

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Producción y Caracterización de Biochar a partir de Biomasa residual
para el cultivo del hongo Trichoderma Harzianum**

Proyecto de Investigación

Carlos Julio Rosero Yela

Ingeniería Mecánica

**Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico**

Quito, 29 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Producción y Caracterización de Biochar a partir de
Biomasa residual para el cultivo del hongo *Trichoderma
Harzianum***

Carlos Julio Rosero Yela

Calificación:

--

Nombre del profesor, Título académico

Juan Sebastián Proaño, Ph.D.

Firma del profesor:

Quito, 29 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Carlos Julio Rosero Yela

Código: 00116477

Cédula de Identidad: 040183764-6

Lugar y fecha: Quito, mayo 29 de 2019

RESUMEN

El presente proyecto estuvo enfocado en la producción y caracterización de Biochar a partir de cascarilla de arroz, que es un residuo vegetal, la cual fue secada previamente para poder ser procesada mediante pirolisis lenta, con la finalidad de obtener en su mayoría carbón vegetal para el cultivo del hongo *Trichoderma Harzianum*. El Biochar como producto es muy versátil dado que presenta diversas aplicaciones como: enmienda de suelos y filtro de agua, por mencionar algunas. Sus propiedades son variadas dependiendo de las propiedades de su materia prima, es decir su origen y composición química que puede ser conocida a partir de un análisis Próximo. El equipo encargado para la producción paso por diversas etapas: diseño conceptual, en dónde se definen los sistemas tanto mecánicos como térmicos, en el diseño a detalle se realizaron análisis de esfuerzos con la finalidad de ver el comportamiento de la estructura bajo cargas, análisis térmicos con la finalidad de ver la distribución de temperaturas en la chimenea, DEM, para observar el proceso de mezclado, y finalmente la caracterización del producto bajo los estándares propuestos por IBI. El producto obtenido fue utilizado para la inoculación del hongo, lo cual permitió su crecimiento y producción de esporas, la importancia radica, en el hecho de que es capaz de crecer en la superficie porosa del Biochar, permitiendo obtener un sustrato de menor costo y mayor efectividad.

Palabras clave: *DEM, Caracterización; Trichoderma Harzianum, Biochar, Biomasa, Pirólisis.*

ABSTRACT

The present project was focused on the production and characterization of biochar from rice husk, which is a vegetable product, which is dried to be processed by slow pyrolysis, with the aim of obtaining in its vegetal vegetable product for the cultivation of *Trichoderma Harzianum* fungus. Biochar as a product is very versatile since the applications of its raw material are its origin and its chemical composition. Made based on a Next analysis. The team responsible for the production went through the various design activities such as the systems of mechanical systems such as thermal systems, the details, the results, the results, the results, the results. for the purpose of the distribution of the temperatures in the chimney, DEM, to observe the mixing process, and finally the characterization of the product under the standards proposed by IBI.

Keywords: *DEM, Characterization; Trichoderma Harzianum, Biochar, Biomass, Pyrolysis.*

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT.....	4
TABLA DE CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
Introducción	11
Métodos	20
Requerimientos Propuestos	20
Caracterización del Biochar	21
International Biochar Initiative (IBI)	22
Modelos Matemáticos que sustentan el Proceso	25
Elevadores o Lifter's.....	28
Selección del Motor	32
DESARROLLO DEL TEMA.....	36
Diseño Conceptual.....	37
Diseño al detalle	38
Selección de Materiales	38
Análisis de Esfuerzos.....	45
Selección de Elevadores.....	46
Elevador Recto-Ingresa del Material y Descarga	47
Elevador Inclinado- Ingresa del Material y Descarga.....	48

Elevador Circular Ingreso del Material y Descarga	48
Selección Sistema Motriz.....	52
Térmico.....	52
SEM.....	55
CONCLUSIONES	59
Bibliografía.....	61
Anexo A: Resolución.....	63
Anexo B: Construcción.....	65
Anexo C: Planos.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diferentes procesos de Pirolisis, con sus características. (Brewer, 2012).....	12
Tabla 2: Tipos de Biomasa, con su composición de Lignina, este análisis fue realizado en seco. Brown & Brown, 2003	13
Tabla 3: Propiedades relevantes que debe cumplir los materiales a utilizar dentro del proyecto.	38
Tabla 4: Requerimientos Adicionales, planteados por el interesado los cuales se consideran para el diseño CAD	41
Tabla 5: Alternativas planteadas por el método de ponderados.	43
Tabla 6: Condiciones del Análisis Estructural para Inventor, componente: bastidor.....	45
Tabla 7: Condiciones de trabajo dentro del software EDEM.....	47
Tabla 8: Resultado del análisis del rango de los elevadores.	48
Tabla 9: Método de Ponderados para la selección del elevador.....	50
Tabla 10: Resultados para seleccionar, un motor adecuado.....	52
Tabla 11: Mediciones realizadas, al equipo durante la prueba de producción de Biochar, 10 kg de biomasa, y 1h de proceso.....	54
Tabla 12: Cuantificación de elementos presentes en la muestra.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Interacción de los electrones con la materia dentro de SEM	17
Figura 2: Nivel al cual interactúan los diferentes rangos de electrones, dependiendo de la intensidad que tenga el electron gun.	18
Figura 3: Espectro de un material X, como ejemplo dónde se llega a notar los picos característicos se ve reflejado en la curvatura de los picos, algunos espurreos, y en la punta de cada uno el elemento al cual corresponden.	18
Figura 4: Se define como el modelo de contacto empleado para la simulaciones de elementos discretos, se utiliza este modelo para el cálculo de fuerzas, y deformaciones. De igual manera en el modelo se asume esferas sólidas (EDEM,s/f).	26
Figura 5: Tambor Rotatorio, con elevadores rectos, se llega a apreciar su posición, y función.	28
Figura 6: Diferentes geometrías de los elevadores comúnmente usados en secadores rotarios.	29
Figura 7: Se presenta el diseño de u elevador, asimismo los ángulos tato de posición angular, de cuña, y dimensiones de la raíz, labio	30
Figura 8: Determinación de los coeficientes C1,C2,C3 (Labahn, 1983)	34
Figura 9: Diagrama de Diseño establecido por Dixon, en donde se plantea una serie de conceptos aplicables a diferentes situaciones que se presentan a lo largo del proceso de Diseño (UNAM, s/f).	36
Figura 10: Diseño Conceptual del equipo a fabricar para la producción de Biochar, se llega a notar la parte mecánica, y térmica del mismo. Tanto la chimenea, el interior del tambor.....	37
Figura 11: Comportamiento de los materiales bajo cargas térmicas, de izquierda a derecha, relación del esfuerzo de fluencia, y último, ingenieril, deformación de los materiales en temperaturas mayores a 100°C (Budynas & Nisbett, 2012).....	39

Figura 12: División de los Sistemas de los cuales consta, el reactor a manufacturar. Fuente: Diseño Propio.	40
Figura 13: Reactor V1, se presenta el diseño inicial, el cual trabaja de forma manual, es decir se necesitan 2 operarios, 1 girando el reactor y el otro con la fuente de calor. Además, se muestra un corte transversal en dónde se observan los detalles destacados, parte superior la chimenea, con los cilindros cruzados. Parte inferior, los elevadores rectangulares.	41
Figura 14: Se muestra el soporte seleccionado para la Torcha, dónde en la izquierda se presenta la perspectiva del mismo, y en la derecha el agujero que donde se introduce el equipo.	42
Figura 15: Detalla de la tapa, en donde se llega a visualizar los seguros, tipo traba, aparte se nota el compartimiento en donde se aloja la fibra cerámica tal que aísla la parte superior a no superar la temperatura de 100°C.....	43
Figura 16: Se presenta el esquema del tercer cambio planteado, dónde se detalla el motor y su funcionamiento.	44
Figura 17: Reactor Biochar, con los cambios, vista isométrica.	45
Figura 18: De derecha a izquierda, se llega a apreciar las restricciones impuestas en el modelo para el análisis estructural, de igual manera los resultados del estudio en dónde se destaca que el esfuerzo máximo es de 64.04MPa, en las juntas de las patas de la estructura, a la derecha.	46
Figura 19: De izquierda a derecha, elevadores circular, inclinado, y recto. Cada uno tiene las mismas dimensiones, es decir el circular posee 10[cm] de diámetro, mientras que el recto posee 10 de labio, y 3 de cuña, el inclinado posee 10 de cuña y 1 de labio.....	46
Figura 20: Elevadores rectos, ingreso del material, punto de carga máxima, y descarga. Se aprecia para el elevador recto, utilizando EDEM.	47
Figura 21: Elevadores inclinados, ingreso del material, punto de carga máxima, y descarga. Se aprecia para el elevador inclinado, utilizando EDEM.....	48

Figura 22: Elevadores circulares, ingreso del material, punto de carga máxima, y descarga. Se aprecia para el elevador circular, utilizando EDEM.	48
Figura 23: Distribución de la velocidad de las diferentes partículas, con las cuales tuvo interacción el tambor rotatorio-Elevadores Rectos. Se llega a apreciar el número de partículas, con su velocidad respectiva en m/s.	49
Figura 24: Distribución de la velocidad de las diferentes partículas, con las cuales tuvo interacción el tambor rotatorio-Elevadores Inclinaados. Se llega a apreciar el número de partículas, con su velocidad respectiva en m/s.	49
Figura 25: Distribución de la velocidad de las diferentes partículas, con las cuales tuvo interacción el tambor rotatorio-Elevadores Circulares. Se llega a apreciar el número de partículas, con su velocidad respectiva en m/s.	50
Figura 26: Resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo matemático dentro del paquete informático Matlab.	51
Figura 27: Resultados de Simulación en estado estable para la chimenea.	53
Figura 28: Esquema que muestra los puntos en los cuales se llevó el registro de temperaturas durante el proceso, y a la derecha se ve la pila del producto obtenido al finalizar el mismo, la temperatura fue de 330°C.	54
Figura 29: De izquierda a derecha, se llega a observar la porosidad superficial del Biochar producido dentro del reactor, con 10kv de carga, 1h de proceso, y 3.3rpm. En cada imagen se nota las condiciones de trabajo del equipo, SEM, cabe mencionar que tanto 5kV, y 10kV, son de para análisis superficiales la última es muestra del producto convencional.	55
Figura 30: Primeras cepas cultivadas en la superficie del producto, Biochar, se las llega a notar dispersas a las cepas de forma uniforme.	56
Figura 31: Espectro dónde se observan los picos de los elementos detectados en la muestra, se observan elementos que están en cantidades mayores al 1%, debido al detector.	57

Introducción

La Sierra ecuatoriana se ha caracterizado por tener un relieve homogéneo, gran variedad de climas, y suelos; en su mayoría son Andosoles, es decir son ricos en ceniza volcánica, y recursos minerales (Calvache Ulloa, 2016). Por otra parte, diferentes factores tanto bióticos: prácticas humanas, monocultivos, entre otros; abióticos: clima, fertilizantes; provocan que el suelo pierda su capacidad para producir cultivos de calidad. Además, entre los problemas identificados dentro de la Sierra están: deslizamientos por movimientos de masa, erosión eólica e hídrica, cangahua aflorante (10cm), y sub-aflorante (>20 cm), sequía alta, baja, y media, labranzas en laderas, y expansión de la frontera agrícola (Ministerio de Agricultura, 2017). Además de impactar la producción de los diferentes productos agrícolas, en el suelo, incrementan los residuos vegetales que por las prácticas convencionales son quemados en campo abierto liberando gases de efecto invernadero a la atmósfera, fomentando el calentamiento global y el cambio climático.

El biochar o *Carbón vegetal* es un producto sólido del procesamiento termo-químico de la biomasa, denominado Pirólisis, el cual se da en ausencia parcial o total de oxígeno (Peterson, Jackson, Kim, & Palmquist, 2012). También se lo conoce dentro de la comunidad científica como *Carbon Negative* porque durante el proceso de pirolisis no se libera el Carbon que posee planta en su estructura, sino que se lo transforma en un producto sólido como es el Biochar (Yargicoglu, Sadasivam, Reddy, & Spokas, 2015a). El biochar trae beneficios para los suelos con baja actividad microbiana, poca humedad, y baja capacidad para retener agua, este tipo de suelos son los que se encuentran en la Sierra ecuatoriana. Por lo cual, el biochar como enmienda de los suelos permite retener la humedad dentro de los suelos erosionados con poca vegetación alrededor, asimismo la porosidad que posee el producto incrementa la areación del mismo y en combinación con residuos orgánicos como el compost fomenta la actividad

microbiana, permitiendo el suelo tenga nutrientes disponibles durante un mayor período de tiempo y no se vean disipados por erosión eólica.

Además, como se mencionó, el mecanismo para la producción del Biochar es la Pirólisis, la cual es uno de los procesos termo-químicos utilizadas para obtener energía o productos químicos a partir de la combustión de biomasa¹ sobre los 400°C, la cual puede ser de origen animal o vegetal, además esta puede o no tener un pre-procesamiento (Laird, 2009). El uso de dicha tecnología data de hace miles de años atrás desde el antiguo Egipto hasta los años 80 donde se utilizó para la obtención de Bio-Oil, a lo largo de este tiempo hasta la actualidad este proceso ha ido mejorando constantemente dado que ya no se utiliza combustión, sino diferentes reactores, como los lechos fluidizado. Sin embargo, el proceso de Pirólisis depende de diferentes factores como: tazas de calentamiento, tipo de biomasa a tratar, y producto deseado; esto se ve reflejado en la Tabla N°1.

Tabla 1: Diferentes procesos de Pirólisis, con sus características. (Brewer, 2012).

Thermochemical process	Temp. range (°C)	Heating rate	Pressure	Residence time	Desired product
Slow pyrolysis	350-800	Slow, (<10 °C/min)	Atmospheric	Hours-seconds	Biochar
Torrefaction	200-300	Slow, (<10 °C/min)	Atmospheric	Minutes-hours	Stabilized friable biomass
Fast pyrolysis	400-600	Very fast (~1000°C/s)	Vacuum-atmospheric	Seconds	Biooil
Gasification	700-1500	Moderate-very fast	Atmospheric-elevated	Seconds-minutes	Syngas/producer gas
HTC	175-250	Slow	-	Hours	Hydrochar

Entre los factores que determinan las propiedades y calidad del Biochar se encuentra la biomasa, debido a que dependiendo de su composición química que es en base a proteínas, lípidos, y azúcares como: Celulosa, Hemicelulosa, y Lignina (fibra), dependerán la porosidad que tendrá, la cantidad de volátiles, tiempo de residencia de los gases, y la cantidad de energía necesaria para combustionar la biomasa (Brown & Brown, 2003). Ciertamente los residuos orgánicos que se obtienen de los distintos cultivos pueden ser considerados como co-productos de la agricultura, siempre y cuando cumplan con ciertos requisitos como: que crezcan dentro

¹ Se denomina biomasa a todo material que tenga un origen biológico con el fin de excluir a los combustibles fósiles, para tener una definición más exacta son todos los residuos o desechos que tengan origen dentro del ambiente biótico (Brown & Brown, 2003).

de un tiempo determinado periódicamente, con lo cual se pueden considerar como un recurso renovable, y sean utilizados para la obtención de otros productos como el Biochar y sus derivados, adicionalmente cabe mencionar que la hemicelulosa, y la celulosa son importantes para la obtención de Bio-Oil, sin embargo la lignina y sus porcentajes dentro de la biomasa determinan la cantidad final del producto (Kan, Strezov, & Evans, 2016). Las reacciones que se dan dentro de la biomasa son diferentes debido a que cada componente químico, azúcar, de la biomasa se descompone a diferente temperatura como: celulosa y hemicelulosa a alrededor de 300°C, lignina a temperaturas sobre los 400°C (Kavitha et al., 2018) y por un rango amplio hasta cerca de los 900°C. Por lo tanto, se debe tomar en consideración las propiedades de la biomasa con la cual se va a trabajar, para ello se debe realizar el análisis próximo y último de la biomasa cuyos resultados muestran las propiedades químicas que posee, es decir su porcentaje de lignina, celulosa, hemicelulosa, y otros (Brown & Brown, 2003). A continuación, se muestra en la Tabla 2, algunos de los productos con sus respectivos porcentajes de hemicelulosa, celulosa, y lignina.

Tabla 2: Tipos de Biomasa, con su composición de Lignina, este análisis fue realizado en seco.
Brown & Brown, 2003

Feedstock	Cellulose (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Other* (wt%)
Bagasse	35	25	20	20
Corn stover	53	15	16	16
Corn cobs	32	44	13	11
Wheat straw	38	36	16	10
Wheat chaff	38	36	16	11
SRWC	50	23	22	5
HEC	45	30	15	10
Waste paper	76	13	11	0

Sources: Bull, S.R. (1991) The U.S. Department of Energy Biofuels Research Program. *Energy Sources*, 13, 433–442; Wayman, M. and Parekh, S. (1990) *Biotechnology of Biomass Conversion: Fuels and Chemicals from Renewable Resources*. Philadelphia: Open University Press. *Includes proteins, oils, and mineral matter, such as silica and alkali.

Se sabe que en el mercado existen diversos tipos de fertilizantes, y fungicidas que ayudan a controlar las diferentes plagas que afectan a los cultivos a lo largo de todas sus etapas, sin embargo, en ocasiones no se considera el impacto que tienen los mismo a futuro por lo cual

se degrada el suelo, es decir sus propiedades y su capacidad de producción se ven afectadas.

Con el paso del tiempo se ha estado estudiando diferentes alternativas que sean sostenibles para recuperar el suelo. El Biochar, presenta una de las alternativas viables para evitar la constante degradación del suelo, pero se puede afirmar que el mismo no es capaz de solucionar todos los problemas, para ello la alternativa planteada para el control de plagas que no utiliza agentes químicos es el hongo *Trichoderma Harzianum*, que pertenece a la familia Trichoderma, los cuales se caracterizan por ser eficientes en cuanto a control de enfermedades de las plantas. Entre las diferentes ventajas que ofrece como su facilidad para ser cultivadas, su crecimiento rápido en diferentes sustratos, lo más destacado es como las cepas del hongo desplazan al agente patógeno de 3 formas: Competencia directa por los nutrientes o el espacio, producción de metabólicos antibióticos de naturaleza volátil o no, y parasitismo directo de determinadas especies de Trichoderma sobre los hongos Fitopatógenos (Mohammed, Sánchez, Ahmed, & Requena, 2004).

