

HORNO PIRÓLISIS

CAMPO TÉCNICO

- 5 La presente divulgación se relaciona con hornos para la degradación termoquímica de biomasa.

DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE LA TÉCNICA

- 10 Los hornos de pirólisis se utilizan para convertir materiales orgánicos en productos útiles. El proceso de pirólisis, se utiliza para descomponer materiales orgánicos en sus componentes básicos, como gases, líquidos y sólidos, y en algunos casos, también se pueden obtener subproductos valiosos como el biogas o el bioaceite.
- 15 Los hornos de pirólisis se utilizan en diversas aplicaciones, como en la producción de biocarbón, un producto carbonoso similar al carbón vegetal utilizado como combustible o en la agricultura para mejorar la calidad del suelo. También se utilizan en la producción de bioaceite, que es un líquido que se utiliza como biocombustible o materia prima para la producción de productos químicos. Además, el proceso de pirólisis también se utiliza
- 20 en la eliminación segura de residuos peligrosos, como neumáticos usados, y en la recuperación de metales de residuos electrónicos.

Por lo anterior, se hizo una búsqueda del estado de la técnica en la que se encontraron los documentos WO2021066664A1, CN101231144B y el artículo *Application Of Pyrolysis*

- 25 *To Remove Hydrogen From An Organic Nuclear Waste*, los cuáles se describen a continuación.

- El documento WO2021066664A1 divulga un proceso e instalación para producir carbón vegetal y líquidos piroleñosos a partir de materia vegetal leñosa o herbácea, que
- 30 comprende las etapas de: homogeneización de la materia prima (biomasa B); secado de la biomasa en el horno de secado; carga de la biomasa en un contenedor cilíndrico y extraíble; introducción de un recipiente cilíndrico y extraíble en el horno del reactor de

pirólisis; pirólisis de la biomasa; condensación de los gases y vapores condensables que salen del reactor de pirólisis; extracción del recipiente cilíndrico extraíble del horno y descarga del carbón vegetal desde el interior del recipiente cilíndrico extraíble; lavado de los gases no condensables; decantación de los líquidos piroleñosos.

5

Además, el proceso comprende las etapas de: recirculación parcial de los líquidos piroleñosos desde los depósitos colectores de líquido de condensación piroleñosa (L1), por una bomba de recirculación, a través de un circuito de recirculación (LA) que alimenta boquillas de lavado en conductos; enjuague constante de estos conductos, para evitar que se obstruyan con depósitos de alquitrán vegetal presentes en los vapores y gases de pirólisis.

10

Adicionalmente, el documento WO2021066664A1 divulga que el reactor de pirólisis comprende un recipiente cilíndrico extraíble y un horno que comprende un revestimiento de ladrillo refractario. Los soportes sirven para sostener una brida que a su vez soporta el recipiente cilíndrico extraíble en el reactor de pirólisis y en el que se carga la biomasa B y del cual se descarga el carbón después de la reacción de pirólisis.

15

Además, los gases no condensables se pueden utilizar en un quemador externo para generar calor para otros procesos, o se pueden utilizar para activar grupos motogeneradores para la producción de energía eléctrica. Durante la puesta en marcha de la instalación y en el tiempo, es posible verificar la necesidad de una fuente de energía externa en cada reactor de pirólisis para salvaguardar las temperaturas de proceso deseadas; para ello se podrán utilizar quemadores de pellets u otro combustible disponible.

20

25

También, el contenedor cilíndrico y removible es de cierre hermético, tiene una sola salida de vapores y gases de pirólisis con un dispositivo que permite la liberación de los vapores y gases liberados por la biomasa B, pero no permite la entrada de aire del exterior.

30

Por otro lado, en la parte superior del horno de dicho reactor de pirólisis existe una brida que contiene una junta que hace de cierre hermético entre el horno y el recipiente cilíndrico y desmontable.

