energética en viviendas de tipo unifamiliar, para profesionales sin conocimientos técnicos en el área energética*. Universidad Católica de Cuenca.

May, O., Engineering, C., Hampshire, N., Way, A., Nh, D., Engineering, B., Mall, C., Engineering, M., Mall, C., Engineering, M., Grande, R., Division, B., & Science, M. (2016). *Conversion of Pistachio Nutshell Biomass to Biofuels and Activated Biochars via Pyrolysis*.

Narzari, R., Bordoloi, N., Chutia, R. S., & Borkotoki, B. (2015). *Chapter 2- Biochar : An Overview on its Production , Properties and Potential Benefits*. September. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3966.2560>

Narzari, R., Bordoloi, N., Sarma, B., Gogoi, L., Gogoi, N., Borkotoki, B., & Kataki, R. (2017). Fabrication of biochars obtained from valorization of biowaste and evaluation of its physicochemical properties. *Bioresource Technology*, 242, 324–328. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.050>

Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., & Lu, H. (2017). Environmental application of biochar : Current status and perspectives *Bioresource Technology* Environmental application of biochar : Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, February 2018, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.122>

Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>

Slopiecka, K., Bartocci, P., & Fantozzi, F. (2012). Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. *Applied Energy*, *97*, 491–497.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.056>

Szulejko, J. E., Kumar, P., Deep, A., & Kim, K. (2017). Global warming projections to 2100 using simple CO₂ greenhouse gas modeling and comments on CO₂ climate sensitivity factor. *Atmospheric Pollution Research*, *8*(1), 136–140.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.08.002>

Vilches, E. (2013). *El contactor Ventajas*. 1–22.

White, J. E., Catallo, W. J., & Legendre, B. L. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *91*(1), 1–33.

<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.004>

Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2015). Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(9), 939–969.

<https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>

Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, *45*(5), 651–671.

[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8)

Bricos. (2021). *BRICOS*. Retrieved from <https://bricos.com/2013/03/interruptores-electricos-clasificacion-y-componentes/>

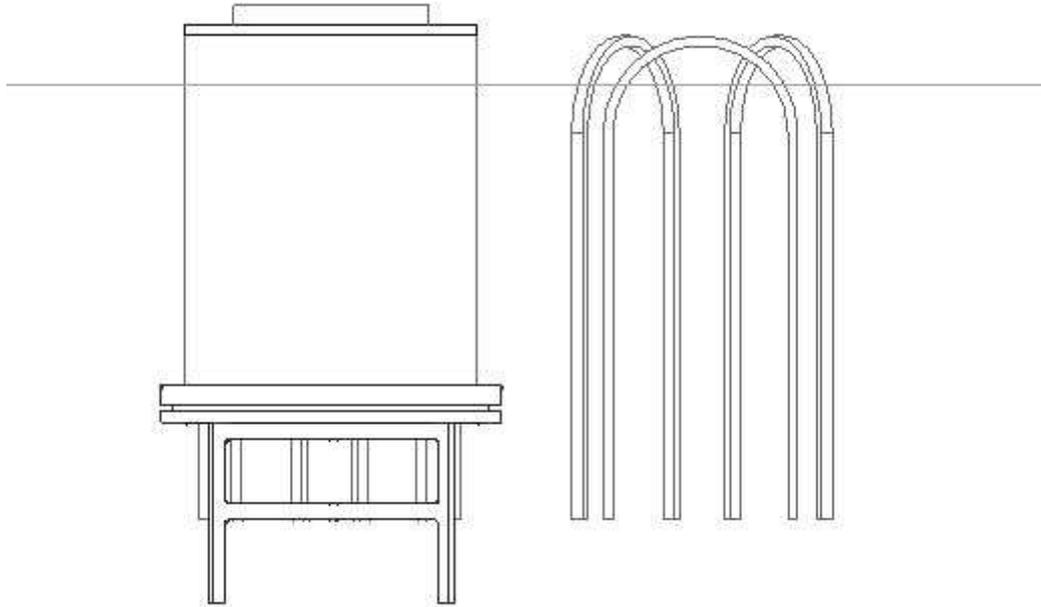
- Gonzaga, M. I. (2017). Pyrolysis methods impact biosolids-derived biochar composition. *SCIENCE DIRECT*, 25.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A., & Kim, K. .. (2018). Solar energy Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 30.
- Imaguer Galván, G., & Rodríguez, A. (2017). DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DEGRADACIÓN TÉRMICA SOLAR DE BIOMASA(PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN). *Jovenes en la Ciencia*, 2246-2250.
- M., P. (2009). Agricultural bio-char production. *western power Australia*, 129.
- Negron, F. C. (2018). ANÁLISIS ENERGÉTICO PARA EL DISEÑO DE UN HORNO INCINERADOR SOBRE LOS 1200 GRADOS CELSIUS. *Tesis*, UNIVERSIDAD SAN AGUSTIN DE AREQUIPA.
- PNUD. (2020). PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. *ACCION POR EL CLIMA*, 30.
- Shamim, M. (2015). Producción de biocarbón para aplicación al suelo: un estudio comparativo de tres modelos de horno. *ELSEVIER*.
- Souradeep, G. (2018). Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. *ELSEVIER*.
- USBI. (2020). USBI BIOCHAR INITIATIVE. *USBI*.
- Valdez, M. (2012). PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE DE TERCERA GENERACIÓN, BIOACEITE, BIOGAS Y CARBÓN A PARTIR DE UNA PIRÓLISIS SOLAR. *TESIS*.

7. Anexos

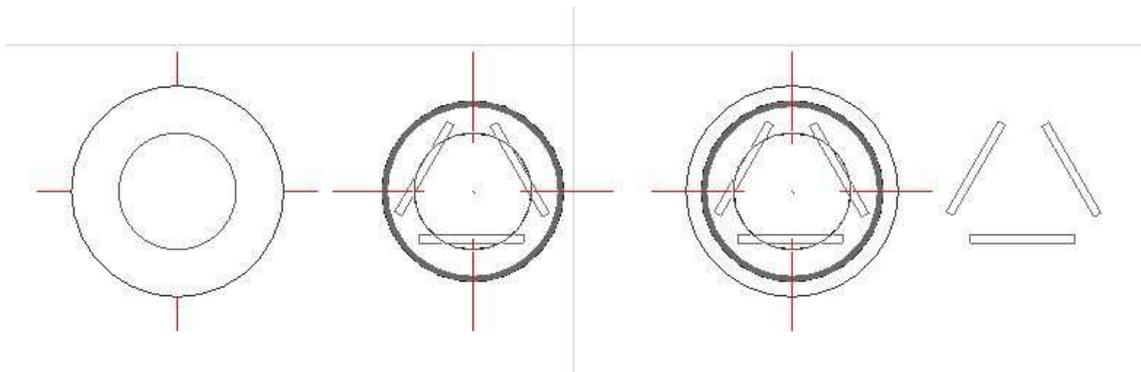
ANEXO A

Figura 28. *Diseño del reactor eléctrico y diseño de las niquelinas*

(a) Vista lateral

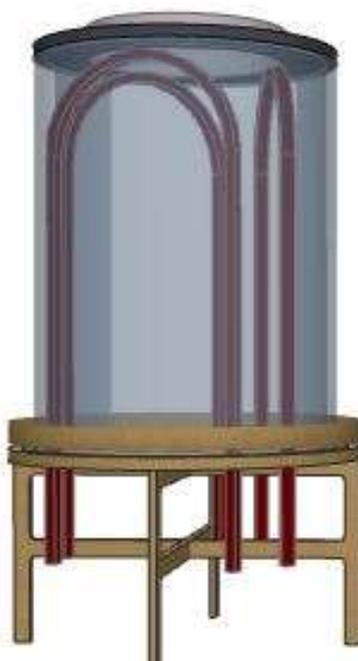


(b) Vista superior



Nota. Elaboración propia.