El implementar el biochar como superficie que permita el crecimiento del hongo conocido como *Trichoderma Harzianum*, es novedoso dado que no solo implica la producción de carbón vegetal como enmienda para los suelos, sino que ayuda a desarrollar este hongo que actúa como hiperparásito competitivo, es decir que resulta muy eficaz en el control de enfermedades dentro del suelo causadas por hongos de los géneros tales como: Phytophthora, Rhizoctonia, Sclerotium, Pythium y Fusarium. La reutilización de los distintos residuos vegetales produce diferentes propiedades en el Biochar, de tal manera que se produce una utilización efectiva de los recursos disponibles y así se evita el uso de fertilizantes artificiales que degradan el suelo (Mohammed, Sánchez, Ahmed, & Requena, 2004).

La idea fundamental del proyecto a desarrollar, es producir y caracterizar el Biochar, y partir de residuos orgánicos, cascarilla de arroz, con la finalidad de que este se convierta en el sustrato que permita el cultivo del hongo, el cual posteriormente servirá como enmienda de

tipo orgánica para los suelos que están en degradación, además de ayudar a las plantas en contra de enfermedades patógenas. El objetivo es obtener el producto y evaluar sus propiedades, que sirva de sustrato para el cultivo del hongo, y observar como este último crece en sus diferentes etapas. Para ello, se evaluarán los posibles reactores que pueden ser implementados, para el caso debe ser de bajo presupuesto, promover Pirólisis lenta de biomasa, cuyos parámetros se ven reflejados en la Tabla 1. Por otro lado, el funcionamiento del reactor posee mecanismos de transferencia de calor como son: Conducción, Convección, y Radiación. El fenómeno de conducción en transferencia de calor se da cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas entran en contacto. La convección por otra parte, se da entre un fluido y un sólido de tal forma que el fluido es el medio por el cual se da el transporte de energía, además este mecanismo puede ser libre o forzado, donde la diferencia entre los dos es la participación de un elemento externo que puede ser un mecánico. Finalmente, la radiación es el efecto por el cual un cuerpo que tiene altas temperaturas irradia energía, en este caso calor (Bergman, Lavine, & Incropera, 2011).

Se desea estudiar el comportamiento de los residuos orgánicos dentro del reactor, en especial el momento en el cual los residuos previamente triturados chocan entre sí, dentro del ambiente caliente del reactor, además como va a ser el intercambio de calor entre: la superficie vs los residuos, residuos versus residuos, y residuos vs ambiente. Además, de conocer los esfuerzos que se van a generar en la estructura mecánica, es decir si el equipo va a ser capaz de cumplir con los requerimientos previamente establecidos. Para ello es importante utilizar paquetes informáticos propios en los campos como son: Análisis de esfuerzos, y Simulación de elementos discretos.

El paquete informático EDEM Software se utiliza en la simulación de DEM (*Discret Element Method*), el cual trata de simular el movimiento de diferentes elementos por separado a diferencia de los elementos finitos que se enfoca en tratar como un continuo (Siemens, 2018.).

Por otra parte, dado que la pirolisis es un proceso que se da con la presencia de gases, el CFD (*Computer Fluid Dynamics*), es relevante dado que por medio de algoritmos se puede resolver de forma aproximada como el gas o fluido va a interactuar con la superficie (ANSYS, 2018).

Existen diversas maneras para la producción de Biochar, todas ellas operan bajo el principio de Pirolisis. Cabe mencionar que no todas necesitan de un equipo sofisticado para cumplir su objetivo, se puede empezar desde la forma más antigua, la cual se lleva a cabo cavando un agujero en la tierra, hasta el proceso de gasificación. Sin embargo, para fines del presente trabajo se utilizará un reactor que funciona bajo el principio de secador rotatorio, de flujo indirecto. Por lo tanto, existen diversos caminos para la producción de Biochar, al igual que distintos equipos que pueden ser muy útiles dependiendo del producto final deseado, como se mencionó anteriormente, Tabla 1, el objetivo del presente proyecto es el carbón vegetal para la inoculación del *Trichoderma Harzium*.

Los reactores pirolíticos no constan de una norma específica para su diseño, sin embargo, se puede empezar en guías implementadas para la fabricación de hornos, mezcladoras de cemento, entre otras que se relacionan con el mismo. En cuanto a seguridad, al trabajar con sistemas que manejan altas temperaturas, la norma de seguridad de hornos industriales- Seguridad Industrial, específica que no debe superar 100°C, con lo cual debe constar de aislamiento térmico. Además, para el proceso de mezclado del material dentro del reactor, es decir transportar la biomasa desde la zona pasiva hasta la activa, se trabaja con la norma de mezcladoras de cemento (Lisboa, Vitorino, Delaiba, Finzer, & Barrozo, 2007). Las cuales ofrecen diversos lineamientos que pueden ser útiles como criterios de diseño. De igual manera, se debe considerar las normas bajo las cuales se puede identificar la calidad del producto, es decir que propiedades tiene el Biochar, se debe considerar las propiedades de la biomasa con la cual se va a trabajar, Tabla 2, cascarilla de arroz como materia prima.

En cuanto a proyectos anteriores se conoce que el Biochar, posee la capacidad de absorber metales pesados como es el cascara de tabaco, redujo un 5% el Cadmio, por otra parte, con cascara de coco en suelos arenosos, con poca humedad, se observó que las raíces crecieron mejor, de igual manera el carbón vegetal en conjunto con urea logró claramente disminuyó las pérdidas de N en un 63%, dentro de los suelos, mejorando notablemente el estado de los cultivos (Kavitha et al., 2018).

De igual manera para tener una idea de la composición química que favorece en la caracterización del Biochar, la ayuda del SEM, Scanning electron microscopy, es una herramienta muy poderosa dado que permite la identificación cuantitativa, porcentual, de los diferentes elementos presentes en la muestra, siempre y cuando está presente las condiciones adecuadas para ello, por mencionar algunas de interés: conductora, que soporte el vacío, y en caso de ser Biológica se debe recubrir con oro, y para análisis de EDS², recubrimiento de Carbono. Por otro lado, se llega entender el poder del equipo dado que presenta como los electrones interactúan con la materia, figura 1.

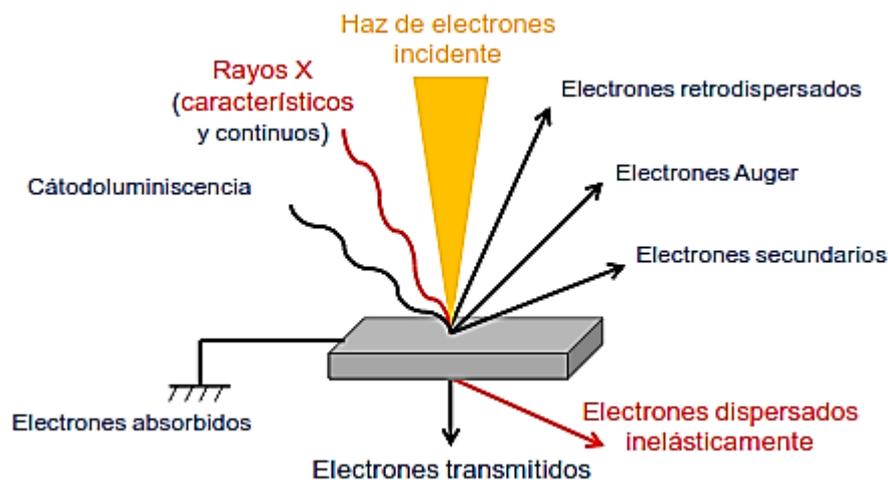


Figura 1: Interacción de los electrones con la materia dentro de SEM

² Espectrometría de dispersión de energía de rayos X

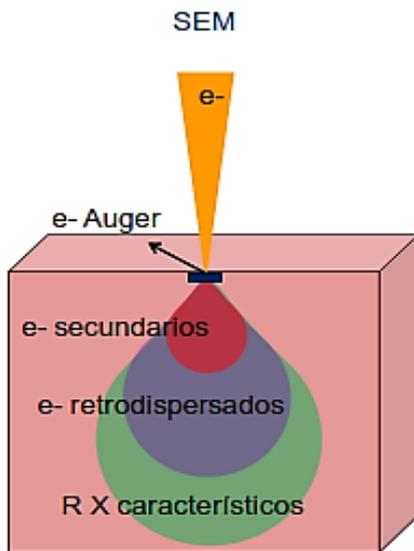


Figura 2: Nivel al cual interactúan los diferentes rangos de electrones, dependiendo de la intensidad que tenga el electron gun.

La diferencia del haz de electrones posee una finalidad, es decir se aplica dependiendo del objetivo del análisis, Auger es superficial, <10 kv, es decir permite observar la morfología de la muestra, claro que, si se busca gran resolución la distancia de trabajo, y las condiciones de alto o bajo vacío son representativas, además de la experiencia del microscopista, y las especificaciones del fabricante. Por otra parte, para el análisis de interés que es EDS, se utilizan electrones

secundarios los cuales van más allá de los Auger, por ser más energéticos, dado que interactúan con la materia, de modo que liberan un electron característico del último nivel energético que pasa a ser recolectado por el receptor que brinda un espectro con la huella característica del elemento, en forma de cuentas, se llega a observar los picos característicos del elemento, como se muestra en la figura 2. Finalmente, cabe mencionar que el análisis EDS detecta concentraciones mayores al 1%, para elementos livianos como el Hidrogeno no pueden ser detectados.

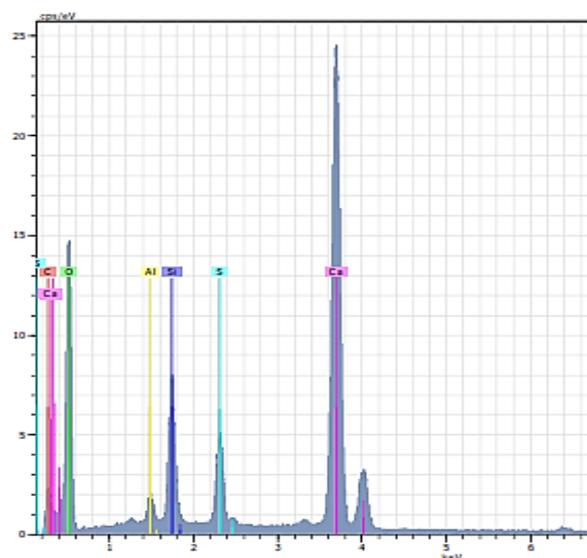


Figura 3: Espectro de un material X, como ejemplo dónde se llega a notar los picos característicos se ve reflejado en la curvatura de los picos, algunos espureos, y en la punta de cada uno el elemento al cual corresponden.

Por lo tanto, en el presente proyecto se realizó la producción y caracterización de Biochar a partir de residuos agrícolas, cascarilla de arroz, el cual se utilizó para la inoculación del hongo *Trichoderma Harzianum* para ello se diseñó y manufacturó un reactor de bajo presupuesto para llevar a cabo el proceso de Pirólisis lenta, asimismo se aproximó la temperatura que puede llegar a tener el producto final, con la finalidad de aproximar la calidad del producto, mediante ecuaciones fundamentales de igual manera se utilizó SEM³ para realizar un estudio superficial del producto con la finalidad de observar la porosidad del mismo y se identificó como es el proceso por el cual el hongo se desarrolla en el sustrato, además de tener un aproximación del composición química de la superficie, a partir de estos datos se puede aproximar la utilidad que puede tener dicho Biochar, gracias a las herramientas propuestas por IBI.

³ Scanning Electron Microscopy

Métodos

El proyecto está enfocado a la producción de Biochar a partir de los residuos vegetales orgánicos de origen biológico, cascarilla de maíz, de igual manera al desarrollo y construcción de un reactor capaz de reproducir el proceso de Pirólisis convencional⁴. Para ello se debe considerar que el reactor cumpla con los requerimientos para el proceso de Pirólisis, además de otros, los cuales se establecen a continuación.

Requerimientos Propuestos

1. El equipo debe ser fabricado con materiales accesibles, que cumplan con criterios ingenieriles para su óptimo funcionamiento, y no superar 1000 USD.
2. Debe ser de fácil uso y no representar un riesgo durante su operación.
 - 2.1. Debe ser diseñado bajo la norma de seguridad industrial para equipos similares, al no contar con una norma específica.
3. Ser portátil, es decir debe contar con un sistema tal que pueda ser trasladado en caso de ser necesario.

Adicionalmente,

 - 3.1 Liviano, es decir que los materiales con los cuales va a ser construido no debe ser excesivo, dos personas deben ser capaces de moverlo, máximo 3.
4. Constar de un sistema que aproveche los gases liberados durante la pirolisis de la biomasa ingresada, es decir sostenerse en llama piloto.
5. Producir Biochar dentro del rango de temperaturas 400-500°C
6. Durante el proceso de Pirólisis, la temperatura superficial no debe superar 100 °C.

⁴ Proceso que se da en condiciones de ausencia total o parcial de oxígeno dentro de la cámara, donde la biomasa sufre un proceso de transformación termo-químico, a temperaturas entre 300-500°C por el cual las diferentes componentes pasan a convertirse en volátiles y carbón, este último es el producto de interés.

7. El mantenimiento no debe ser costoso, además de que no debe ser recurrente.
8. Fácil de fabricar, no debe ser un ensamble mayor a 5 componentes.

Caracterización del Biochar

El Biochar como tal no posee una norma específica, es decir no están definidos estándares por los cuales pueda ser categorizado dentro de una variedad o especificar sus propiedades, sin embargo, IBI(*International Biochar Initiative*) ha establecido una serie de normas que pueden ser útiles en cuanto a las propiedades: físicas, químicas, distribución superficial, y morfología, dichas propiedades son relevantes dado que influyen directamente en cuanto a la calidad del cimiento en dónde va a crecer el “-hongo”, en el caso de suelos erosionados es por falta de la capacidad de retener agua, el objetivo del carbón vegetal en esta situación es servir de reservorio para que la planta sea capaz de utilizarlos en caso de que el suelo pierda los nutrientes por los diferentes mecanismos de erosión ya sea por lluvias o fuertes vientos(Kan et al., 2016).

Los estudios propuestos son: conocer la distribución superficial, y morfología, se utilizará SEM para determinar su composición química (EDS), y así definir en qué rango se encuentra el producto final, bajo los lineamientos propuestos por IBI⁵. Por lo cual, las propiedades del producto dependen de la temperatura alcanzada dentro del equipo, para el objetivo planteado, debe estar alrededor de 400°C a 500 °C, considerando el criterio de Pirólisis lenta, Tabla 1, asimismo del proceso de mezclado, el cual debe ser uniforme, este dependerá de la rotación del tambor, que para criterios de diseño esta debe estar dentro del rango de 4 a 5 rpm (Sheehan, Britton, & Schneider, 2005)(Yargicoglu, Sadasivam, Reddy, & Spokas, 2015b).

⁵ International Biochar Initiative, es una entidad proporciona una plataforma para fomentar la colaboración de los interesados, las buenas prácticas de la industria y los estándares ambientales y éticos para respaldar los sistemas de biochar que sean seguros y económicamente viables (IBI, 2018).

International Biochar Initiative (IBI)

Los criterios por los cuales IBI, propone son establecidos a partir del 2011, en la publicación realizada –“A biochar classification system and associated test methods”-. Declaran una serie de componentes para a partir de ellos determinar las características que tendrá el producto.

- ✓ Almacenamiento de carbono
- ✓ Valor del fertilizante (solo P, K, S y Mg)
- ✓ Valor liming.
- ✓ Distribución de tamaño de partícula. (IBI I. B., 2019)

Almacenamiento de carbono

Se define como una propiedad intrínseca del Biochar la cual depende del tipo de materia prima



utilizada para su obtención. La relación H / Corg permite estimar la mineralización del carbono en el biochar de manera estandarizada en relación con otros. Se propone utilizar esta propiedad para diferenciar entre los productos mediante la cantidad de carbono orgánico (Corg). Este valor de almacenamiento de carbono se conoce como stock BC + 100 (sBC + 100) y se puede utilizar al estimar el potencial de secuestro de carbono en el suelo a largo plazo de un biochar específico. El valor de almacenamiento de carbono se basa en el contenido de Corg y la relación de hidrógeno a carbono orgánico (H / Corg) de un biochar. H / Corg ofrece una aproximación de la extensión de las estructuras del anillo de carbono aromático fusionado del biochar, un indicador clave de la persistencia del carbono del biochar en los suelos. El valor de almacenamiento puede estar entre los 5 grupos. (IBI I. B., 2019)

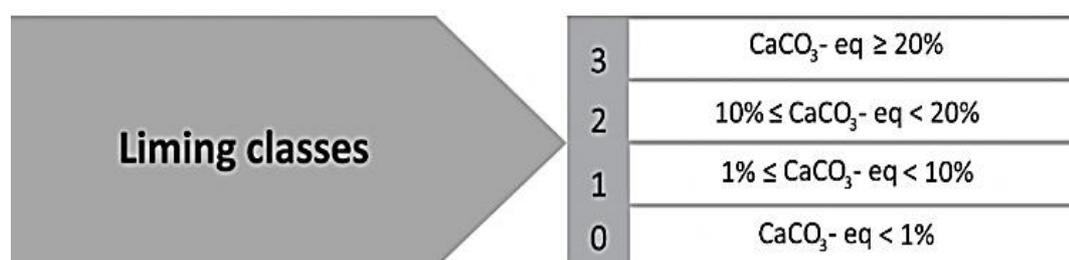
Fertilizante

Otra de las propiedades del Biochar, de igual manera va a depender del tipo de biomasa, además de su origen y procesamiento previo antes de entrar en Pirólisis. Este factor lo que busca es ver la capacidad de P, K, S y Mg en un biochar para satisfacer el rendimiento esperado y las demandas de nutrientes por parte de las plantas (IBI I. B., 2019).