- 5 Por su parte, el documento CN101231144B divulga un horno rotatorio de calentamiento externo que comprende un cilindro interno del horno que gira alrededor de un eje y un cilindro externo para guiar el gas de calentamiento para que fluya alrededor del cilindro interno del horno y calienta dentro del cilindro un objeto tratado mientras se transmite axialmente. El cilindro interior del horno se apoya de forma giratoria sobre un extremo lateral móvil que se desplaza axialmente y sobre un extremo lateral fijo; un dispositivo para medir el estiramiento por calor axial del cilindro interior del horno y una pluralidad de termómetros sin contacto para medir las temperaturas de la carcasa (T11 a T32) en una pluralidad de posiciones en la dirección axial del cilindro interior del horno desde una parte de la pared externa del cilindro externo. La temperatura en el horno rotatorio que
10 gira alrededor del eje se puede medir con precisión y corresponde a la temperatura del objeto tratado para que se pueda ejecutar el control de la temperatura de calentamiento.

- Además, el documento CN101231144B divulga que el cilindro exterior está fijado a la parte de montaje por un miembro de soporte en un estado que permite que el cilindro interior gire y se mueva en la dirección axial, y proporciona un sello entre el cilindro exterior y el cilindro interior. Toda la superficie interior del cilindro exterior está cubierta con un material aislante. Un lado del espacio interior (el lado del cilindro interior) está dividido por la pared divisoria en toda la longitud del cilindro exterior. La parte de introducción de gas de calefacción está definida en el lado inferior de la parte divisoria, y la parte de suministro de gas de calentamiento se define en el lado superior de la parte divisoria, y se forma una ruta de flujo de gas de calentamiento desde la parte de introducción a la parte de transporte. La parte de introducción del cilindro exterior está conectada a la tubería de suministro a través de la cual se suministra el gas de calefacción desde el horno de combustión de gas de calefacción. Por otro lado, la parte de transporte
25 del cilindro exterior está conectada a la calefacción compuesta reguladora de cantidad de gas y el ventilador de tiro inducido a través de la tubería de suministro de gas de calefacción.

Adicionalmente, en una modalidad el horno rotatorio es calentado externamente y se utiliza como horno de carbonización para proporcionar combustible a partir, por ejemplo, de residuos orgánicos, la temperatura de carbonización se puede mantener a una temperatura adecuada de acuerdo con la proporción residual requerida.

Por otro lado, el artículo *Application Of Pyrolysis To Remove Hydrogen From An Organic Nuclear Waste* divulga un estudio sobre la influencia de cinco condiciones operativas (temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de meseta, caudal de gas inerte y masa inicial de resina) sobre la distribución del producto de pirólisis. Los datos experimentales analizados se basan en los balances de masa total y parcial, así como a los balances elementales (C,H,O,N) de la composición de gases incondensables por cromatografía de gases, el análisis elemental de resina epoxi, alquitrán y char, y la aplicación de un método de reconciliación de datos.

También, el artículo *Application Of Pyrolysis To Remove Hydrogen From An Organic Nuclear Waste* divulga una unidad piloto que consiste en un horno horizontal cuya salida está conectada a una serie de filtros para la limpieza de los gases de escape. El horno está equipado con dos cilindros horizontales conectados consecutivamente que operan a baja presión. La zona 1 tiene un diámetro interno de 132 mm y una longitud de 512 mm. La zona 2 se diseñó para un tratamiento de gases oxidantes de poscombustión. Estas dos zonas están conectadas por un tubo interno de 16 mm con una longitud de 32 mm.

Finalmente, en las figuras del artículo *Application Of Pyrolysis To Remove Hydrogen From An Organic Nuclear Waste* se puede observar cómo cada zona o cada cilindro posee una resistencia que rodea a cada cilindro.

Sin embargo, los documentos mencionados anteriormente no divulgan hornos de pirólisis estáticos que comprenden varias fuentes de calor.