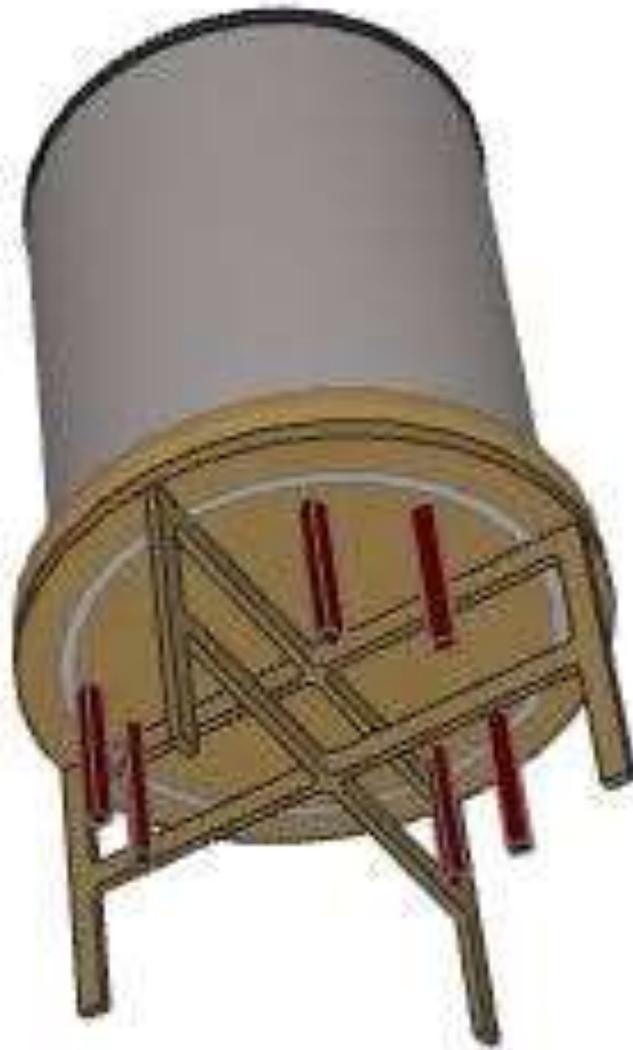
ANEXO B

Figura 29. *Diseño de las partes del reactor Eléctrico***Figura 30.** *Diseño del reactor ensamblado*

Nota. Elaboración propia.

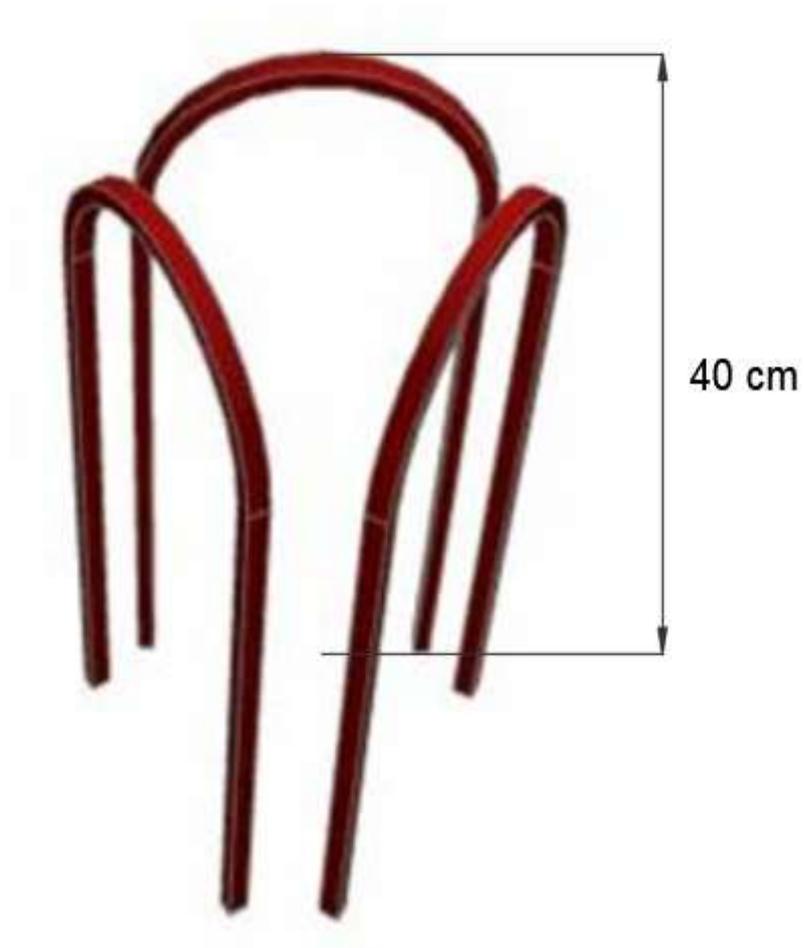
ANEXO C

Figura 31. *Diseño de la base que eleva al reactor*



Nota. Elaboración propia.

ANEXO D

Figura 32. *Diseño y dimensionamiento de las Niquelinas*

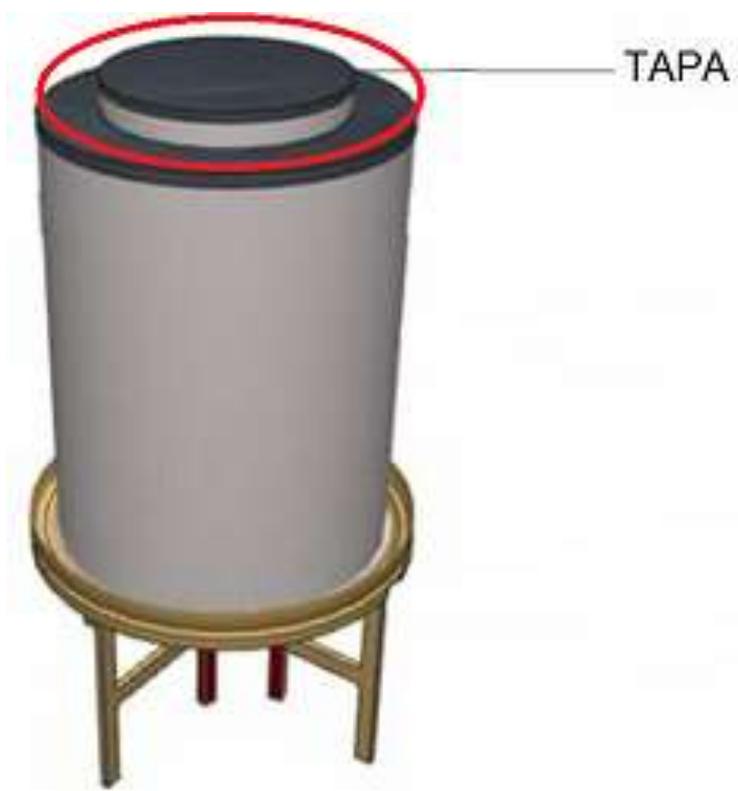
Nota. Elaboración propia.

ANEXO E**Figura 33.** *Diseño de la ubicación y sujeción de las niquelinas dentro del reactor*

Nota. Elaboración propia.

ANEXO F

Figura 34. *Diseño y ubicación de la tapa del Reactor*



Nota. Elaboración propia.

ANEXO G

Cálculo del espesor del cilindro mediante la normativa del acero ASTM A36.

El espesor se calcula mediante las propiedades del acero ASTM A36 y para su cálculo se utiliza la ecuación:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

$$550 \text{ }^\circ\text{C es de } 2640 \text{ kg/cm}^2 - 259 \text{ MPa}$$

$$t = \frac{(0,3 \text{ MPa}) (155 \text{ mm})}{(259 \text{ MPa}) (0,8) - 0,6(0,3 \text{ MPa})} = 0,03 \text{ m}$$

ANEXO H

Figura 35. *Construcción de las niquelinas*



Nota. Elaboración propia.

Figura 36. *Sujeción de las niquelinas en el recipiente*



Nota. Elaboración propia.