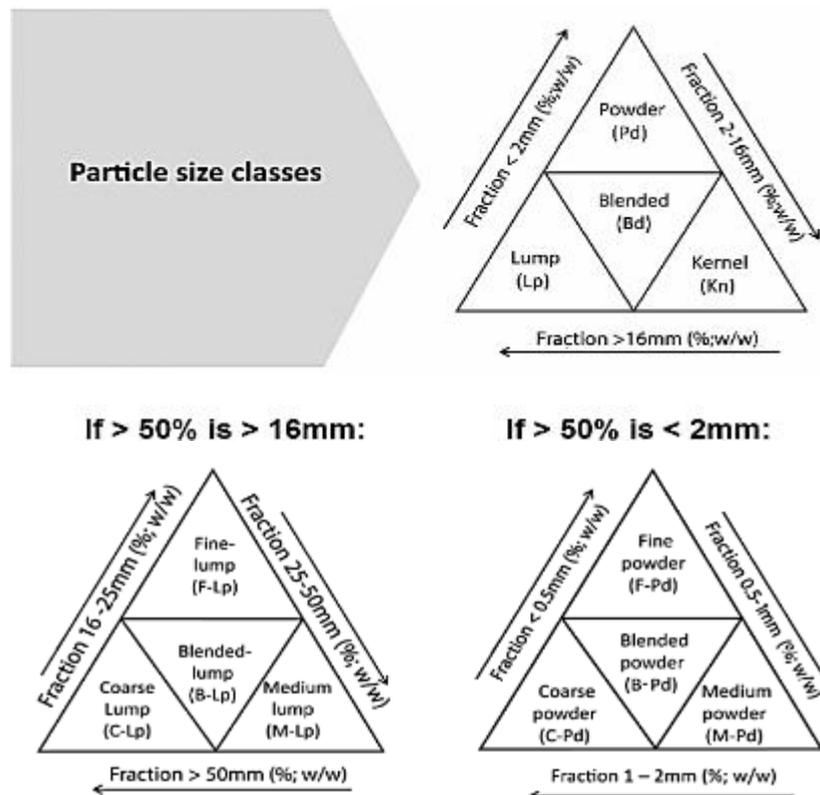
Liming

Los materiales inorgánicos están formados típicamente a partir de carbonatos, óxidos o hidróxidos de Ca y Mg. La piedra caliza calcítica (carbonato de calcio puro ($CaCO_3$)) es un material de cal común y se utiliza como referencia para otros materiales de cal; los valores de cal se informan como una proporción equivalente del efecto de cal que tendría el carbonato de calcio (% $CaCO_3$ -eq). La ceniza del Biochar está formada por carbonatos metálicos, silicatos, fosfatos, sulfatos, cloruros e hidróxidos. El Biochar con altas cantidades de estos compuestos inorgánicos pueden tener un valor de encalado significativo y pueden usarse como acondicionadores del suelo para mejorar los suelos ácidos, y volverlos aptos para el cultivo (IBI I. B., 2019).



Tamaño de Partícula

La retención de agua depende del área superficial que el producto tenga en donde se ve reflejado las propiedades hídricas del Biochar, es decir como a menor tamaño de partícula mayor área superficial, y por ende porosidad en donde se permite albergar mayor cantidad de agua. Por lo cual, en diferentes publicaciones realizadas se ha demostrado que el biochar mejora las funciones del suelo relacionadas con la retención de agua y la aireación del suelo, como el aumento de la capacidad de retención de agua y el agua disponible de la planta, así como un mejor drenaje y aireación, como se conoce por cualquier adición de materia orgánica. Estas funciones son en cierta medida dictadas por el tamaño de partícula de biochar. Otros factores incluyen la porosidad interna del biochar, las propiedades del suelo huésped y su interacción con el biochar a lo largo del tiempo (IBI I. B., 2019).



Modelos Matemáticos que sustentan el Proceso

Por otra parte, el diseño del reactor debe ser considerado desde la parte conceptual hasta el diseño a detalle. Dentro del mismo estudio, las partículas, fragmentos de Biomasa, deben entrar en contacto con el cilindro central, el cual va a permitir el intercambio de calor por radiación, convección, y conducción. Sin embargo, se implementará un modelo matemático en estado estable, el cual usa el modelo Lagrangiano con elementos discretos para el intercambio de calor entre un fluido y partícula, el contacto entre partícula-partícula, donde el modelo Hertz-Midlin, se asume que todas las partículas poseen las mismas dimensiones, el cilindro central tiene la temperatura uniforme a lo largo de toda su superficie, de igual manera no hay intercambio de calor hacia el exterior.

La física detrás de la simulación de elementos discretos parte de considerar a cada uno de los sólidos como elementos independientes a diferencia del modelo convencional que considera al sólido como un continuo. Se destaca que el modelo de DEM, posee diversas aplicaciones que pueden ser tratadas como CFD-DEM, entre otras, para fines del presente proyecto se utilizará para representar la caída de las partículas que representan a la biomasa, a lo largo de una sección del tambor. Por ende, se introducen algunas de las fórmulas que representan a la física que se encuentra detrás del paquete informático EDEM. Como son la conservación de momento lineal, angular, impacto, entre otras que se muestran a continuación,

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_s + F_b$$

Ecuación 1: Conservación del momento lineal para las partículas.

Dónde: **V_p**: es la velocidad instantánea de la partícula; **F_s**: es la fuerza resultante en la superficie de la partícula; **F_b**: es la fuerza resultante en el cuerpo de la partícula. Cada una de las resultantes se explica a continuación.

$$F_s = F_d + F_p + F_{vm}$$

Ecuación 2: Fuerza resultante sobre la superficie de la partícula.

$$F_b = F_g + F_{mrf} + F_{\mu} + F_c + F_{co}$$

Ecuación 3: Fuerza resultante sobre el cuerpo de la partícula internamente.

Dónde: **Fb**: Fuerza de Drag; **Fp**: Fuerza del gradiente de presión; **Fvm**: Fuerza de la masa virtual; **Fg**: Fuerza de gravedad; **Fμ**: fuerza definida por el usuario; **Fc**: fuerza de contacto entre las partículas, depende del modelo de contacto definido; **Fco**: Fuerza de Coulomb. (Siemens, 2018).

Aparte, se definen el contacto existente entre las partículas, al igual que su forma, esta puede ser esférica, cilíndrica, o compuesta. Se aproxima su forma a esférica dado que facilita el contacto entre las mismas y se ahorra el tiempo de procesamiento. Para definir el contacto que existe entre las partículas se utiliza el modelo de Hertz-Mindlin No-Slip Contact Model cuya ecuación gobernante se define a continuación.

$$F_{\text{contac}} = F_n + F_t$$

Ecuación 4: Fuerza de contacto entre partículas.

Dónde: **Fn**: Fuerza normal; **Ft**: Fuerza tangencial entre partículas.

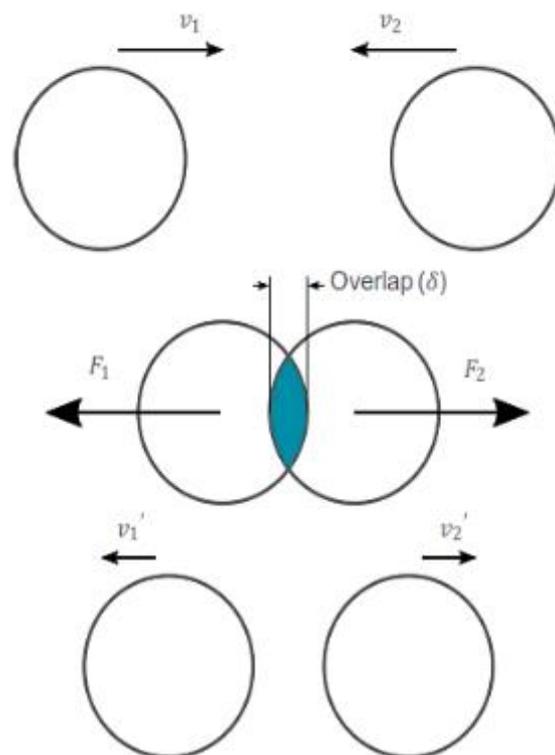


Figura 4: Se define como el modelo de contacto empleado para la simulaciones de elementos discretos, se utiliza este modelo para el cálculo de fuerzas, y deformaciones. De igual manera en el modelo se asume

Además, se procede a definir las diferentes ecuaciones gobernantes para transferencia de calor en los distintos escenarios planteados como: partícula-partícula, partícula-pared, etc. Se procede a establecer el modelo a utilizar de transferencia de calor entre las partículas, y el fluido, gas, presente dentro del reactor pirolítico. A continuación, el balance de masa.

$$\frac{dmp}{dt} = mip$$

Ecuación 5: Balance de masa para una partícula, conservación de masa.

Dónde: ***mp***: masa de la partícula; ***mip***: masa transferida a la partícula en caso de que exista evaporación, u otro fenómeno.

A parte, el balance de energía se desarrolla para para cada partícula, donde se conoce que a diferencia de los elementos finitos, donde se considera a un elemento como continuo, en los elementos discretos (DEM), cada uno de los elementos se los considera como únicos e individuales, para ello las ecuaciones que se consideran deben ser aplicadas a cada partícula en un instante de tiempo, se consideran algunos de los mecanismo de transferencia de calor presentes dentro del reactor como son: conducción, impacto, convección, y radiación.

$$mpCp \frac{dT_p}{dt} = Qt + Qrad + Qs$$

Ecuación 6: Balance de energía para cada una de las partículas.

Dónde: ***mp***: masa de la partícula, ***Cp***: calor específico de las partículas; ***Qt***: calor por convección de la partícula; ***Qrad***: calor recibido por las partículas, ***Qs***: calor de las diferentes fuentes de calor.

A parte, cada una de las partículas intercambia calor con las demás, al igual que con el medio que las rodea para ello se plantean las ecuaciones.

$$q_{ij} = 4rck(T_j - T_i)$$

Ecuación 7: calor transferido entre partícula y partícula.

Dónde: ***rc***: es la distancia entre las partículas; ***k***: es la conductividad térmica equivalente entre las partículas; ***T_j*** y ***T_i***: son las temperaturas correspondientes entre las mismas. De igual manera, la conductividad térmica equivalente se obtiene

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_j}$$

También, se tiene el caso de que la partícula interactúa con la pared, si se trata de un medio adiabático no existe intercambio de calor, pero en caso de existir se tiene el siguiente modelo matemático.

$$q_{iw} = 4rck(T_w - T_i)$$

Ecuación 8: Intercambio de calor entre una partícula, y un pared con un temperatura fija.

Dónde: ***rc***: distancia entre la pared y la partícula; ***k***: conductividad térmica equivalente; ***T_w***: temperatura constante de la pared.

Elevadores o Lifter's

Los elevadores son partes muy importantes dentro de los secadores rotatorios dado que son los elementos mecánicos que permiten la mezcla homogénea del material, desde la zona activa a la zona pasiva dentro del reactor. Al igual que los diferentes secadores rotarios existe gran variedad de elevadores, varía tanto su geometría, figura 1, como su profundidad pueden ser continuos de principio a fin o no, todos los

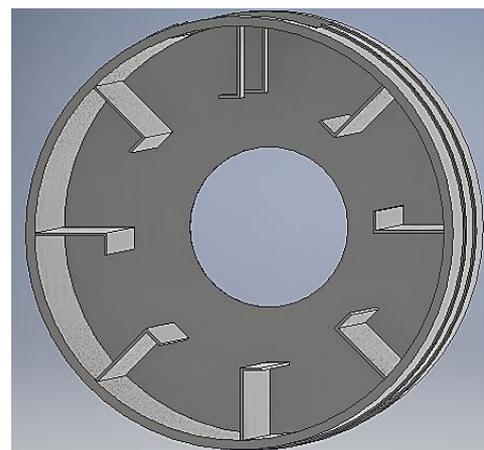


Figura 5: Tambor Rotatorio, con elevadores rectos, se llega a apreciar su posición, y función.

parámetros que deben ser considerados son la biomasa y la finalidad que tenga el

equipo (Lisboa et al., 2007). Además, se debe conocer que la carga óptima del secador rotatorio debe ser del 30% (Duda, 1977) de su capacidad máxima con la finalidad de conseguir una mezcla homogénea del material utilizado, se puede definir como el grado de llenado, tomando

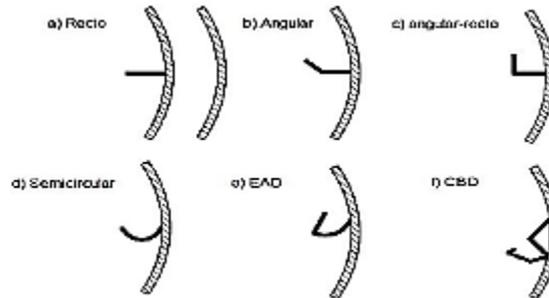


Figura 6: Diferentes geometrías de los elevadores comúnmente usados en secadores rotarios.

como referencia el manual tecnológico de cemento.

En secadores rotatorios, se debe considerar que el volumen que llevan dentro del cilindro central, debe ser la tercera parte de su capacidad máxima, asimismo cada uno de los elevadores debe llevar entre el 10%-15%, de la misma, cada uno de estos elementos debe ser seleccionado en base a los requerimientos del equipo, para este caso en específico se necesita que tengan corto rango, es decir que la mayor cantidad de material granulado caiga sobre el cilindro central, el cual puede ser cuantificado en grados, 0-180°, puede ser aproximado mediante el recorrido que realiza el elevador desde su estado de mayor carga hasta el momento en el cual este queda totalmente vacío. Para la selección del más adecuado, se analizará 3 alternativas en base a los criterios de diseño como: manufactura, capacidad, y rango. Para medir este último, se utilizará los modelos matemáticos de Schofield y Glikin 1962, para determinar el ángulo dinámico de reposo (Sheehan et al., 2005).

$$\tan\Phi = \frac{\mu + Ro \frac{\omega^2}{g} * (\cos\theta - \mu * \sin\theta)}{1 - Ro \frac{\omega^2}{g} * (\sin\theta - \mu * \cos\theta)}$$

Ecuación 9: Ángulo dinámico de reposo Schofield y Glikin 1962

Dónde: Φ : es el ángulo dinámico de reposo; μ : coeficiente de fricción dinámico;
Ro: radio efectivo del secador; ω : velocidad angular; θ : es la posición angular en la cual se encuentra, el elevador.

Por otra parte, se ofrece una serie de modelos matemáticos que permite predecir el llenado de los elevadores, para ello se recurre a los modelos matemáticos propuestos, asimismo se considera que la posición en donde se da el llenado máximo, es en cero grados, es decir en los lados opuestos del secador (Porter,1963). Se describe el modelo matemático que se va a utilizar para predecir el llenado de los elevadores a diferentes posiciones angulares, se presentan a continuación el modelo matemático.

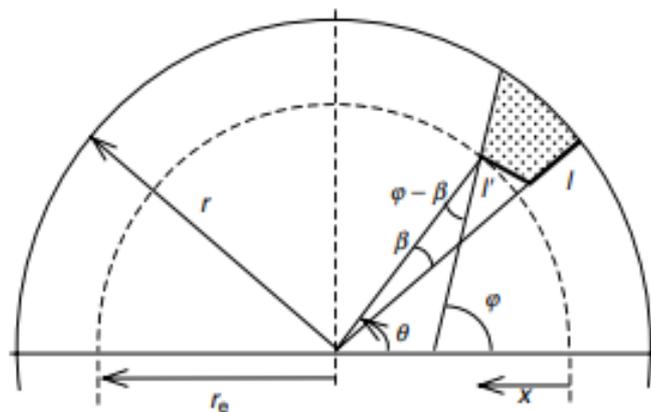


Figura 7: Se presenta el diseño de u elevador, asimismo los ángulos tato de posición angular, de cuña, y dimensiones de la raíz, labio

Partiendo de la figura que se muestra en la parte superior se tienen las ecuaciones gobernantes.

$$H = \sum h^* - h_0^*$$

Ecuación 10: Diferencia de carga, donde se considera el hecho de que es la carga total durante todo el proceso.

Dónde: h_0^* : retención total de sólidos para los diferentes ángulos de inclinación; h^* : retención de sólidos para el ángulo igual a cero.

Sin embargo, para todas las posiciones angulares no aplica el mismo modelo, por lo cual se tiene diferentes casos, para ello se tiene los diferentes casos, con pequeñas modificaciones al modelo principal.

1. Para $\Theta < \psi$

$$h^* = ll' \frac{r - \frac{1}{2}l}{r - l} + \frac{1}{2}l^2 \tan(\varphi - \theta)$$

Ecuación 11: Carga del elevador para el caso 1

2. $\Theta > \varphi$, cuando $\Theta - \varphi - \beta < 0$

$$h^* = ll' \frac{r - \frac{1}{2}l}{r - l} - \frac{1}{2}l^2 \tan(\varphi - \theta)$$

Ecuación 12: Carga del elevador para el caso 2

3. $\Theta - \varphi - \beta \geq 0$, además de $\tan(\Theta - \varphi - \beta) < \frac{l'}{l}$

$$h^* = ll' \frac{r - \frac{1}{2}l}{r - l} - \frac{1}{2}l^2 [\tan(\beta) + \tan(\Theta - \varphi - \beta)]$$

Ecuación 13: Carga del elevador caso 3

4. $\Theta > \varphi$, además de $\Theta - \varphi - \beta > 0$, y $\tan(\Theta - \varphi - \beta) \geq \frac{l'}{l}$

$$h^* = \frac{l'^2}{2 \tan(\Theta - \varphi - \beta)}$$

Ecuación 14: Carga del elevador caso 4

Finalmente, se introduce la carga máxima que puede tener el elevador en la posición cero, con lo cual acorde con el modelo, se tiene lo siguiente

$$h_{0^*} = \frac{ll' \left(r - \left(\frac{1}{2} \right) * l \right)}{r - l} + \frac{1}{2}l^2 \tan(\varphi_0)$$

Ecuación 15: Carga máxima que puede alojar el elevador

Dónde,

$$\varphi = \left(\frac{\gamma + v}{(1 - \gamma v)} \right)$$

Ecuación 16: Solución para el ángulo φ_0

Selección del Motor

El equipo debe ser capaz de ser utilizado por un solo operario, para ello es requerido un motor eléctrico para ello se debe aproximar la potencia requerida por medio del momento de inercia de los diferentes componentes presentados en los sistemas.

Momento de Inercia para un cilindro

Se define al momento de inercia para un cilindro de pared delgada como:

$$I = M * R^2$$

Ecuación 17: Momento de Inercia para el cilindro de pared delgada

Dónde: M: masa del cilindro, R: radio interno del cilindro

Momento de Inercia para los volantes de Inercia

Los volantes de inercia se analizan tomando como referencia el momento de inercia para anillos, se conoce que su geometría es similar a un cilindro, pero el espesor esperado de los mismos es mayor a los 4 [mm], con lo cual la ecuación a considerar es:

$$I = \frac{M}{2} * (r_{ext}^2 + r_{in}^2)$$

Ecuación 18: Momento de Inercia para un anillo, alrededor del eje del mismo.

Dónde: M: masa de los volantes en kg; r_{ext} : radio exterior del anillo; r_{in} : radio interior del anillo:

Momento de Inercia para de los elevadores

La geometría de los elevadores asemeja una placa rectangular, lejos del eje de rotación para ello por medio del teorema de ejes paralelos, el modelo matemático aplicable a esta situación es el siguiente.

$$I = \frac{me}{12} * (a^2 + b^2) + (me * xd^2)$$

Ecuación 19: Momento de Inercia para los elevadores, Teorema de ejes paralelos.