ANEXO I

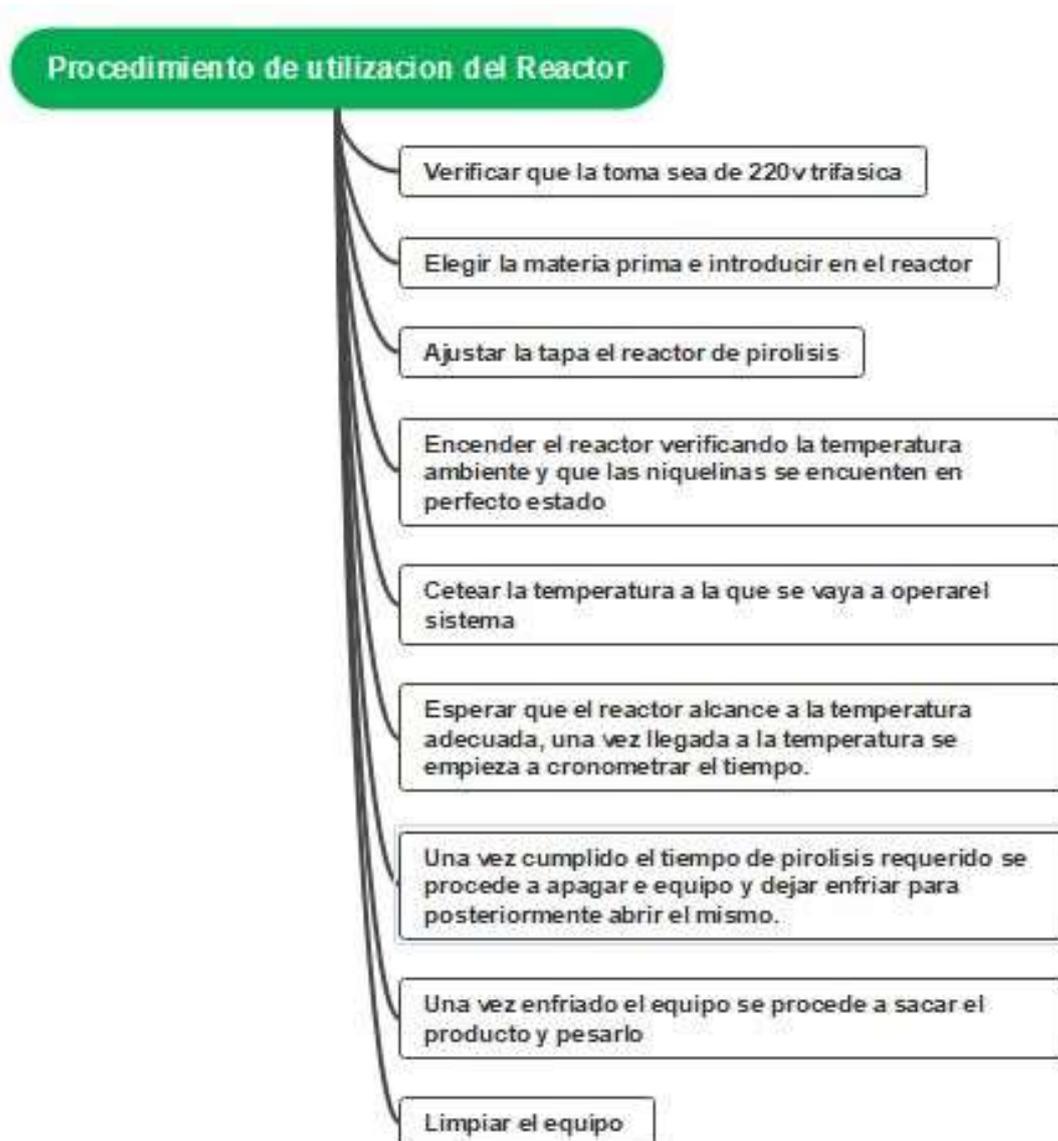
Figura 37. *Ubicación de la biomasa en el interior del reactor*



Nota. Elaboración propia.