Dónde: me: masa de la placa rectangular en kg; a: lado de la placa en metros; b: lado posterior de la placa rectangular en metros; xd: distancia del eje del centro de masa al centro del tambor en metros.

Momento de Inercia para la biomasa

Para la biomasa se puede tener diferentes modelos, sin embargo, para el momento en el cual está dentro del tambor asemeja a la cascada se puede asemejar a un anillo sólido que gira en su eje, con lo cual se tiene.

$$I_{bio} = \frac{mt}{2} * (rcs^2 + ri^2)$$

Ecuación 20: Momento de inercia para la biomasa mezclada dentro del tambor.

Dónde: mt: masa total de biomasa dentro del reactor; rcs: radio aproximado de la cascada que viene a ser la dimensión de la raíz del Lifter's; ri: radio interno del tambor.

Potencia Requerida por el motor.

Partiendo de

$$M = \sum It * \alpha c$$

Ecuación 21: Momento

Dónde: I: sumatoria de todos los momentos de inercia de los diferentes elementos mecánicos, α : aceleración angular.

Se conoce que la velocidad angular que debe mantener el tambor varía entre 4-5 [rpm], con lo cual se puede aplicar, ecuación 22, 23, que para mantener la velocidad luego de tener la primera revolución el tiempo: $2\pi/w$.

$$\alpha c = \frac{\Delta w}{t}$$

Ecuación 22: Aceleración angular

$$P = M * \alpha c$$

Ecuación 23: Potencia

De igual manera se debe tomar en consideración el factor de servicio del motor en dónde se considera el ambiente de trabajo, figura 7. (Labahn, 1983)

DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES C1, C2, C3
C₁ Para tipo de carga

Máquina motriz	Tiempo de funcionamiento diario (horas)	Tipo de carga		
		U	M	P
- Motores eléctricos - Motores hidráulicos - Turbinas	Hasta 2	0.90	1.00	1.25
	de 2 hasta 10	1.00	1.25	1.50
	de 10 hasta 24	1.25	1.50	1.75
- Motores de combustión de 4 ó 6 cilindros	Hasta 2	1.00	1.25	1.50
	de 2 hasta 10	1.25	1.50	1.75
	de 10 hasta 24	1.50	1.75	2.00
- Motores de combustión de 1 ó 3 cilindros	Hasta 2	1.25	1.50	1.75
	de 2 hasta 10	1.50	1.75	2.00
	de 10 hasta 24	1.75	2.00	2.25

C₂ Para número de arranques por hora

Hasta 10	De 10 hasta 50	más de 50
1	1.1	Consultar

C₃ Según la temperatura ambiente° C

10	20	30	40	50
0.9	1	1.15	1.3	1.65

Figura 8: Determinación de los coeficientes C1,C2,C3 (Labahn, 1983)

$$FS = C1 * C2 * C3$$

Ecuación 24: Factor de Servicio

Dónde: C1: tipo de carga; C2: arranques por hora; C3: según la temperatura ambiente

La potencia total requerida: $P: P \cdot FS$

DESARROLLO DEL TEMA

En esta sección se resumen los resultados obtenidos a partir de los objetivos planteados al inicio del proyecto. Se empezará por la producción de Biochar, ¿que se utilizó?, ¿Por qué?, hasta la caracterización del mismo, bajo la relación propuesta por la IBI, en 2012. A continuación, se parte del diseño conceptual del reactor a utilizar, se debe aclarar que el presente trabajo no es específico a la construcción con lo cual no es diseñado al detalle, sino de forma general. Por lo cual, se presenta los resultados del estudio, resaltando la implementación del método de diseño, Dixon, como parte fundamental del trabajo realizado.

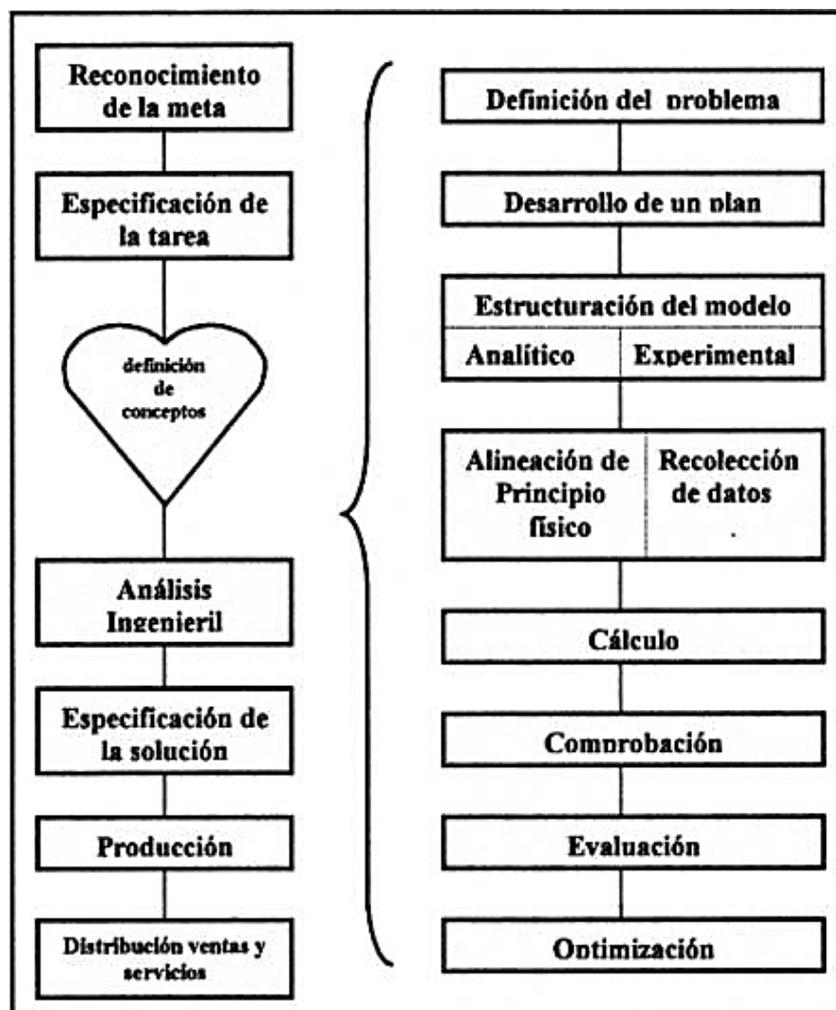


Figura 9: Diagrama de Diseño establecido por Dixon, en donde se plantea una serie de conceptos aplicables a diferentes situaciones que se presentan a lo largo del proceso de Diseño (UNAM, s/f).

Diseño Conceptual

El diseño conceptual implica dos partes relevantes como son: Mecánica, y Térmica, que trabajan en conjunto para producir Carbón vegetal. En cuanto al apartado mecánico se debe seleccionar un mecanismo tal que permita mezclar los residuos orgánicos, biomasa, previamente triturados, debe mantener un movimiento rotacional continuo, esto se logra utilizando un tambor que lleve dentro algunos Lifter's o elevadores, los cuales van a permitir a la biomasa pasar de la zona activa a pasiva, es decir de una zona de mayor o menor transferencia de calor. Por otro lado, en el apartado térmico, se llega a utilizar los gases de combustión, GLP, que cederán energía al cilindro central, para que esto llegue a permitir el intercambio entre los residuos y la chimenea, cilindro central. Finalmente se muestra un diagrama del diseño planteado, figura 2.

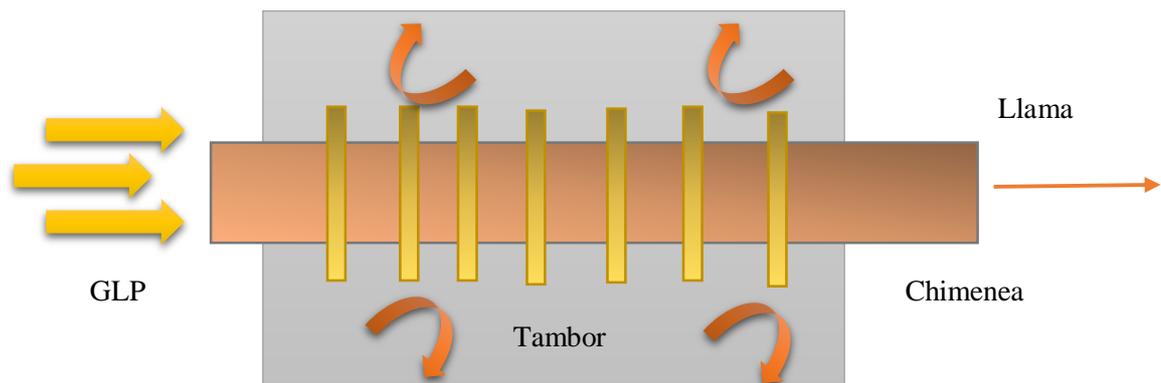


Figura 10: Diseño Conceptual del equipo a fabricar para la producción de Biochar, se llega a notar la parte mecánica, y térmica del mismo. Tanto la chimenea, el interior del tambor.

De igual manera, se implementó una serie de cilindros entrecruzados a lo largo de todo el cilindro central, separados equitativamente, con una diferencia de 90° en la inclinación entre cada uno, los cuales permiten albergar el calor, dado que los gases liberados por la biomasa entran y salen calientes aumentando así el calor dentro del tambor.

Diseño al detalle

En cuanto al diseño al detalle se analizó tanto la transferencia de calor desde la fuente de GLP, a lo largo de la chimenea, selección de materiales, implementación del diseño CAD, experimentos, y resultados.

Selección de Materiales

En el presente proyecto se propone utilizar el modelo de selección de materiales planteado por Ashby, en el cual se procede a establecer una lista con las propiedades que presentan mayor relevancia para el equipo a desarrollar, planteado de forma conceptual en la sección anterior. Aparte de las propiedades mecánicas que deben ser consideradas, se toma en cuenta algunos de los parámetros sugeridos por el modelo como: disponibilidad, costo, si posee algún pre-procesamiento previo, etc., tales factores afectan el costo total del material. Por ende, para simplificar el proceso se establece un factor determinante, el cual es el presupuesto, el limita el uso de materiales especiales de mejores propiedades, pero precio elevado.

Tabla 3: Propiedades relevantes que debe cumplir los materiales a utilizar dentro del proyecto.

Propiedad	Material
Resistencia a la fluencia(MPa)	1018(220); 1020(210);1006(175)
Coefficiente de Expansión Térmica	Aceros al Carbon en general $10.8E-6$
Punto de Fusión	Aceros al Carbon en general $>1000^{\circ}C$
Costo(m2)	Dependiendo del Elemento mecánico su costo varía partir de los 20\$ hasta los 100\$ por m2
Disponibilidad	Los aceros al carbón están disponibles a nivel nacional, en todas las distribuidoras de metales.

Como se muestra en la Tabla 3, se presentan algunos de los criterios más relevantes para el presente proyecto, se consideran dichas propiedades por el trabajo que van a realizar los elementos mecánicos a fabricar, con ello se selecciona a la Familia de los Metales, que para las diversas aplicaciones de Ingeniería son los más usados, la clase de Acero al Carbon. Por lo tanto, para el presente proyecto se utilizará Acero al Carbón, dado que sus propiedades son óptimas, en cuanto a su módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, punto de fusión, la disponibilidad al por mayor a nivel regional, además de su precio razonable que se ajusta al presupuesto planteado parte de los requerimientos.

Sin embargo, se debe considerar las variables que van a afectar al proceso como: ambiente de trabajo, temperaturas aproximadas, cargas específicas a soportar, y ciclos. La temperatura para el caso puede ser la variable determinante, dado que a medida que incrementan las cargas térmicas existe deterioro o disminución en las propiedades de los materiales, conocida como *termofluencia*. Tal estado provoca la disminución, del esfuerzo de fluencia, y el esfuerzo último, de igual manera depende de la periodicidad de las cargas provocando la falla en una sección del material, o una fractura frágil, tal comportamiento se ve reflejado en la figura, 4.

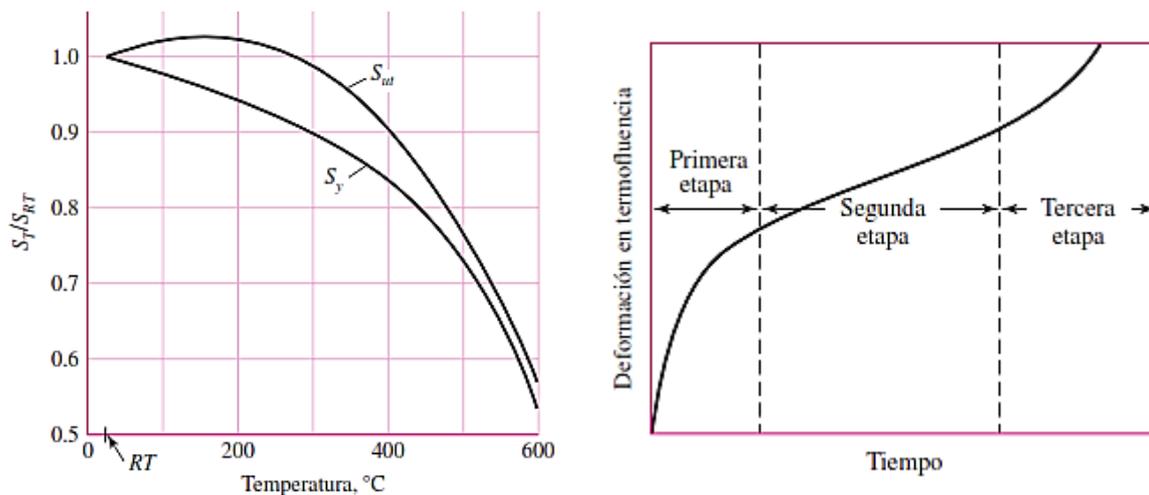


Figura 11: Comportamiento de los materiales bajo cargas térmicas, de izquierda a derecha, relación del esfuerzo de fluencia, y último, ingenieril, deformación de los materiales en temperaturas mayores a 100°C (Budynas & Nisbett, 2012).

Modelo CAD

Partiendo del diseño conceptual, se selecciona diferentes elementos que sean capaces de cumplir con los objetivos planteados para el equipo, además de sus medidas reales, materiales de fabricación, entre otras propiedades que facilitan el modelado. Posteriormente, se procede a dividir en ensambles que faciliten diseño del equipo.

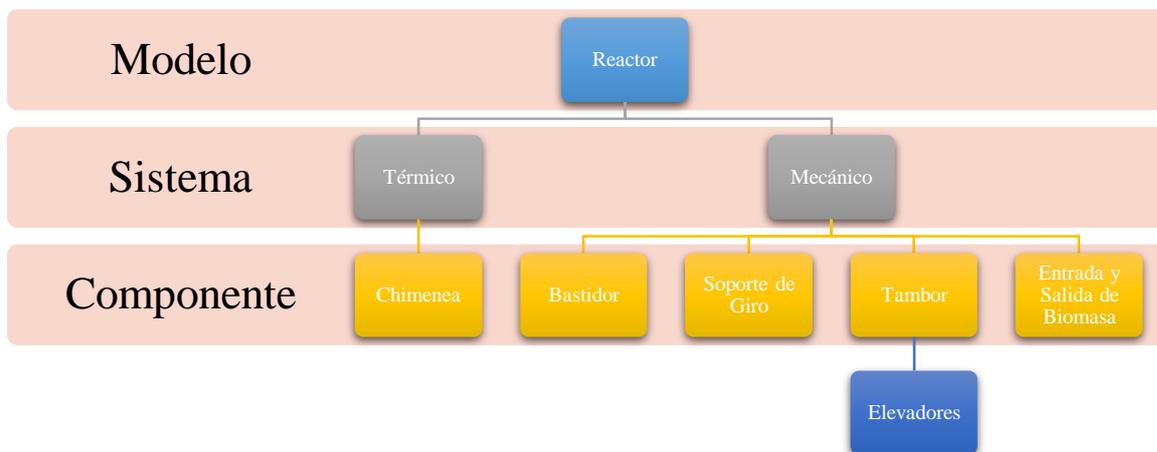


Figura 12: División de los Sistemas de los cuales consta, el reactor a manufacturar. Fuente: Diseño Propio.

Asimismo, se toma como referencia los requerimientos propios además de los planteados por el interesado. Entre las diversas ventajas que ofrece el realizar un modelo CAD, se encuentra el hecho que permite tener un breve vistazo a como lucirá el equipo, aparte de ello permite realizar modificaciones sin necesidad de realizarlas sobre el modelo en físico. Sin embargo, no siempre se posee la facilidad de manufacturar el diseño CAD a cabalidad con la realidad. Por lo tanto, se presenta la evolución del diseño CAD, con la finalidad de observar como en base a los requerimientos iniciales, y los del interesado, Tabla 4, cambia el equipo.