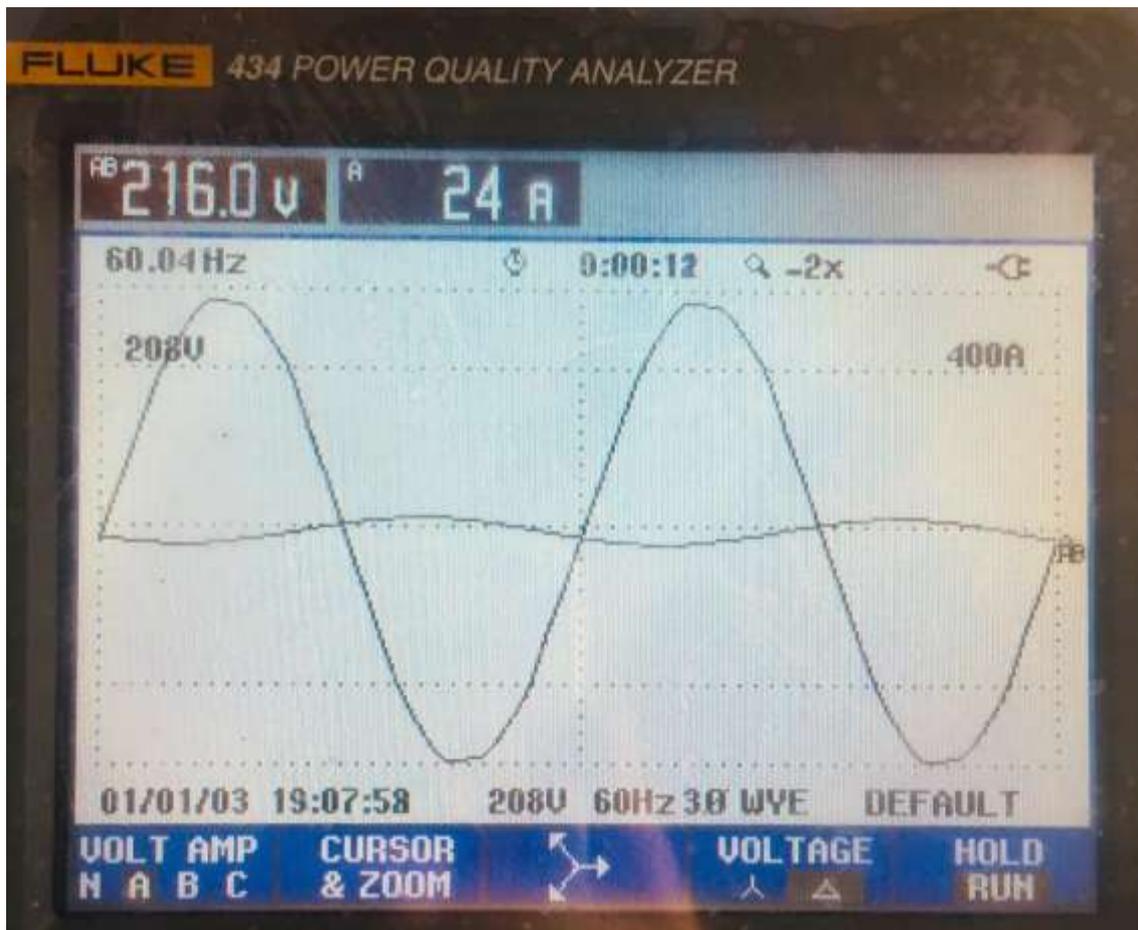
ANEXO J

Manual de uso del reactor eléctrico



ANEXO K

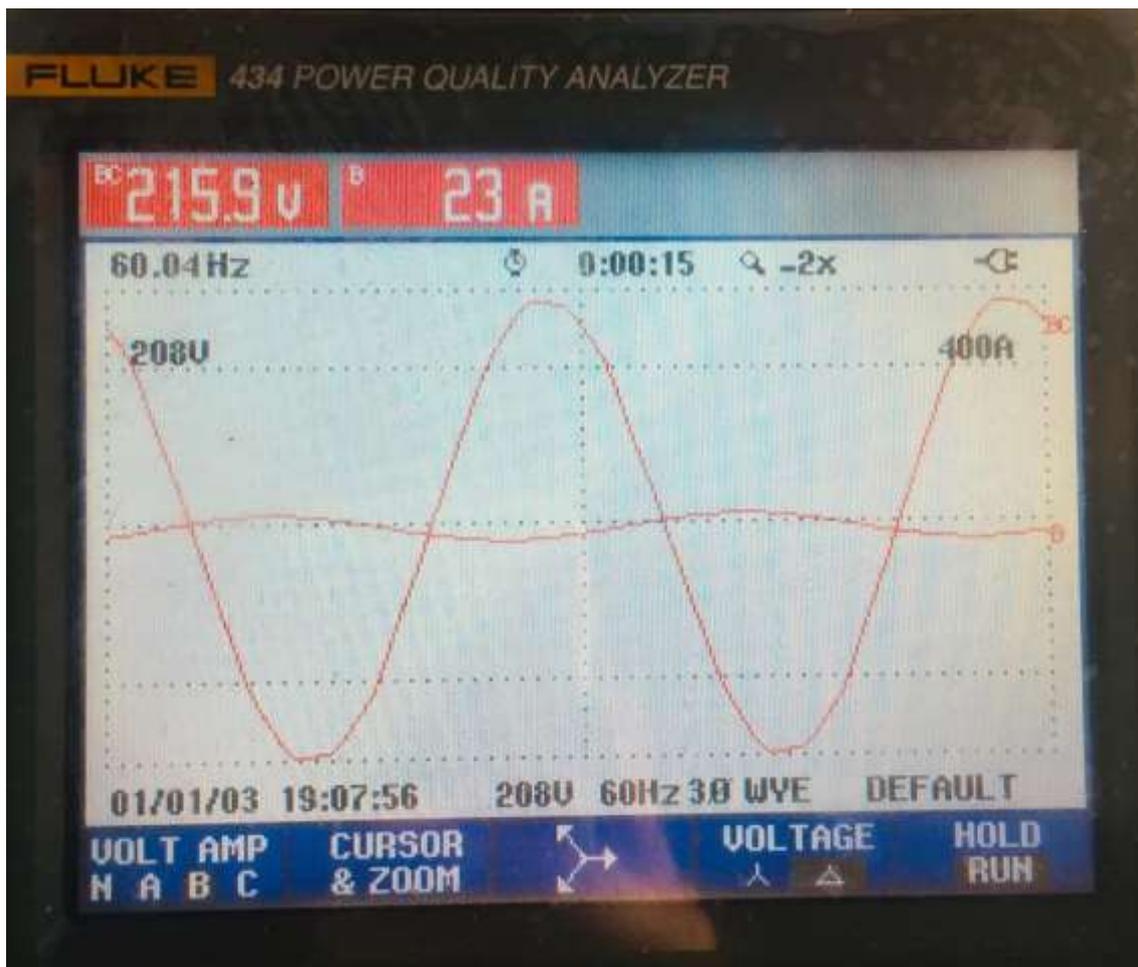
Figura 38. Medición de Voltajes y Corrientes de la fase A del sistema



Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el voltaje y la corriente de la fase A tiene los valores 216v y 24A, estas mediciones fueron hechas con el reactor funcionando.

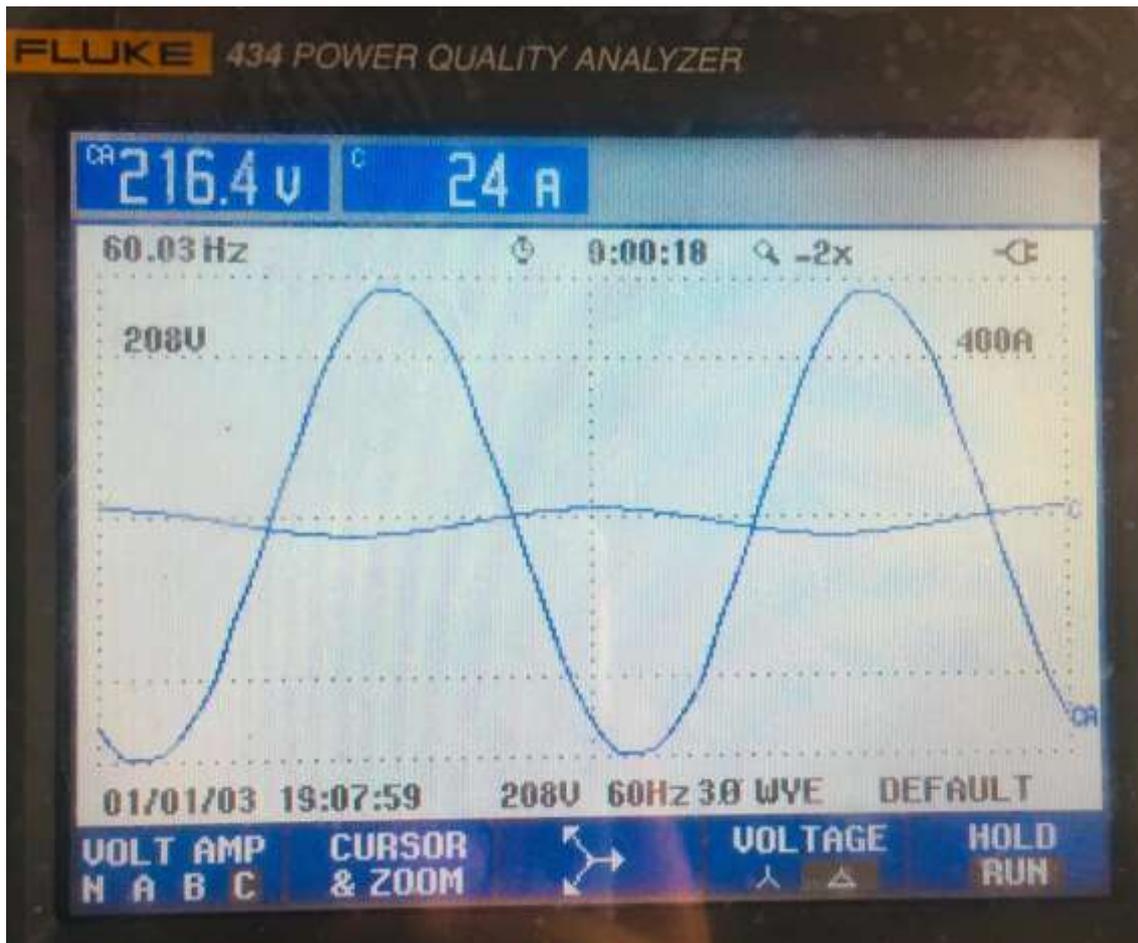
Figura 39. Medición de Voltajes y Corrientes de la fase B del sistema



Nota. Elaboración propia.

Se puede apreciar que el voltaje y la corriente de la fase B tiene los valores 215.9v y 23A, estas mediciones fueron hechas con el reactor funcionando.

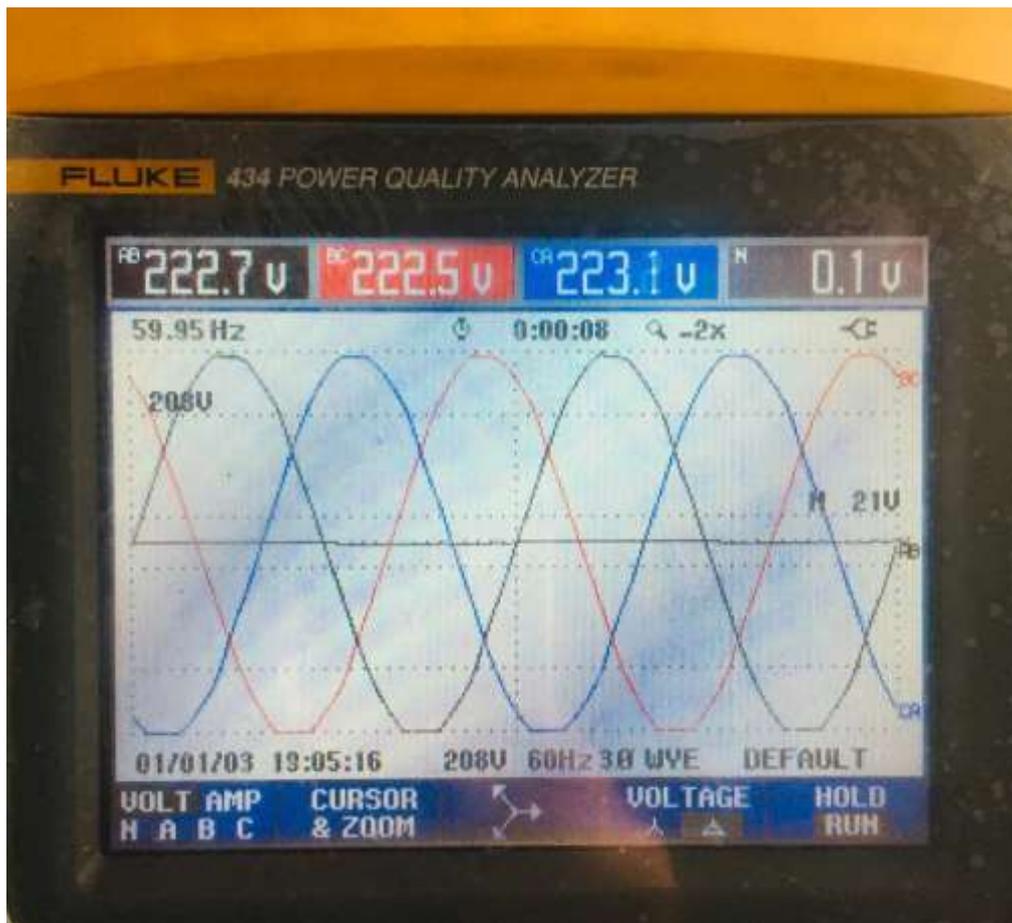
Figura 40. Medición de Voltajes y Corrientes de la fase C del sistema



Nota. Elaboración propia.

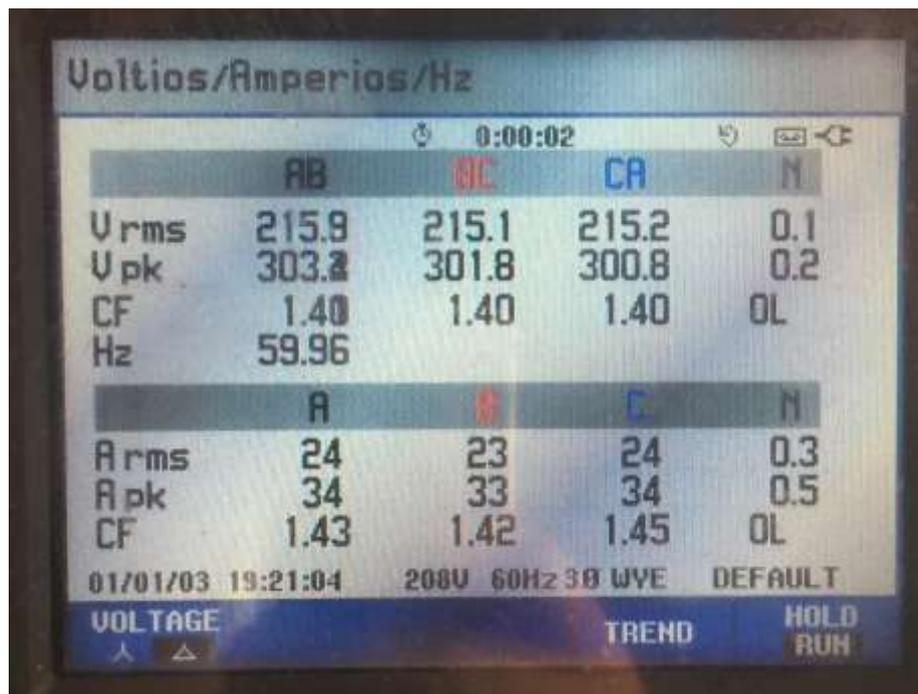
Se puede apreciar que el voltaje y la corriente de la fase C tiene los valores 216.4v y 24A, estas mediciones fueron hechas con el reactor funcionando.

Figura 41. Representación gráfica de las curvas de voltaje del sistema funcionando.



Nota. Elaboración propia.

Figura 42. Datos obtenidos de las fases del sistema



Nota. Elaboración propia.

Figura 43. Potencia del sistema representada en kW al funcionar a 200 grados



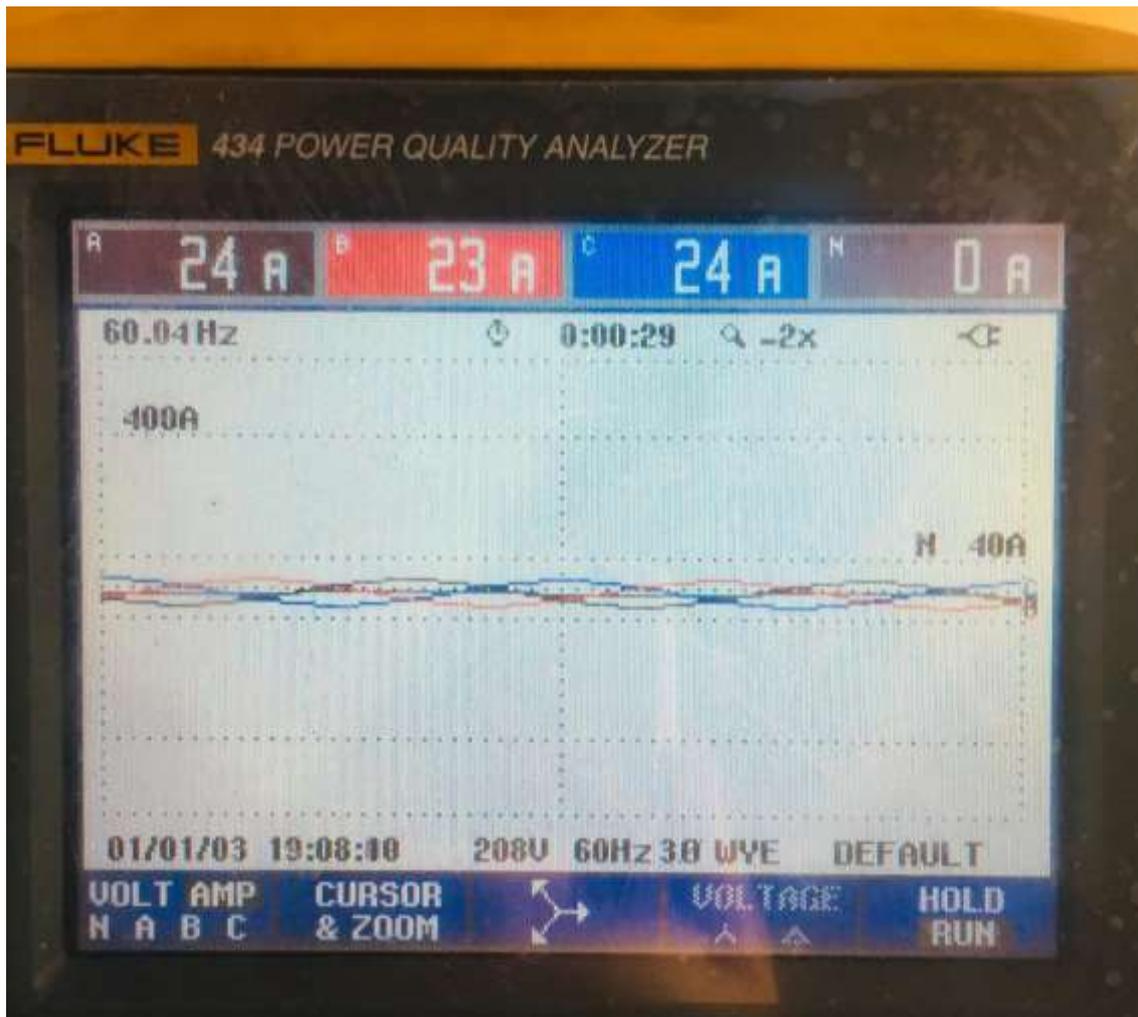
Nota. Elaboración propia.