Tabla 4: Requerimientos Adicionales, planteados por el interesado los cuales se consideran para el diseño CAD

Condiciones de Operación	
Número de Operadores	1 a 2 personas
Temperatura Ambiente	25 °C
Producción Semanal	200 kg/semana
Horas de Operación	8
Biochar/poca ceniza	Producto Final
Rotación	Motor
Fuente de Calor	Fija

Modelo CAD del reactor-INVENTOR

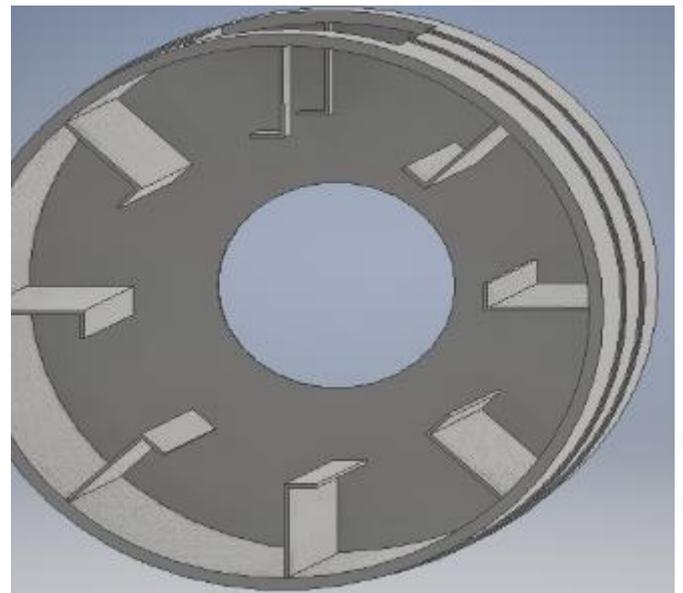
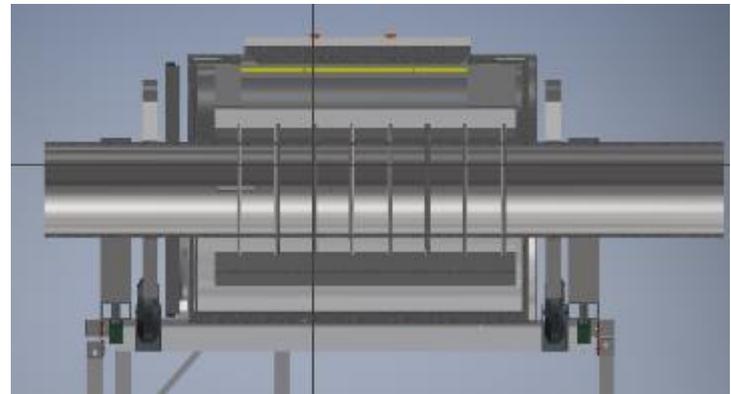
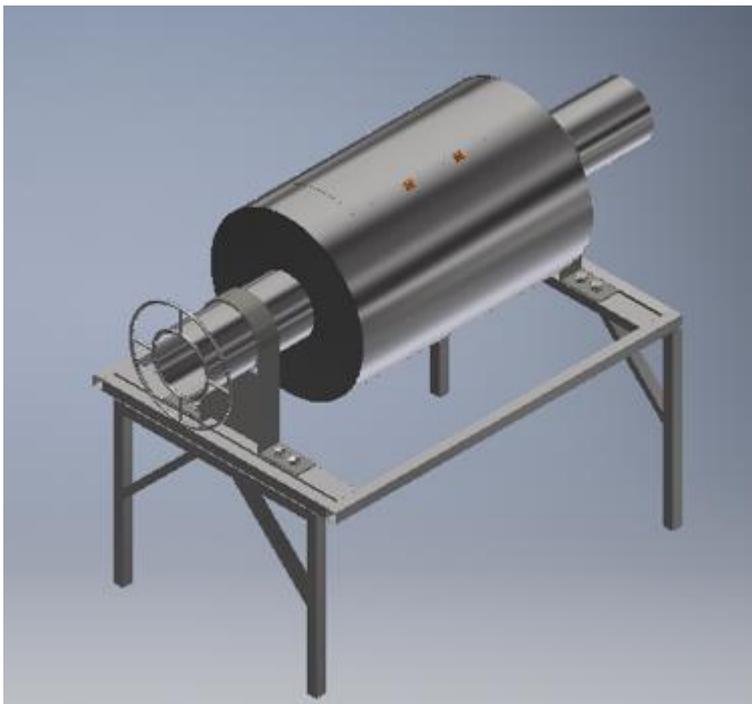


Figura 13: Reactor V1, se presenta el diseño inicial, el cual trabaja de forma manual, es decir se necesitan 2 operarios, 1 girando el reactor y el otro con la fuente de calor. Además, se muestra un corte transversal en donde se observan los detalles destacados, parte superior la chimenea, con los cilindros cruzados. Parte inferior, los elevadores rectangulares.

A partir del modelo CAD⁶, figura 12, se llega a apreciar la estructura metálica, bastidor, tal que soporte el peso del tambor, además de los elevadores internos, y el sistema de rotación tal manera que sea capaz de replegarse para llegar a ser transportado. Por otra parte, la chimenea con una serie de cilindro entrecruzados que llegan a ser la función de fin's, cuya función es mantener el calor dentro de la chimenea. A parte de ello el tambor, el cual debe estar sellado herméticamente, para cumplir con el parámetro fundamental del proceso de Pirolisis

Partiendo del primero modelo se realizaron diversos cambios los cuales contribuyeron a que el modelo tenga un mejor rendimiento, además de ajustarse a los requerimientos del interesado. Para ello se muestran cada uno de las modificaciones realizadas al modelo, cabe destacar que dichos cambios no fueron extremos, sino modificaciones, que son por seguridad, y por mejoras.

Primero, soporte de la fuente de calor, su material base es varilla de acero y la finalidad es facilitar el uso del equipo reduciendo el número de operarios, este se muestra en la figura 7, al lado derecho. Segundo, calentamiento de la tapa superior, entrada y salida de biomasa, el cambio propuesto es brindar mayor seguridad en cuanto a la operación del equipo, además de restringir la salida de los gases de Pirólisis, permitiendo así una mejor calidad del proceso. Además de mejorar los sellos, se agregan diversos seguros que permiten hermeticidad dentro del tambor, dado que es más cómodo a la alternativa planteada para el uso de pernos, lo cual complica, y retarda el proceso continuo, el cambio se ve reflejado en la figura 8.

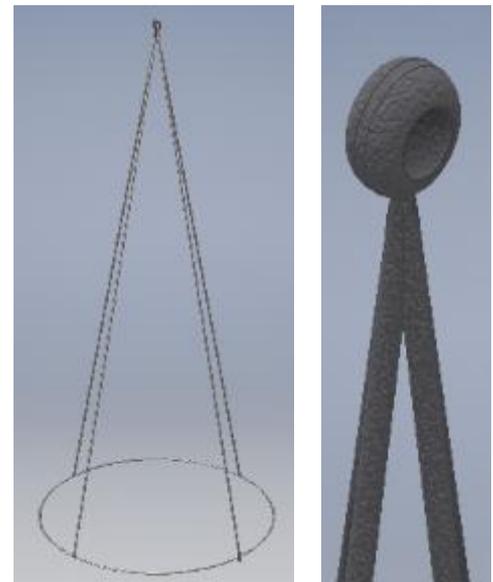


Figura 14: Se muestra el soporte seleccionado para la Torcha, dónde en la izquierda se presenta la perspectiva del mismo, y en la derecha el agujero que donde se introduce el equipo.

⁶ *Computer Aided Desing*- Diseño Asistido por computadora, se utilizó el paquete informático Inventor.

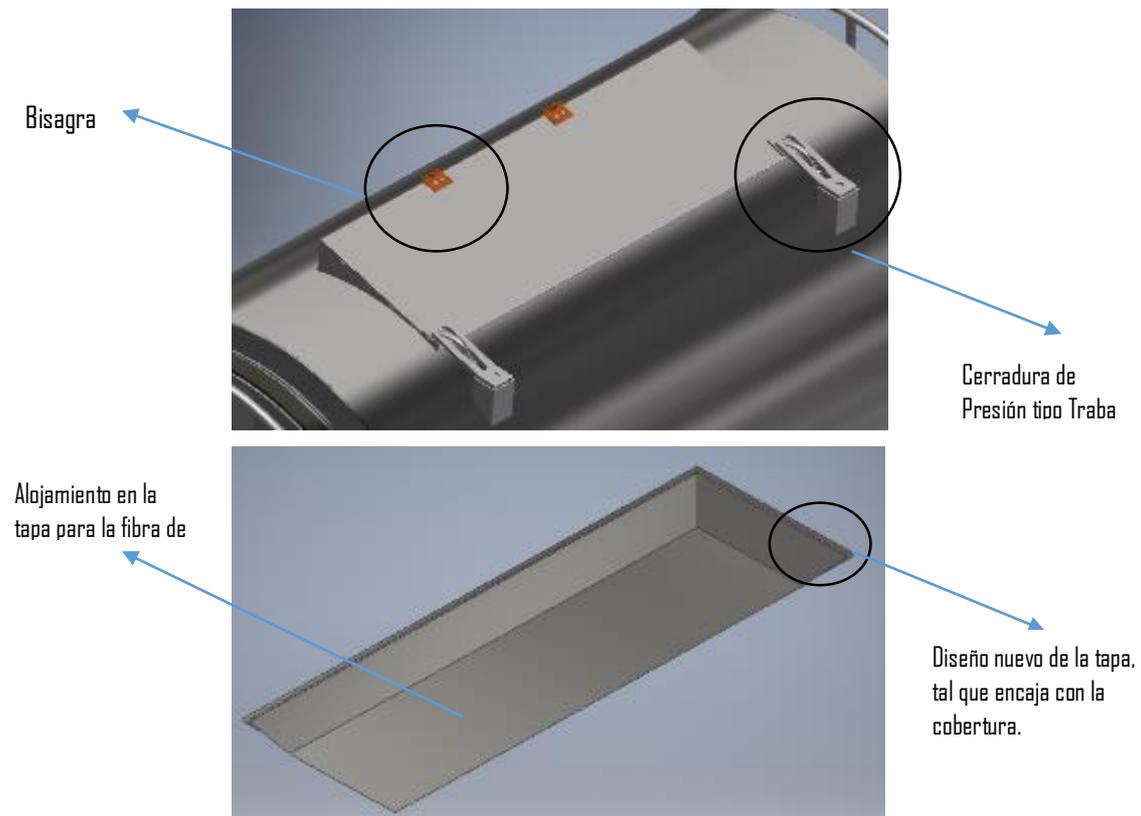


Figura 15: Detalla de la tapa, en donde se llega a visualizar los seguros, tipo traba, aparte se nota el compartimiento en donde se aloja la fibra cerámica tal que aísla la parte superior a no superar la temperatura de 100°C.

Tercero, disminuir la cantidad de operarios, es decir que no requiera de alguien para realizar el proceso de mezclado del material orgánico, dado que en cada una de las jornadas de trabajo se debe utilizar el reactor de forma manual. Se proponen alternativas que son viables para el proyecto de las cuales se escoge una de las planteadas mediante el método de ponderados, Tabla 5, considerando el criterio del cliente. Se establece una solución para que el proceso se lleve a cabo de manera automática por medio de la implementación de un motor eléctrico, esto aplica con el alargamiento del presupuesto planteado para el proyecto. Se detalla dicho cambio en la figura

Tabla 5: Alternativas planteadas por el método de ponderados.

Alternativa	Ruido	Costo	Implementación(tiempo)	Duración	Total
Cadena	3	3	3	1	10
Engranés	1	1	3	5	10
Banda	5	5	3	3	16

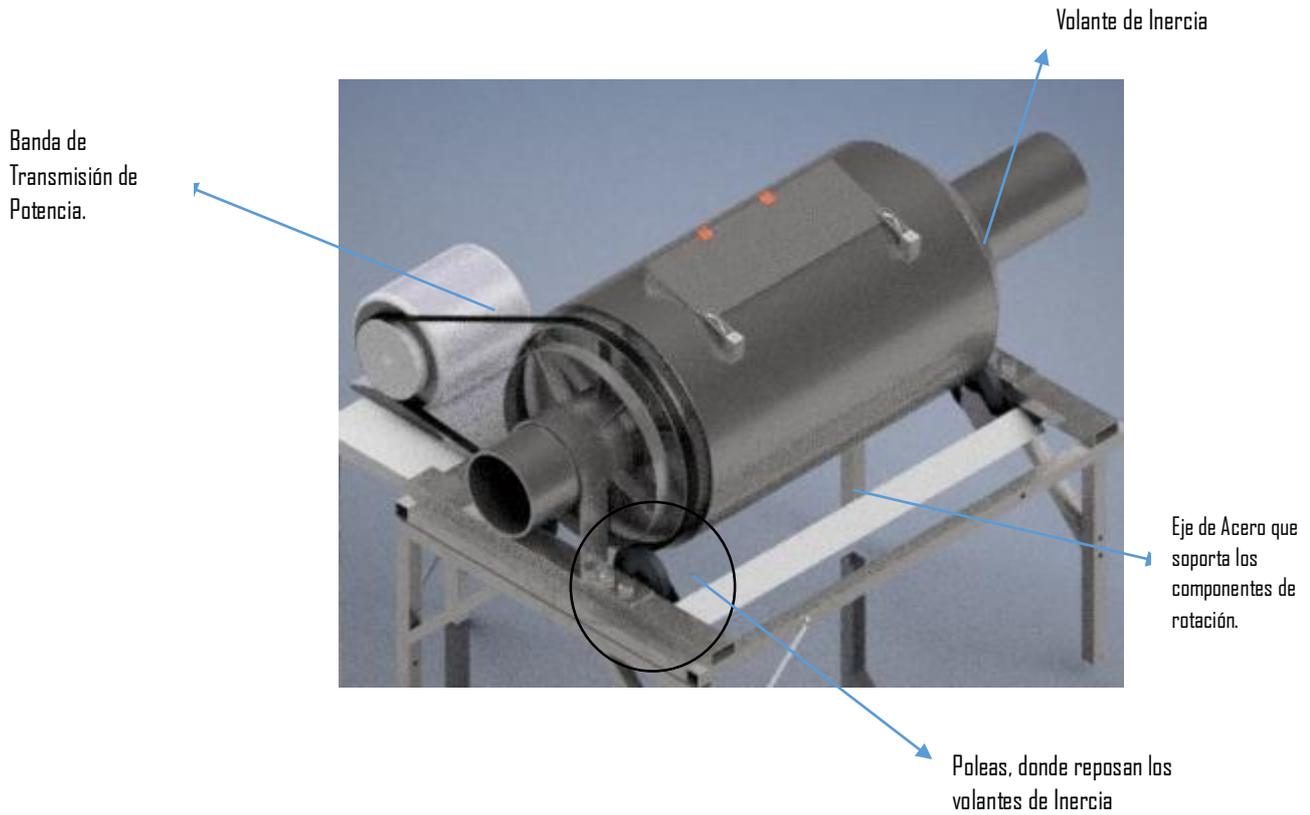


Figura 16: Se presenta el esquema del tercer cambio planteado, dónde se detalla el motor y su funcionamiento.

Para concluir la sección del apartado CAD, se adjunta una imagen de como luce el equipo, luego de los cambios realizados, es decir su versión final.

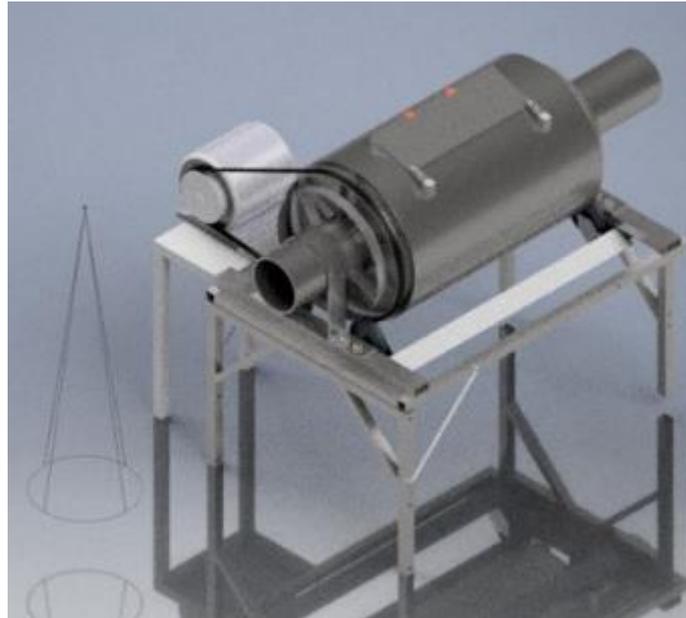


Figura 17: Reactor Biochar, con los cambios, vista isométrica.

Análisis de Esfuerzos

Para el análisis de esfuerzos, se tomó la estructura mecánica, bastidor, al cual se le aplico la carga que representa a todos los elementos que involucran al equipo. Cabe destacar que el bastidor está fabricado a partir de perfiles metálicos de 4x4 [cm], lado, con el tipo de unión permanente, es decir por suelda de arco eléctrico, sin electrodo de relleno. El estudio se realizó, utilizando el paquete informático Inventor, en su modalidad de análisis estructural, con las siguientes especificaciones.

Tabla 6: Condiciones del Análisis Estructural para Inventor, componente: bastidor

Análisis Estructural		
Gravedad	9.81	en -Y
Restricciones	4	Soportes
Carga Distribuida	800 N	Soportes
Malla	0.1 cm	Triangular
Resultados	Esfuerzo	Von Mises

Resultados

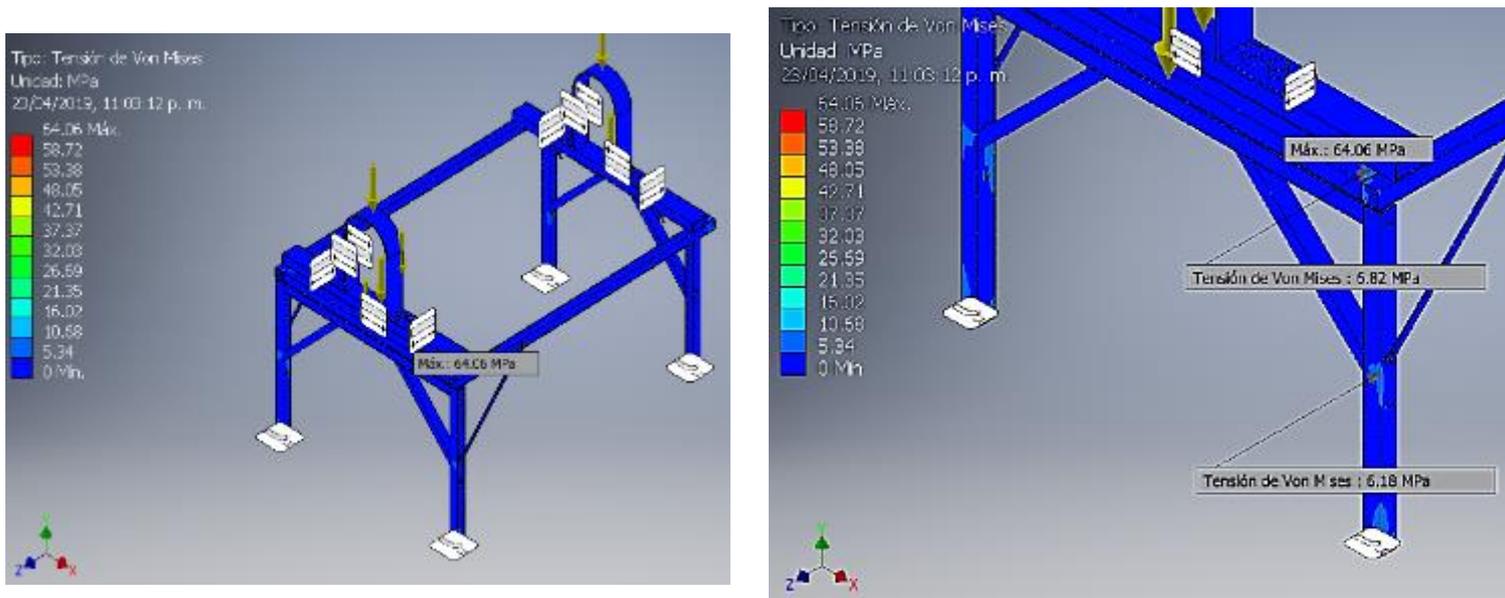


Figura 18: De derecha a izquierda, se llega a apreciar las restricciones impuestas en el modelo para el análisis estructural, de igual manera los resultados del estudio en dónde se destaca que el esfuerzo máximo es de 64.04MPa, en las juntas de las patas de la estructura, a la derecha.

Por lo tanto, como resultados del estudio se llega a establecer que en las condiciones de trabajo del reactor conjuntamente con los elementos que lo componen la estructura metálica no presenta deformaciones notables, además de que no llega a estar en un punto crítico de esfuerzo. Por lo cual, se afirma que la selección del material, y la estructura presentan buenos parámetros de diseño.

Selección de Elevadores

Para la selección de los elevadores, se consideraron diferentes aspectos claves como el hecho de que sean continuos, versus entrecortados a lo largo del tambor, además de que se debe considerar que cada uno de los elevadores debe llevar en su carga el 10%-15% del volumen total de carga, esto se aclaró en la sección de métodos. Se propone comparar 3 geometrías diferentes de elevadores para posteriormente identificar la curva de carga versus ángulos de posición de la que sea seleccionada.

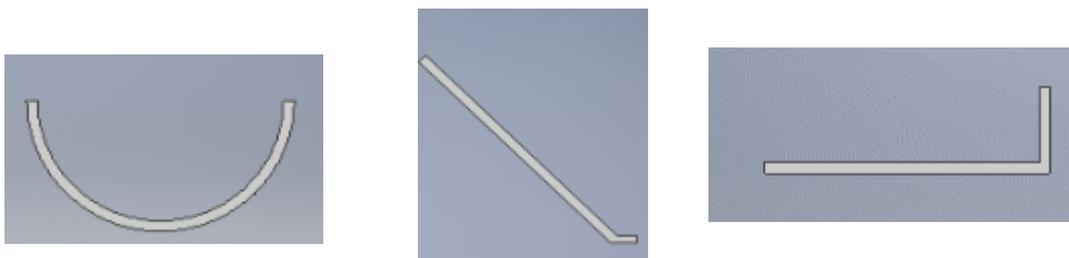


Figura 19: De izquierda a derecha, elevadores circular, inclinado, y recto. Cada uno tiene las mismas dimensiones, es decir el circular posee 10[cm] de diámetro, mientras que el recto posee 10 de labio, y 3 de cuña, el inclinado posee 10 de cuña y 1 de labio.

Como parte del estudio se emplea el paquete informático EDEM, para realizar la simulación de elementos discretos, con la finalidad de establecer en rango para el cual cada uno de los elevadores es efectivo, el software acepta el archivo con formato “*Standard Triangle Language*” con extensión. stl, para ser importado, las condiciones con las cuales se trabajó son las siguientes.

Tabla 7: Condiciones de trabajo dentro del software EDEM

Condiciones	
Tiempo	6 s
densidad	920 kg/m ³
velocidad angular	4 rpm
Partículas/distrib.uniforme	esféricas
Radio	3 mm
Number	10000
ContactModel(P-P)	Hertz-Midlin(noslip)
ContactModel(P-S)	Hertz-Midlin(noslip)
Malla	thin 0.001

Se establece el punto de inicio en 0°, es decir a lado derecho como punto de partida para los 3 casos tratados, y se sigue al elevador hasta su descarga completa, es decir que en cero empieza en su carga máxima, Porter 1963, hasta su descarga completa. Se utiliza las mismas condiciones, Tabla 7, en los 3 casos de estudio. Se procede observar los resultados, que son tomados en 4 secciones del proceso desde 0, 60, 90, y el ángulo de descarga medido en la punta o cuña del elevador.

Elevador Recto-Ingreso del Material y Descarga

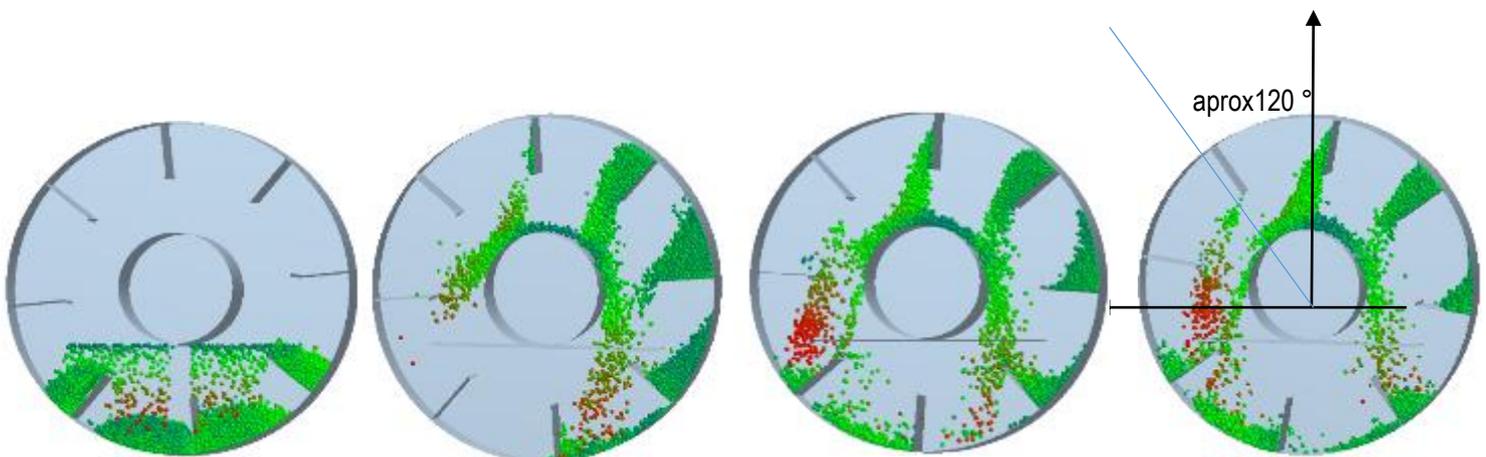


Figura 20: Elevadores rectos, ingreso del material, punto de carga máxima, y descarga. Se aprecia para el elevador recto, utilizando EDEM.

Elevador Inclinado- Ingreso del Material y Descarga

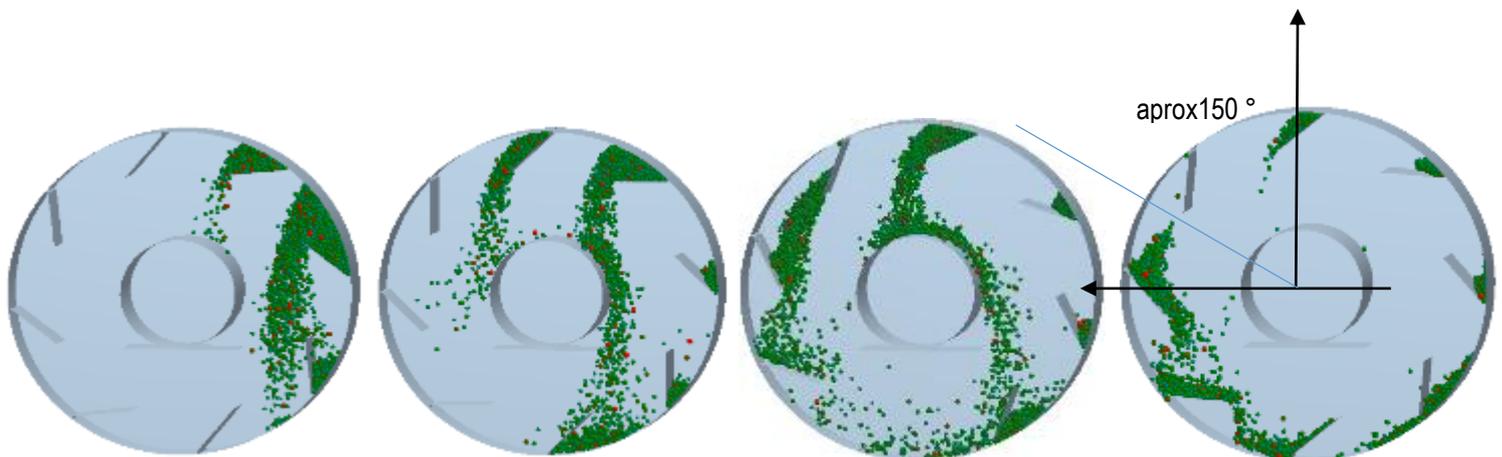


Figura 21: Elevadores inclinados, ingreso del material, punto de carga máxima, y descarga. Se aprecia para el elevador inclinado, utilizando EDEM.

Elevador Circular Ingreso del Material y Descarga

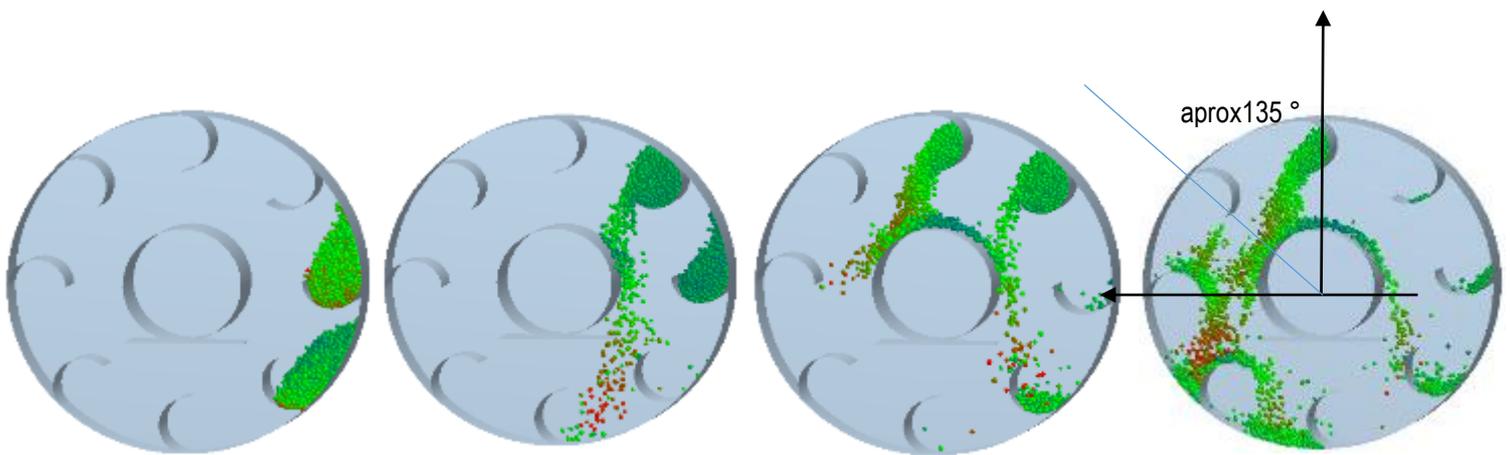


Figura 22: Elevadores circulares, ingreso del material, punto de carga máxima, y descarga. Se aprecia para el elevador circular, utilizando EDEM.

Se llega a apreciar en cada uno de los casos el ángulo que tienen al completar la descarga del material para cada uno de los casos estudiados, sin embargo, para obtener los resultados se estima el ángulo para el cual se cumplen el objetivo, el resultado se muestra a continuación, de igual manera se presenta la selección por medio del método de ponderados.

Tabla 8: Resultado del análisis del rango de los elevadores.

Elevador	Rango(°)
Recto	0-120
Inclinado	0-150
Circular	0-135

Por otro lado, se presentan los resultados de la velocidad que poseen las partículas al momento de caer, desde el elevador, dichos datos son tomados por el paquete informático, y los presenta como histogramas, que revelan el número de partículas con su respectiva velocidad, además detalla la velocidad media que poseen las partículas.

Recto-Velocidad de Partículas

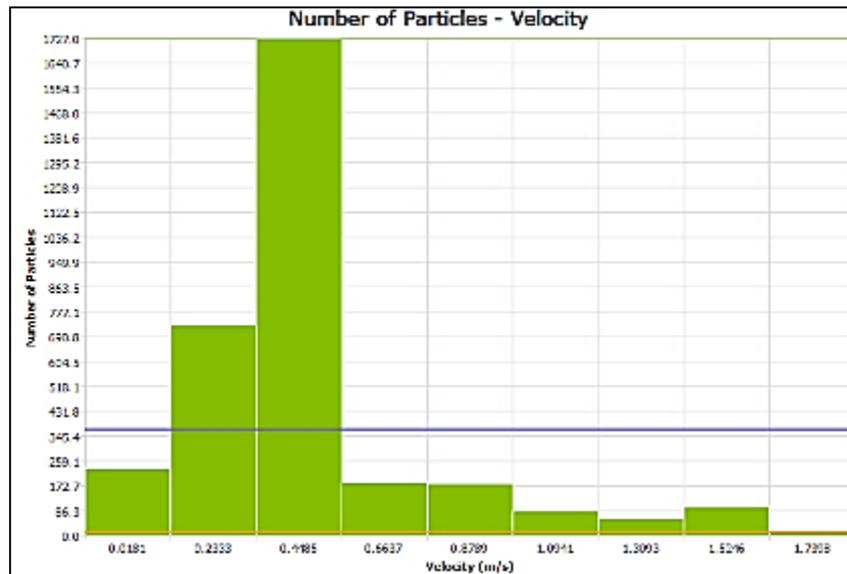


Figura 23: Distribución de la velocidad de las diferentes partículas, con las cuales tuvo interacción el tambor rotatorio-Elevadores Rectos. Se llega a apreciar el número de partículas, con su velocidad respectiva en m/s.

Inclinado-Velocidad de Partículas

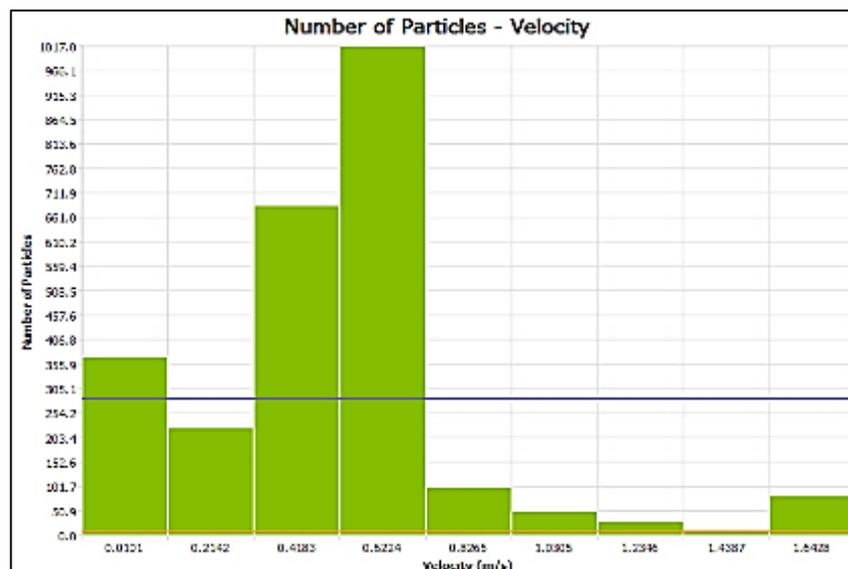


Figura 24: Distribución de la velocidad de las diferentes partículas, con las cuales tuvo interacción el tambor rotatorio-Elevadores Inclinados. Se llega a apreciar el número de partículas, con su velocidad respectiva en m/s.

Circular-Velocidad de Partículas

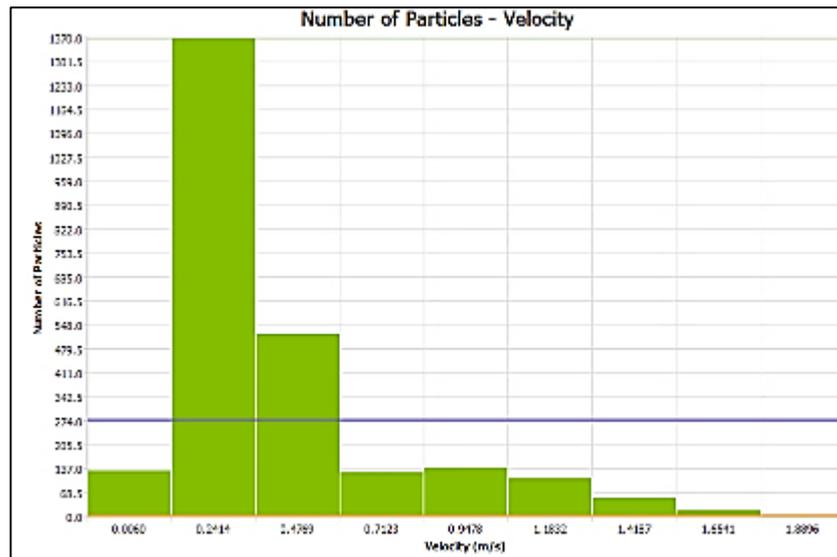


Figura 25: Distribución de la velocidad de las diferentes partículas, con las cuales tuvo interacción el tambor rotatorio-Elevadores Circulares. Se llega a apreciar el número de partículas, con su velocidad respectiva en m/s.

En las figuras tanto 23,24, y 25 se llega a apreciar, la distribución de velocidad, m/s, que llega a alcanzar el material granulado dentro del tambor, a la velocidad de rotación. Esto se puede apreciar dentro de las figuras 20,21, y 22, por la coloración de las esferas dónde rojo representa altas velocidades, los histogramas antes presentados complementan la simulación, brindando mayor información sobre el comportamiento de las partículas dentro del secador rotatorio.

Se procede a determinar el elevador óptimo para el equipo, a continuación, se presenta el método de ponderados para las alternativas utilizadas cuyos resultados se ven reflejados en la Tabla 9, con lo cual se puede afirmar que para el presente trabajo se utilizará el elevador Recto

Tabla 9: Método de Ponderados para la selección del elevador.

Criterios	Recto	Cilíndrica	Inclinada
Manufactura	5	3	3
Capacidad de Carga Máxima	3	3	2
Rango	3	3	3
Ponderado	11	9	8.5

Por otro lado, se procede a utilizar el modelo presentado por Scholfield & Glikin, de 1962, para determinar la carga en cada una de las posiciones angulares de dicho elevador, es decir las ecuaciones 12,13,14,15, y 16. Posterior a ello se utiliza el paquete informático Matlab para programar el código de tal manera que sea posible estimar la carga del elevador desde la posición 0° hasta los 130° , que se puede apreciar en la simulación con el fin de comprobar la validez del modelo matemático.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en base al código generado, la gráfica se indica de manera que la posición del elevador en grados, eje x, y la carga que posee el elevador en el eje y.