Figura 44. Potencia Trifasica del sistema representada en kW al funcionar a 350 grados.



Nota. Elaboración propia,

Figura 45. Representación gráfica de las curvas de corriente de cada fase



Nota. Elaboración propia.

ANEXO L

Figura 46. *Peso de la materia prima antes del proceso de pirolisis*



Nota. Elaboración propia.

El peso de la materia prima más la base de madera que se utilizó para para la mejor ubicación de las ramas es de 1700 en gramos.

Se procede a restar el peso de la madera de la base que es 400 gramos, se tiene un peso de 1300 gramos absolutos de materia para generar el biochar.

Figura 47. *Peso de la materia prima despues del proceso de pirolisis.*



Nota. Elaboración propia.

El peso de las ramas de ciprés luego del proceso de pirolisis más la base de madera es de 701g, a esto le restamos el peso de la base que es 400g y como resultado final se tiene 301g de biochar.

ANEXO M

Cálculo de Potencia Trifásica del sistema

Para el cálculo de potencia se utiliza la ecuación:

$$P = \frac{\sqrt{3}VICos\varphi}{1000}$$

Dónde:

$$V = 220v$$

$$I = 24 A$$

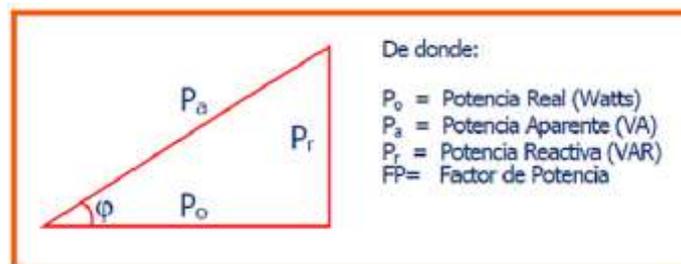
$$Cos\varphi = 0.86$$

$$P = \frac{\sqrt{3}VICos\varphi}{1000} = \frac{\sqrt{3}(220)(24)(0.86)}{1000} = 8900 W$$

El valor de potencia es 8900 W W

Al trabajar con resistencia eléctricas se puede apreciar que la potencia es netamente resistiva esto ya que no se tiene resistencia reactiva ni impedancias esto se puede apreciar en el triángulo de potencias de la Figura 45.

Figura 48. Triangulo de potencias.



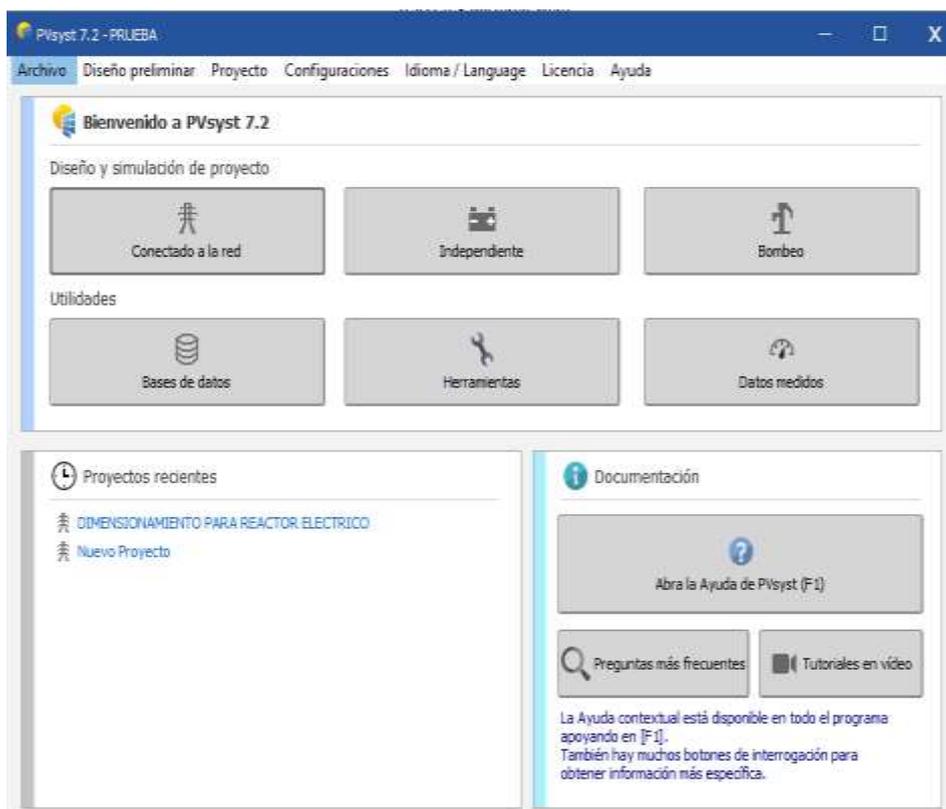
Nota. Elaboración propia.

ANEXO N

Mediante el software PVsyst 7.2 se procedió hacer la simulación del sistema solar fotovoltaico de la siguiente manera:

Para el tipo de proyecto se procede a trabajar con la opción que nos da de conectado a la red, no se puede trabajar con independiente porque ese es para uso residencial y el sistema se simula con baterías.

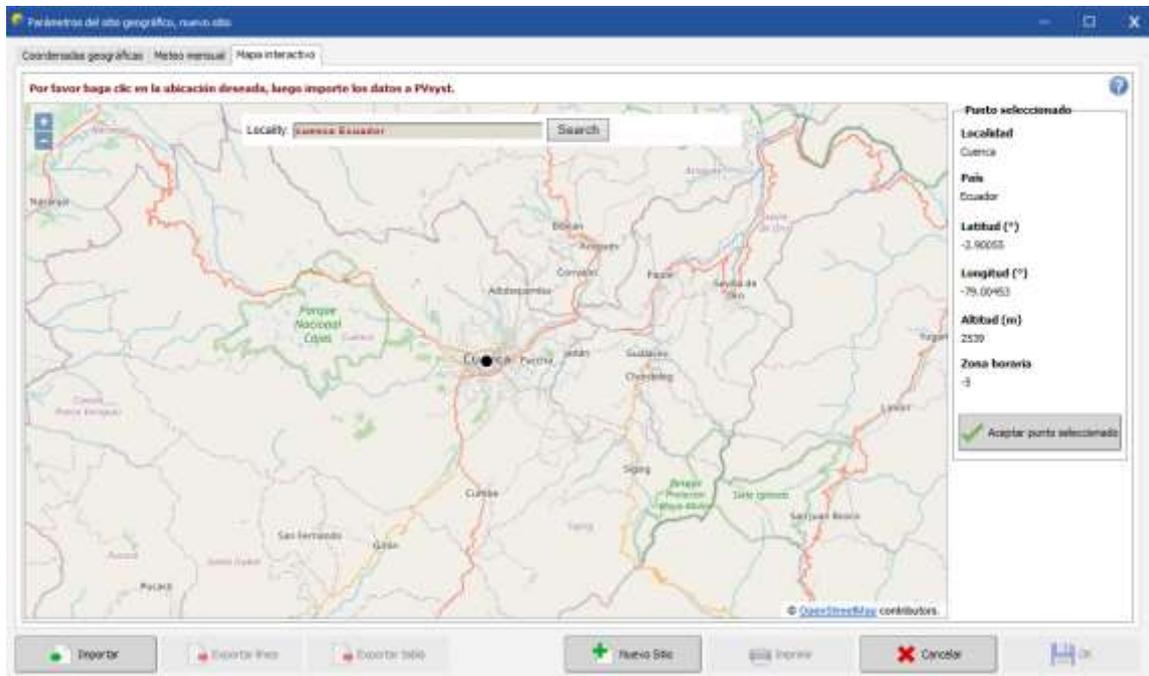
Figura 49. Selección del tipo de Proyecto.