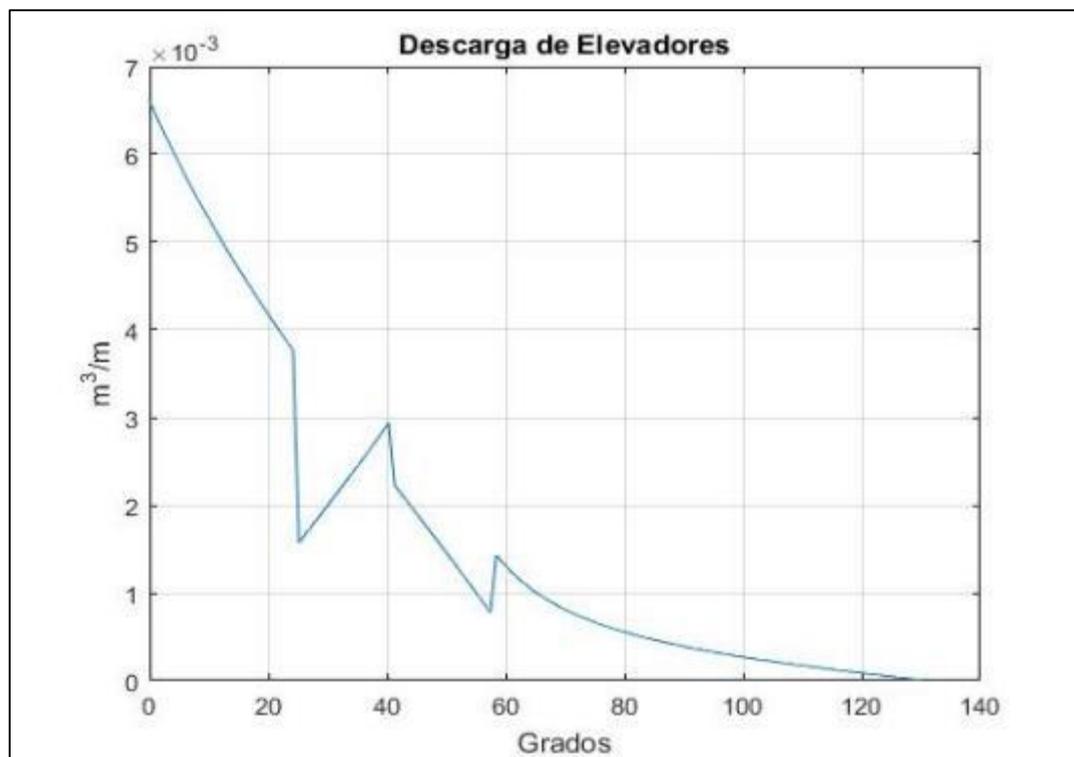


Figura 26: Resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo matemático dentro del paquete informático Matlab.

En la figura 26, se llega a apreciar la curva que representa la cantidad de material granulado que lleva un elevador desde su posición de carga máxima, 0° , hasta su descarga total que para el caso es 120° aproximadamente. Este análisis es parte importante para la verificación de la simulación de la figura 20, lo cual corrobora los estudios previamente realizados, y brinda una aproximación de la cantidad de material presente en el elevador a lo largo de su recorrido.

Selección Sistema Motriz

Para el sistema mecánico se debe considerar las ecuaciones números, 17 a 23, con lo cual se obtiene los siguientes resultados en la tabla 9, encontrando así que la potencia mínima requerida es menor a 1HP, para ello se selecciona de la marca WEG con número de serie tal como 10030231, el cual cumple con los requerimientos de 0.5 HP, de potencia.

Se tomó como referencia las dimensiones del modelo CAD anteriormente planteado, de igual manera las masas fueron obtenidas a partir de la selección de materiales, obteniendo así los siguientes resultados.

Tabla 10: Resultados para seleccionar, un motor adecuado.

Momento de Inercia	kg*m2
Tambor	25.0645
Volantes	10.5815
Chimenea	1.5593
Polea	5.3548
Elevadores	3.3022
Cascarilla	2.1781
Total	48.0404
Momento(Nm)	5.31889528
Velocidad Angular(rad/s)	0.8337
Tiempo(s)	7.53
Aceleración Angular	0.11071713
Potencia	4.434363
FS	
C1	1.25
C2	1
C3	1.15
Potencia Real(HP)	0.009

Térmico

Para la sección del análisis térmico lo que se desea conseguir es la temperatura superficial que tiene la chimenea, además de como esta se distribuye dentro de los cilindros internos de tal manera que permita conseguir una distribución uniforme a lo largo de toda su estructura. Para ello se hace uso del paquete informático COMSOL, en dónde el objetivo es conseguir observar la temperatura en el análisis de estado estable.

Se puede mencionar que las condiciones con las cuales se realizó el estudio son: flujo de calor de 800[W], flujo másico de 0.16[kg/s], 190°C, tubos pequeños ingresa aire a 25°C 0.1 [kg/s], en estado estable, salidas de presión en las caras opuestas al ingreso del flujo. Esto se ve reflejado en la figura 27, donde se muestra la configuración de los parámetros, y los resultados de interés.

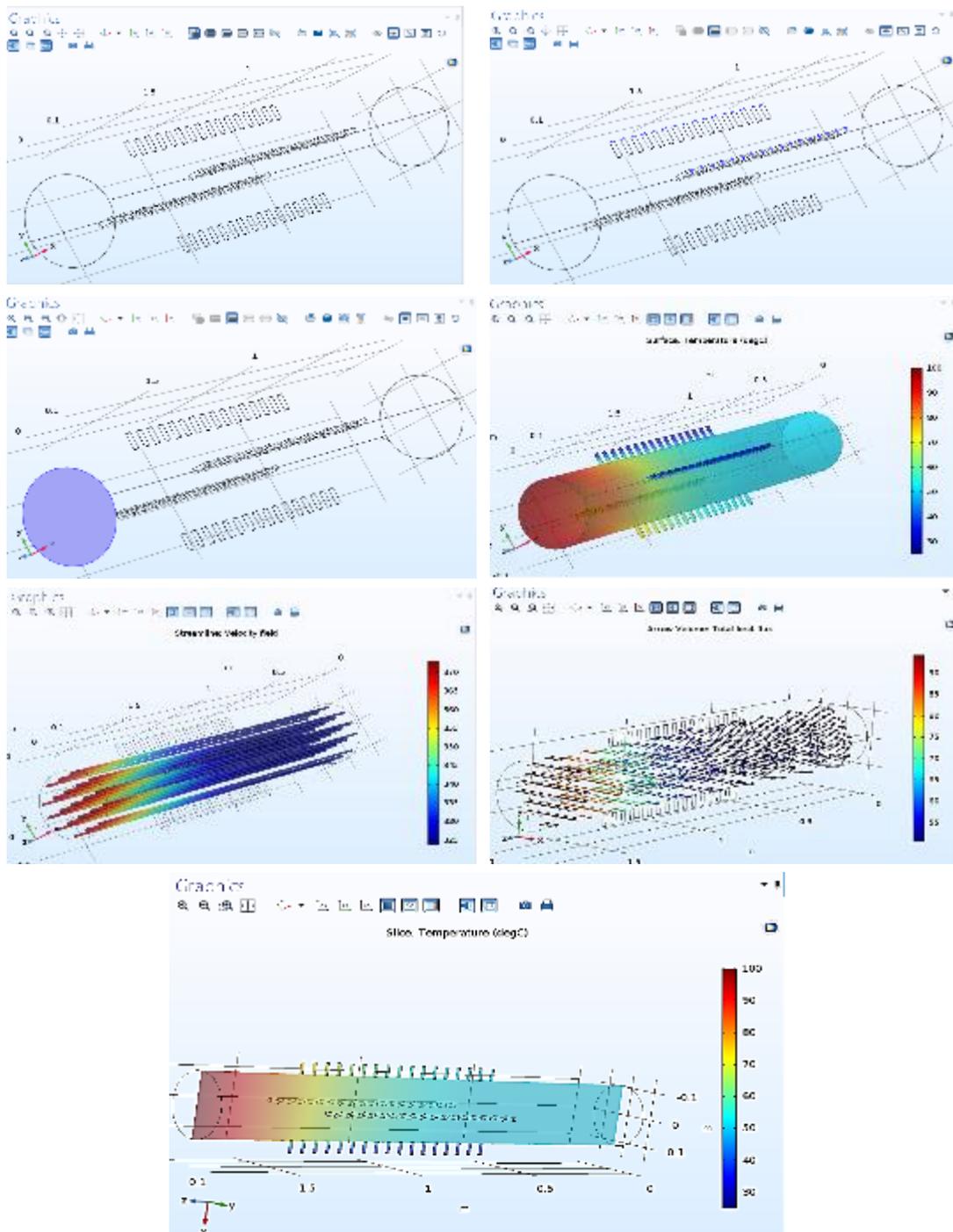


Figura 27: Resultados de Simulación en estado estable para la chimenea.

De la figura 27, se puede mencionar que brinda la idea de cómo se distribuye el calor a lo largo de todo el cilindro central y cuál es la zona que llega a recibir un mayor flujo de calor dentro del equipo. De igual forma, se llega a apreciar como interactúa el fluido con los cilindros entrecruzados, que son partes relevantes dado que permiten transferir calor a los gases del proceso, y así aumentar la temperatura dentro del ambiente interno del reactor.

Se procede a realizar las primeras pruebas de equipo para comprobar que es posible producir Biochar, con lo cual se desea tener un registro del proceso para llegar a tener control del proceso, se utilizó un pirómetro, para tomar temperaturas superficiales del equipo, los resultados del proceso realizado durante 1h, se ven reflejados en la Tabla 11, y los puntos dónde se realizó las mediciones se observa en la figura 28. Con lo cual la temperatura aproximada del producto al final del proceso fue de 330°C, y se llega a tener un Biochar dentro de los rangos establecidos para el proceso de Pirólisis Convencional.

Tabla 11: Mediciones realizadas, al equipo durante la prueba de producción de Biochar, 10 kg de biomasa, y 1h de proceso.

Tiempo	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Media	180	45	148	38	185	90	120
Final	335	53	187	39	212	115	140
Salida	35	60	190	56	225	128	160
Producto	330						

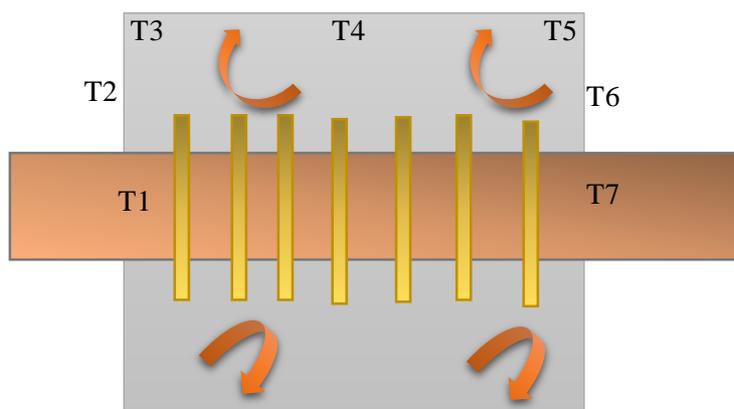


Figura 28: Esquema que muestra los puntos en los cuales se llevó el registro de temperaturas durante el proceso, y a la derecha se ve la pila del producto obtenido al finalizar el mismo, la temperatura fue de 330°C.

SEM

El equipo fue probado, en diferentes cargas de material, entre 5,15, y 20 Kg. Además, la velocidad angular promedio con la cual fue elaborado el producto fue de 3.3 rpm, en promedio, de igual manera la llama utilizada fue constante, generando un registro de temperaturas, Tabla 11. Por otra parte, se procede a cultivar el hongo en el sustrato, cabe destacar que el proceso previo es la eliminación de todos los restos de ceniza en el Biochar, con la finalidad de tener un sustrato mucho más limpio.

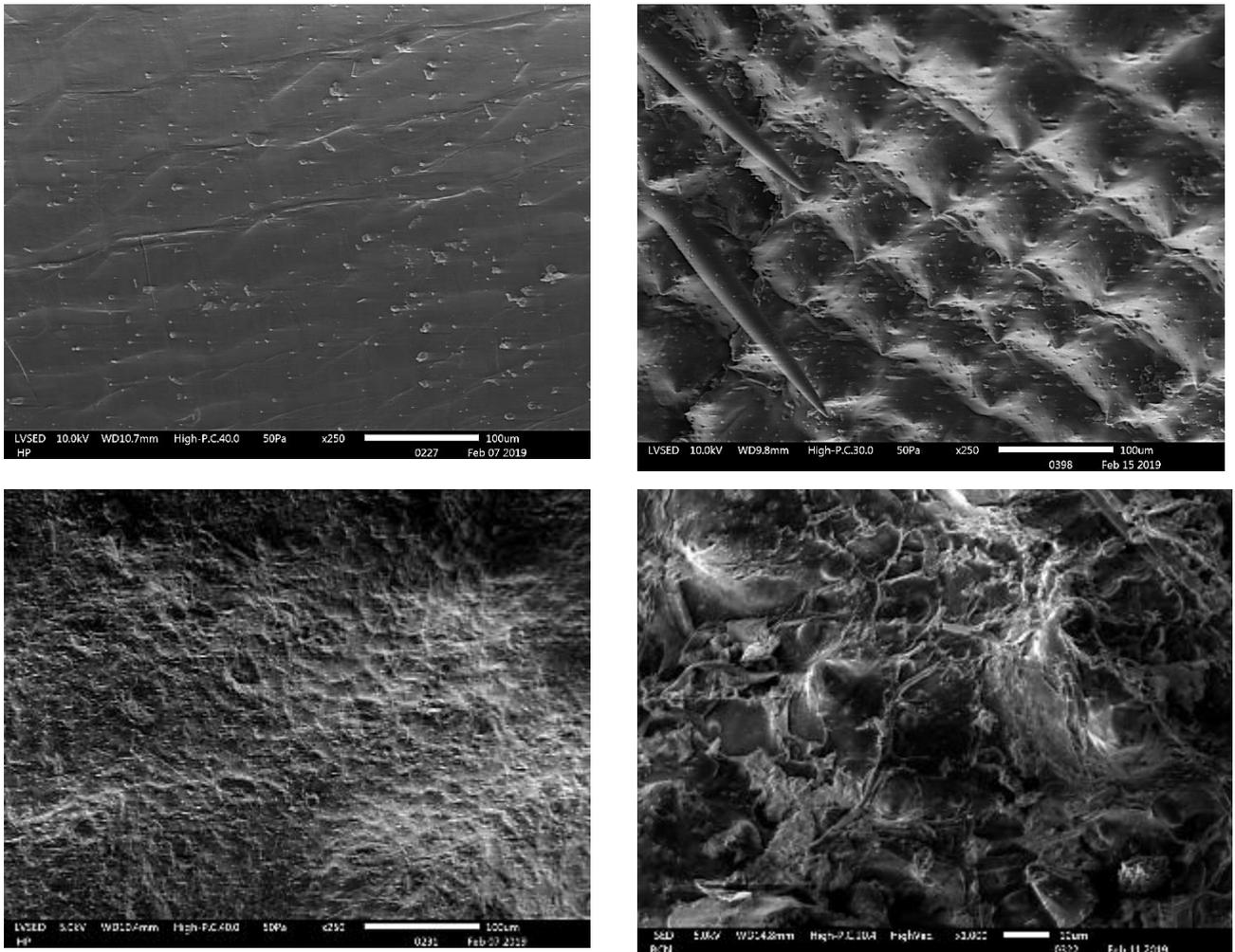


Figura 29: De izquierda a derecha, se llega a observar la porosidad superficial del Biochar producido dentro del reactor, con 10kv de carga, 1h de proceso, y 3.3rpm. En cada imagen se nota las condiciones de trabajo del equipo, SEM, cabe mencionar que tanto 5kV, y 10kV, son de para análisis superficiales la última es muestra del producto convencional.

Al completar el equipo, se puede afirmar que el problema del cliente es la escasa calidad del producto que se utiliza convencionalmente como sustrato, al tomar como referencia la figura 29, empezando desde la imagen superior izquierda, se llega a apreciar las divisiones celulares de la materia prima, cascarilla de arroz seca, a su derecha se aprecia la superficie de la misma luego de haber estado

30 minutos del reactor, lo cual refleja algunos picos, y una superficie poco paralizada, en la esquina inferior izquierda se puede apreciar el Biochar producido dentro del equipo fabricado, y a lado derecho de esta se tiene una captura del producto utilizado convencionalmente en el cual se puede ver claramente que esta poco pirolizada, sin embargo, se puede afirmar que este producto no es uniforme, es decir puede que esta muestra este poco pirolizada, de igual manera también puede existir la posibilidad que este sobre pirolizada es decir que en su mayoría sea ceniza.

La finalidad que tiene el estudio de imágenes dentro del microscopio de barrido es examinar la superficie del producto, ver la porosidad superficial que este llega a tener luego del proceso termoquímico, Pirólisis, a diferentes tiempos de residencia dentro del reactor.

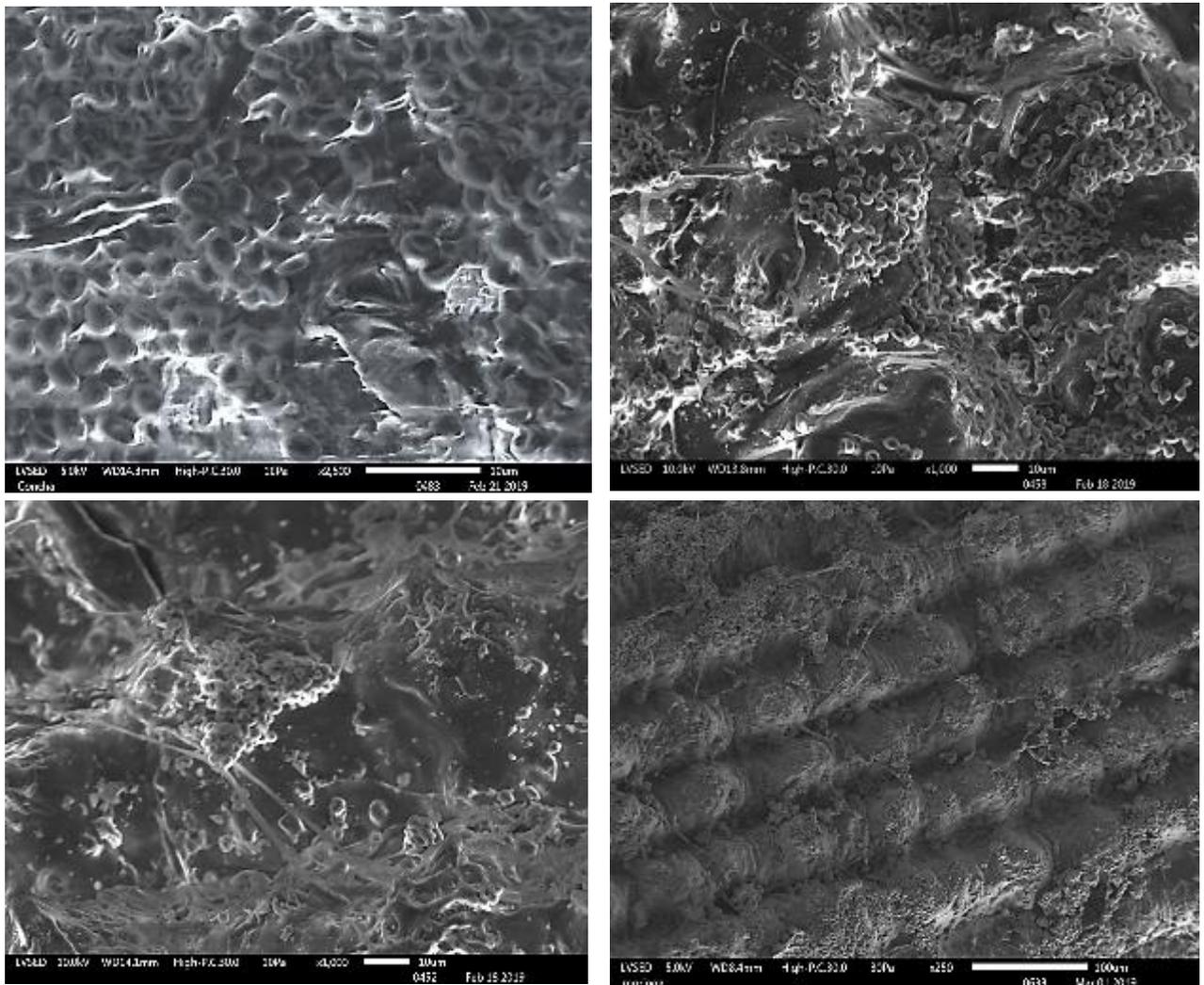


Figura 30: Primeras cepas cultivadas en la superficie del producto, Biochar, se las llega a notar dispersas a las cepas de forma uniforme.

Las ventajas que posee el hongo, es el hecho de que es adaptable a cualquier ambiente en el cual se encuentre, es decir que su capacidad para crecer en cualquier tipo de sustrato es mayor a los demás. Por otro lado, luego de haber comprobado que el producto posee gran porosidad y carbón, fijo se puede llegar a ver las cepas del hongo germinando en la superficie del Biochar, esto se ve reflejado en las imágenes a continuación como se llega apreciar de ciertos destellos blancos en la superficie del Biochar.

Posterior a ello, se desarrolla el hongo, dónde se puede observar de igual manera dentro del SEM, como de las diferentes cepas depositadas en la superficie como el hongo llega tomar control y expandirse, tomando como referencia la figura 30, del crecimiento característico de este hongo que es similar a un árbol expandiendo sus ramas, se puede afirmar que el hongo fue capaz de ser cultivado en Biochar. Sin embargo, no es posible definir su familia, ni si este llega a tener un crecimiento menor o mayor al cual se puede observar en las imágenes posteriores, pero se puede afirmar que el Biochar producido dentro del reactor manufacturado, es capaz de servir como sustrato apto para el cultivo del *Trichoderma Harzianum*.

Se procede a comprobar la calidad del producto mediante el uso del equipo, SEM, y el detector EDS, es decir realizar un análisis de elemental para la composición química, para ello se utiliza una pequeña porción del producto, esta debe ser lo suficientemente uniforme para que llegue a ser representativa. Se analizó diferentes sectores, llegando a tener el siguiente espectro, figura 31.

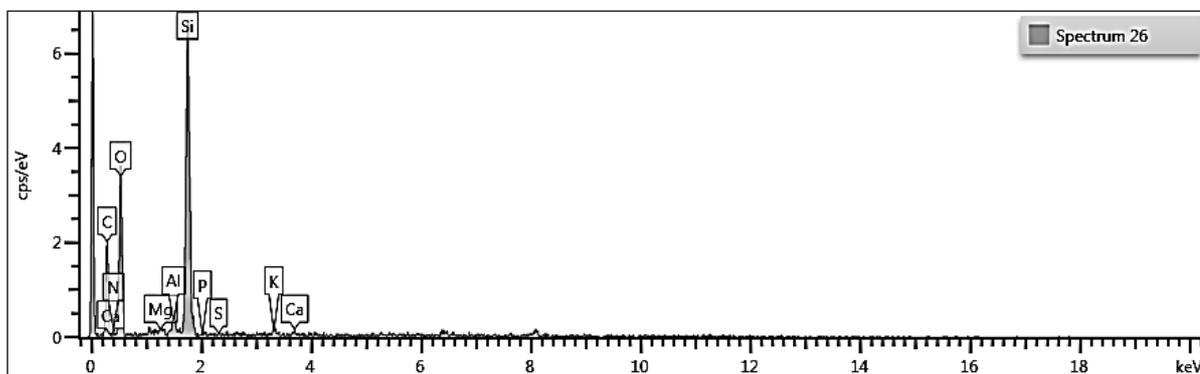


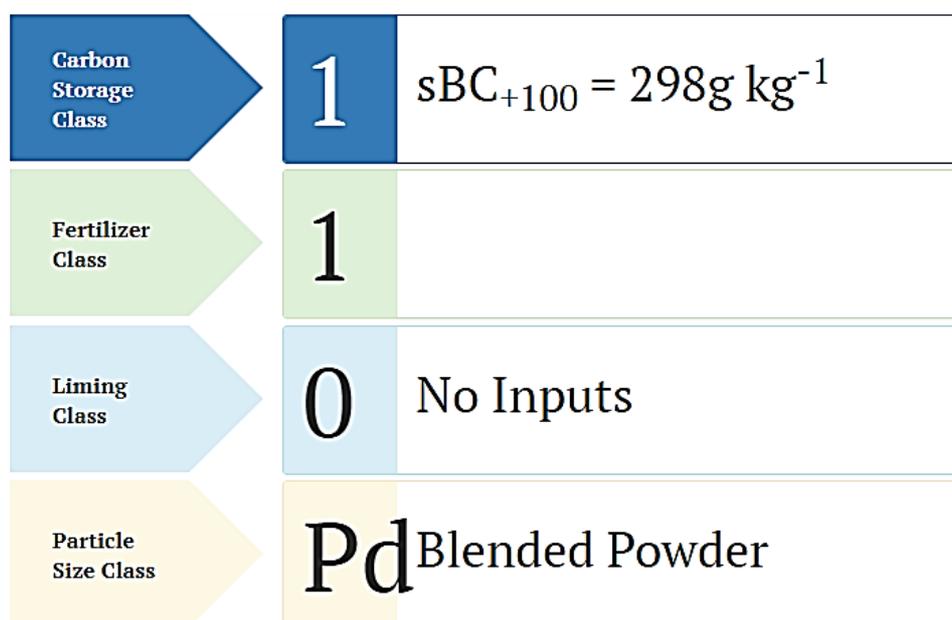
Figura 31: Espectro dónde se observan los picos de los elementos detectados en la muestra, se observan elementos que están en cantidades mayores al 1%, debido al detector.

El equipo permite cuantificar los elementos presentes en la muestra.

Tabla 12: Cuantificación de elementos presentes en la muestra.

Spectrum Label	Spectrum 18	Spectrum 19	Spectrum 20	Spectrum 21	Spectrum 22	Spectrum 23	Spectrum 24	Spectrum 25	Spectrum 26
C	24.56	23.67	27.35	23.26	23.90	29.70	24.17	24.47	25.84
N	-	-	-	-	-	-	-	-	1.87
O	66.53	66.41	66.45	66.51	66.51	66.43	66.51	66.51	66.82
Na						0.03			
Mg	0.02	0.06	0.08	0.01	0.04	0.08	0.02	0.03	0.10
Al			0.05			0.08	0.10		0.27
Si	8.59	9.29	5.58	9.87	9.22	3.15	8.88	8.64	4.85
P	-	0.03	0.07	0.01	0.01	0.08	0.01	-	0.03
S	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01
Cl	0.06	0.12	0.08	0.07	0.07	0.09	0.06	0.05	
K	0.14	0.27	0.25	0.15	0.14	0.24	0.13	0.14	0.14
Ca	0.01	0.01		0.01	0.01	0.02	0.01	-	0.07
Mn						0.01			

Las herramientas brindadas por IBI, permiten utilizar los resultados obtenidos en la Tabla 12, y la relación H/C_{org} que se realiza mediante una reducción, y estequiometría, para aproximar la cantidad de H, por la cantidad de agua. Con lo cual, al utilizar los valores dentro de la herramienta presentada por IBI, se obtiene los siguientes resultados.



Los resultados muestran que el potencial del producto para secuestrar el carbón, de igual manera para su uso como fertilizante no es muy importante, dado que su grado es 1, es decir es capaz de aportar solo un nutriente, en liming no se tiene aportes dado que no presenta cantidades mayores al 1% dentro de análisis, para finalizar, su tamaño de partícula, se conoce que en su mayoría son menores a 2[mm].

CONCLUSIONES

Por lo tanto, se implementó un reactor capaz de funcionar bajo los principios de Pirólisis lenta, el cual cumple con los requerimientos planteados por el cliente, se consideraron parámetros de diseño, los cuales fueron tomados en base a manuales guías como Handbooks for industrial Drying. Aparte, se comprobó que el hongo fue capaz de ser cultivado en el sustrato, Biochar, con la finalidad de obtener, un producto de calidad. El Biochar, producido es mucho más uniforme y de mejor calidad al convencional, como lo evidencia la figura 29. Además, el hongo fue capaz de crecer en este sustrato, lo cual se ve reflejado en la figura 30, a diferentes concentraciones como las cepas del mismo llegan a expandirse sobre toda la superficie. Por lo cual, se cumplió con los criterios planteados al inicio del proyecto, de igual forma con los requerimientos del cliente, se consiguió solventar el problema con un equipo de bajo costo con respecto a un equipo industrial, fácil de usar, no requiere mantenimiento constante, y es seguro.

De igual manera, se cumplió con el criterio de bajo presupuesto, sin embargo, se puede agregar que el equipo cumple con los parámetros de Pirólisis lenta, se probó el equipo con un único tipo de biomasa, con la cual trabaja el cliente obteniendo resultados favorables.

Como trabajo futuro se propone que el equipo puede ser mejorado aún más, para tener más control de las variables de interés, como temperaturas del proceso, y calentamiento. La investigación puede ser realizada en base a los beneficios que trae al suelo los dos productos como son: *Trichoderma Harzianum*, en conjunto con el Biochar.

Recomendaciones y Trabajo a Futuro

Como proyectos con los cuales se puede seguir indagando dentro del campo del Biochar, se puede partir del hecho de que es un producto muy versátil es decir a parte del hecho que puede ser obtenido mediante diferentes procesos de Pirólisis, la materia prima puede ser cualquier residuo orgánico, se puede empezar por los beneficios pueden ser obtenidos al trabajar con diferentes tipos de biomasa, que cambia dentro del proceso.

El uso del paquete informático que permita simular el comportamiento del material granulado dentro del reactor en movimiento y con el flujo de calor indirecto, es decir un análisis CFD-DEM. Con ello es posible disminuir tiempo de pruebas, de igual manera la mejora continua del equipo, el mismo cumple con los requerimientos básicos, planteados por el cliente, pero puede ser mejorado mediante un sistema de termómetros y termocuplas que permitan tener más control sobre el proceso.

Bibliografía

- Bergman, T., Lavine, A., & Incropera, F. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons.
- Brown, R., & Brown, T. (2003). *Biorenewable Resources: Energy New Products from Agriculture*. Iowa: Wiley Blackwell.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley's*. México: Editorial MCGRAW-HILL.
- Duda, W. (1977). *Manual Tecnológico de Cemento*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A.
- IBI. (16 de 04 de 2018). *Quiénes somos*. Obtenido de IBI: <https://biochar-international.org/about-ibi/>
- IBI, I. B. (16 de Abril de 2019). *IBI BIOCHAR CLASSIFICATION TOOL*. Obtenido de International Biochar Initiative: <https://biochar-international.org/biochar-classification-tool/>
- Labahn, O. (1983). *Cement Engineer's Handbook*. Berlín: B.Kohlhass.
- Mohammed, E., Sánchez, C., Ahmed, S., & Requena, M. E. (11 de Mayo de 2004). *Trichoderma harzianum como biofungicida para el biocontrol de Phytophthora capsici en plantas de pimiento*. Obtenido de Anales de Biología: [http:](http://)
- Siemens. (s/f de s/f de 2018). *Lagrangian Multiphase Flow-Particle Motion*. Obtenido de Star-CCM+ Documentation: <file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/13.02.011-R8/STAR-CCM+13.02.011->

R8/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP%2FGUID-1CAF3A65-9203-4AFF-8316-70CBEA981BDB%3Den%3D.html%23wwID0EOWP4C

UNAM. (s/f de s/f de s/f). *Metodología de Diseño* . Obtenido de UNAM:

<http://www.ingenieria.unam.mx/~guiaindustrial/disenoinfo/3/6.htm>

Calvache Ulloa, M. (2016). El Suelo Y La Productividad Agrícola En La Sierra Del Ecuador, (October 2014).

EDEM. (n.d.). *What Is DEM. Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM)*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6869-0_2

Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>

Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K.-H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 227(June), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.082>

Ministerio de Agricultura. (2017). Plan Nacional De Gestión De Suelos.

Peterson, S. C., Jackson, M. A., Kim, S., & Palmquist, D. E. (2012). Increasing biochar surface area: Optimization of ball milling parameters. *Powder Technology*, 228, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.005>

Yargicoglu, E. N., Sadasivam, B. Y., Reddy, K. R., & Spokas, K. (2015). Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. *Waste Management*, 36, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.029>

Anexo A: Resolución

```

%Proyecto Valeria
%Carga y descarga de Elevador Recto
%CR9

%-----Geometría-----
%Se procede a ingresar los datos relevantes del Elevador
%Todas las Unidades en SI
format short
Ri=0.3;
re=0.15;
L=0.1;
la=0.03;
mu=0.45;
vR=0.0025; %Se conoce por Kelly & Purcel
%-----Recorrido-----
y=linspace(0,130,130);
teta=y'; %Posición del lifter(fila,columna)
%Ángulo de cuña vs posición(beta)
cu=16.6992;
%atand((la)/(Ri-L))
t=length(teta);
R=[];%Alamcen para los ángulos dinamico de resposo
%Se procede a determinar el tetar que por medio del modelo matematico de
%Scholfiel&Glinkin,1962
%-----Carga Máxima-----
z= (mu+vR)/(1-(vR*mu));
ho=((L*la)*(re-(0.5*L))/(re-L))+((0.5)*(L^2)*(tand(z)))
%-----Cálculo-----
i=1;
j=1;

%-----Dinamico de reposo-----

for i= 1:t
    tetr= atand((mu+vR*(cosd(teta(i))-(mu*sind(teta(i)))))/(1-
(vR*(sind(teta(i))+(mu*cosd(teta(i)))))));
    %Almacenar los resultados
    R(i,1)= tetr;
end
%-----teta, y tetr-----
R;
T=teta;
E=zeros(t,1);

%-----Acu-----

for j=1:t
    if T(j)< R(j)
        hi =(((L*la)*(re-(0.5*L)))/(Ri-L))+((0.5*(L^2))*tand(R(j)-T(j)));
        E(j,1)=hi;
    end
    if T(j)> R(j) && (T(j)-R(j)-cu) < 0
        hi =(((L*la)*(re-(0.5*L)))/(Ri-L))-((0.5*(L^2))*tand(R(j)-
T(j)));

```

```

    E(j,1)=hi;

    else (T(j)-R(j)-cu)>=0 && tand(T(j)-R(j)-cu)<la/L;
        hi= ((L*la)*(Ri-(0.5*L))/(Ri-L))-
        ((0.5*(L^2))*(tand(cu)+(tand(T(j)-R(j)-cu))));
        E(j,1)=hi;
    end
    if T(j)>R(j) && (T(j)-R(j)-cu)>0 && tand(T(j)-R(j)-cu)>= (la/L)
        hi=(la^2)/(2*tand(T(j)-R(j)-cu));
        E(j,1)=hi;
    end
    if T(j)-R(j)-cu == 90
        hi=0;
        E(j,1)=hi;
    end
end

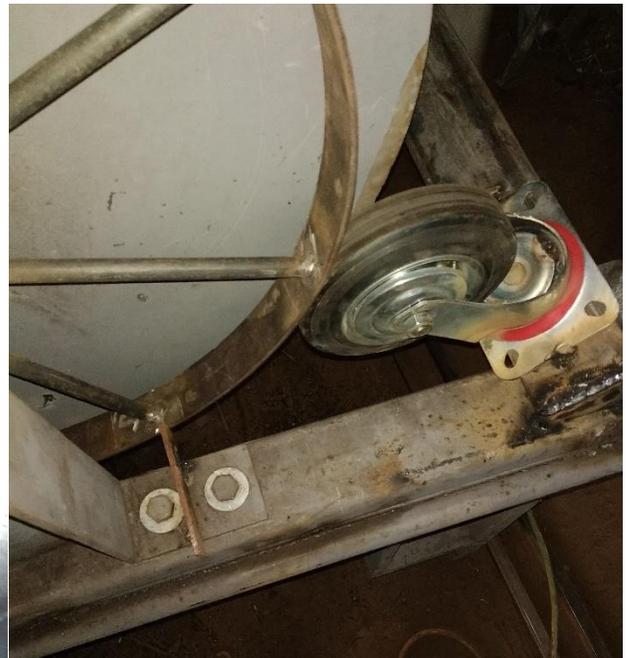
end

E
%-----Grafica-----
plot(teta,E)
grid on
title('Descarga Elevador Recto');
xlabel('Grados');
ylabel('m^3/m');
%-----CR9-----

```

Anexo B: Construcción





Anexo C: Planos

Los planos se adjuntan como anexos a parte, son los planos a detalle del equipo manufacturado, tales como:

- Reactor en conjunto
- Estructura Metálica
- Chimenea
- Codos de la chimenea
- Polea Motor-Banda
- Soporte de la Chimenea
- Tambor-Ubicación de Elevadores
- Tapa de la cobertura
- Tapa de ingreso y salida de biomasa
- Volante de las Ruedas
- Cobertura para el Reactor