Nota. Elaboración propia obtenido mediante PVsyst.

El software tiene la opción de selección de País, región y ciudad que se desea trabajar ya que tiene georreferencias satelitales, estas son precisas ya que brinda datos como latitud, longitud, altura del lugar del proyecto.

Figura 50. Ubicación geográfica del País, región, ciudad del Proyecto.



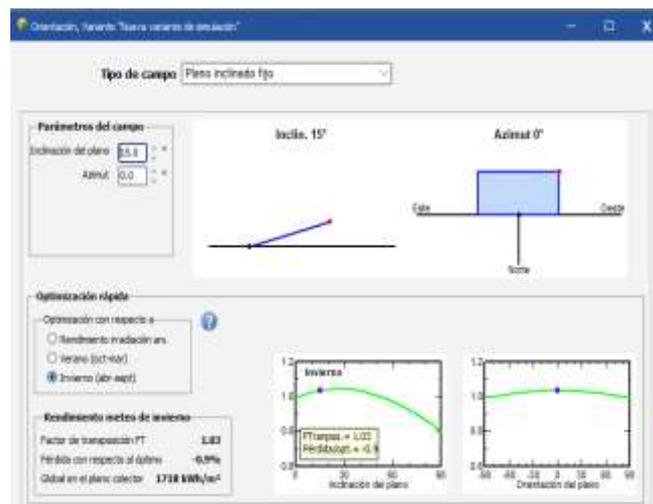
Nota. Elaboración propia, obtenido mediante PVsyst.

La ubicación de paneles solares es sumamente importante para el correcto aprovechamiento de radiación solar.

En la normativa Ecuatoriana de Construcción NEC-11 de Energías Renovables, se recomienda el ángulo de inclinación del panel solar sea de hasta $\beta = 15^\circ$ para aprovechar la mayor cantidad de energía solar durante el año como también evita acumulación de polvo y basura en los paneles solares, de tal manera que ayuda a los sistemas solares a auto-limpiarse con la lluvia.

Con dichas observaciones se digito el Angulo de inclinación de 15° del panel con la dirección norte y seleccionando la opción que el sistema simule con datos de meses de invierno es decir los meses con baja radiación solar.

Figura 51. *Parámetros de ubicación de los paneles solares.*



Nota. Elaboración propia. obtenido mediante PVsyst.

El software tiene la opción de selección de paneles solares de diferentes marcas y características, para el proyecto se utilizó un panel solar de 400W a 40V y 10 A.

De igual manera el inversor trifásico de una potencia de 15KW.

Figura 52. Selección de tipo de panel y tipo de inversor

Definición del sistema de red, Variante VCO: "Nueva variante de simulación"

Subconjunto

Nombre y orientación del subconjunto
 Nombre: Conjunto FV
 Oriente: Plano inclinado fijo
 Inclinación: 15°
 Azimut: 1°

Ayuda de pre-dimensionamiento
 Sin dimensionamiento
 Ingrese potencia planeada: 9.0 kWp
 Redimens. ... o área disponible(módulos): 45 m²

Seleccione el módulo FV
 Disponible ahora: Filtro: Todos los módulos F Módulos necesarios aprox. 22
 Trina Solar 400 Wp 35V Si-mono TSM-DEG15H-20-(II)-400 Desde 2020 Datasheets 2020
 Usar optimizador
 Voltajes de dimensionamiento: Vmpp (60°C) 35.9 V
 Voc (-10°C) 55.7 V

Seleccione el inversor
 Disponible ahora: Voltaje de salida 400 V Tri 50Hz 50 Hz 60 Hz
 SolarEdge 15 kW Fixed 750 V TL 50/60 Hz SE15K-AUS Desde 2018
 Núm. de inversores: 1 Voltaje de funcionamiento: 750-750 V Poder global inversor: 15.0 kWca
 Voltaje máximo de entrada: 950 V **Arquitectura SolarEdge**

Diseñe el conjunto

Núm. de módulos y cadenas
 Mód. en serie: 5
 Núm. de cadenas: 5
 Pérdida sobrecarga: 0.0 %
 Proporción Pnom: 0.67

Condiciones de operación
 Vmpp (60°C): 180 V
 Vmpp (20°C): 212 V
 Voc (-10°C): 279 V

Irradia. plano: 1000 W/m²
 Imp (STC): 48.4 A
 Isc (STC): 50.9 A
 Isc (en STC): 50.9 A

Este inversor SolarEdge solo se puede usar con los optimizadores de energía SolarEdge.
 Máx. en datos STC
 Potencia de funcionamiento máx.: 9.1 kW (en 1000 W/m² y 50°C)
Potencia nom. conjunto (STC) 10.0 kWp

Núm. de módulos: 25 Área: 51 m²

Nota. Elaboración propia. obtenido mediante PVsyst.

La simulación da como resultados el uso de 25 divididos en 5 filas cada una conectada 5 paneles en serie, capaces de generar hasta 10000W.

Figura 53. Resultados de la simulación

Resumen sistema global	
Núm. de módulos	25
Área del módulo	51 m²
Núm. de inversores	1
Potencia FV nominal	10.0 kWp
Potencia FV máxima	10.2 kWCC
Potencia de CA nominal	15.0 kWCA
Proporción Pnom	0.667

Nota. Elaboración propia. obtenido mediante PVsyst.

Figura 54. PVsyst configuración y ubicación de los conjuntos de paneles solares



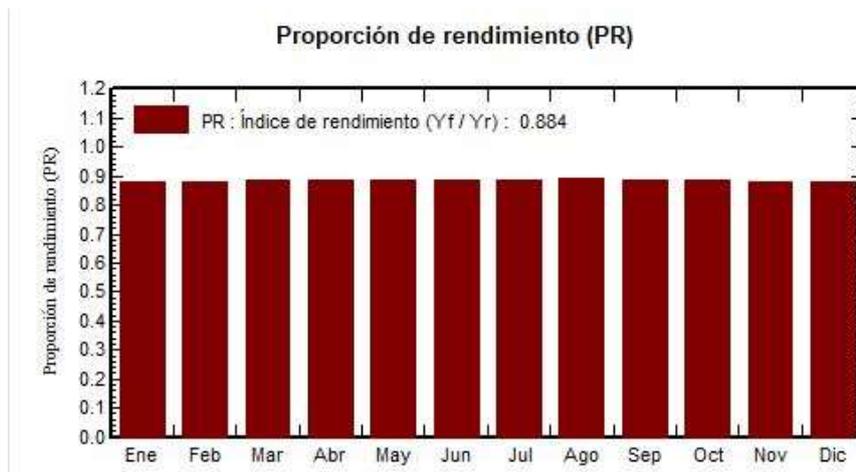
Nota. Elaboración propia. obtenido mediante PVsyst.



Nota. Elaboración propia. obtenido mediante PVsyst.

Como resultado de la simulación se puede apreciar el rendimiento del reactor el cual está en 80 por ciento de su capacidad total durante los 12 meses del año.

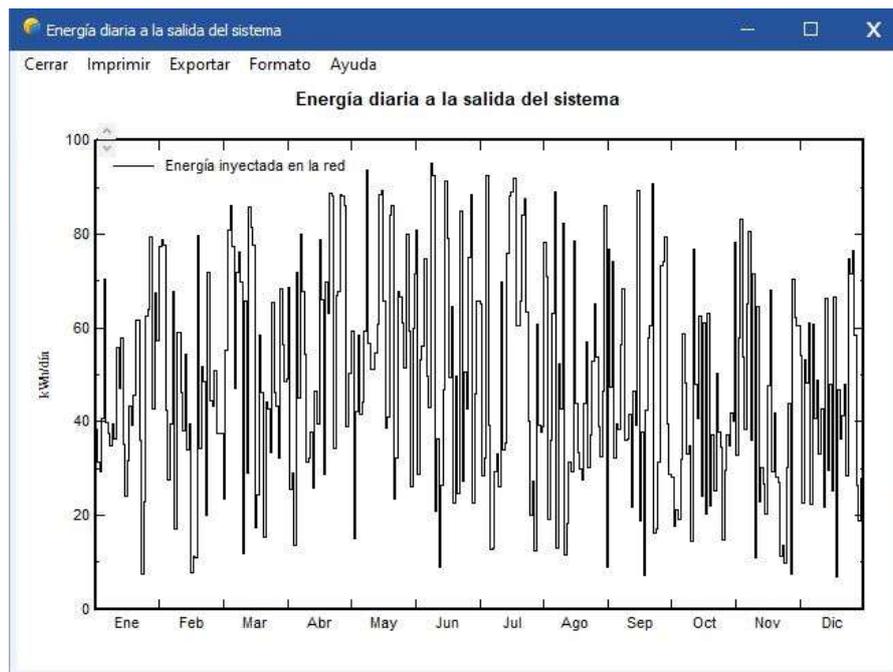
Figura 55. Rendimiento del sistema por mes.



Nota. Elaboración propia, obtenido mediante PVsyst.

En la figura 55 se puede apreciar el comportamiento del sistema dependiendo de la condición climática de cada mes.

Figura 56. Energía diaria de salida del sistema simulado



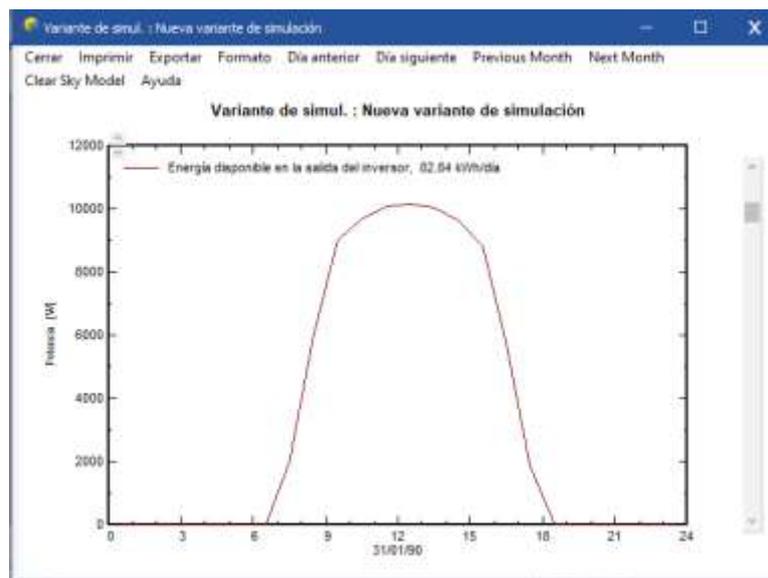
Nota. Elaboración propia, obtenido mediante PVsyst.

ANEXO O

La energía diaria suministrada por el inversor está relacionada a las horas de radiación solar en el día en la ciudad de Cuenca cómo se puede apreciar en la figura 57.

La curva empieza a ascender a partir de las 6 am, llega a su nivel más alto entre las 10 am hasta las 14 pm donde se empieza a notar que cada vez disminuye la radiación solar hasta llegar a 0 a las 18 pm.

Figura 57. Energía diaria de salida del inversor.



Nota. Elaboración propia, obtenido mediante PVsyst.

Se tiene proyectado ubicar los paneles solares en la Jefatura de Posgrado de la Universidad Católica de Cuenca, para aprovechar la mayor radiación solar, en las Figuras 58, 60 se puede apreciar la propuesta de ubicación de los paneles solares en la parte superior del pabellón de aulas diagonal al parqueadero.

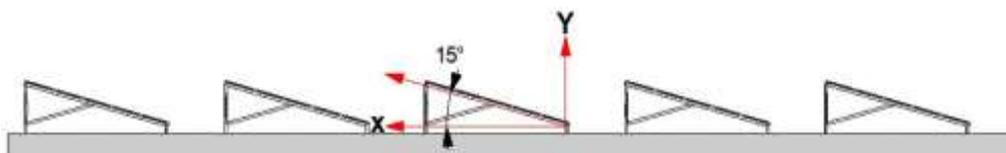
Figura 58. Diseño de la ubicación de los paneles solares en la facultad de Postgrados.



Nota. Elaboración propia.

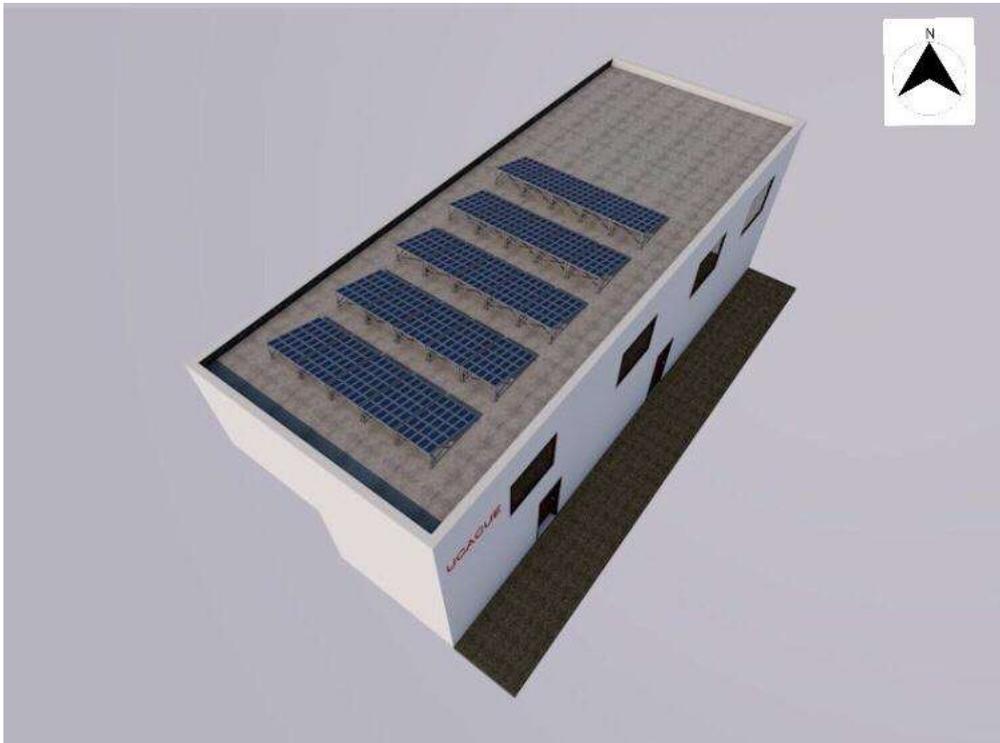
Es importante tomar en cuenta que la dirección y orientación de los paneles solares siempre tiene que ser con dirección al norte este para tener mayor radiación y por ende mayor eficiencia de los paneles.

Figura 59. Angulo de inclinación de paneles solares.



Nota. Elaboración propia.

Figura 60. Diseño de la ubicación de los paneles solares en la facultad de Postgrados.



Nota. Elaboración propia.

Yo, Carlos Andrés Sigüencia Ortiz portador de la cédula de ciudadanía N° 0302381843. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación titulada “Diseño y construcción de un reactor eléctrico de conversión de biomasa a biochar alimentado a través de energías renovables” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de Junio de 2021



F:

Carlos Andrés Sigüencia Ortiz

C.I. 0302381843