BREVE DESCRIPCIÓN

La presente divulgación corresponde a un horno de pirolisis, que comprende un recipiente, una resistencia eléctrica calefactora ubicada dentro del recipiente, una cámara ubicada dentro del recipiente, donde la cámara está rodeada por la resistencia. Además, en la cámara se introduce una biomasa a para ser convertida en biocarbón.

5

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La FIG. 1A ilustra una vista isométrica de un horno que tiene una forma cilíndrica.

10 La FIG. 1B ilustra una vista isométrica, una vista frontal de un horno que tiene una forma cilíndrica y una vista frontal de unas resistencias eléctricas.

La FIG. 2 muestra una gráfica del comportamiento del proceso de pirolisis en una prueba 1.

15

La FIG. 3 muestra una gráfica del comportamiento del proceso de pirolisis en una prueba 2.

La FIG. 4 muestra una gráfica del comportamiento del proceso de pirolisis en una prueba 3.

20

La FIG. 5 muestra una gráfica del comportamiento del proceso de pirolisis en una prueba 4.

25 La FIG. 6 muestra una gráfica del comportamiento del proceso de pirolisis en una prueba 5.

La FIG. 7 muestra una gráfica del comportamiento del proceso de pirolisis en una prueba 6.

30

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Un horno de pirólisis es un horno que utiliza altas temperaturas para descomponer materiales orgánicos en sus componentes básicos, como gases, líquidos y sólidos. El proceso de pirólisis es un proceso termoquímico que se utiliza para degradar materiales orgánicos con un aporte limitado de oxígeno. Este proceso convierte la biomasa en
5 productos útiles, como biocarbón, bioaceite y biogases.

Durante el proceso de pirólisis, la biomasa se calienta a temperaturas elevadas, entre 300 y 800 °C, en un ambiente sin oxígeno para evitar la combustión. La biomasa se descompone térmicamente en sus componentes básicos, como gases, líquidos y sólidos.

10

En la primera etapa del proceso, se producen gases y vapores. La liberación de gases depende de la temperatura y el tipo de biomasa utilizada. Los gases generados incluyen hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono, azufre, en dependencia del tipo de biomasa transformada.

15

En la segunda etapa del proceso, los vapores y gases producidos en la primera etapa se someten a una serie de reacciones químicas y físicas para formar líquidos y sólidos. Los líquidos formados se denominan bioaceites y se pueden usar como biocombustibles o como materia prima para la producción de productos químicos. Los sólidos que se forman
20 se denominan biocarbón y se utilizan como combustible o como aditivo para mejorar la calidad del suelo.

El proceso de pirólisis puede ser lento o rápido, dependiendo de la temperatura, tiempo y la velocidad de calentamiento. El tiempo de residencia en el horno de pirólisis varía de
25 unos pocos minutos a varias horas, según la escala de producción, el tipo de biomasa utilizada y el producto final deseado.

Así mismo, la presente divulgación permite la construcción de un horno de pirólisis, el cual, se calienta mediante resistencias eléctricas calefactoras evitando así el uso de
30 combustibles fósiles para generar el bioaceite, biocarbón o biochar que se obtiene del horno de pirólisis, como también para reducir los gases de efecto invernadero que son los que causan daño al medio ambiente.

Para el entendimiento de la presente divulgación, se entenderá por biochar a un tipo de carbón vegetal producido mediante el proceso de pirólisis de biomasa, como residuos agrícolas, madera o cultivos energéticos, en ausencia casi completa de oxígeno. Durante
5 el proceso de pirólisis, la biomasa se calienta a altas temperaturas (generalmente entre 300 y 700 °C) en un ambiente con oxígeno limitado, lo que produce un material carbonizado rico en carbono y con una estructura porosa.

El biochar es un producto que se puede utilizar como un componente adicional en sustrato
10 para plantas y en la agricultura como un mejorador de suelos con alto contenido orgánico y de elevado micro y meso-porosidad, debido a sus propiedades de retención de agua y nutrientes. También permite mejorar la calidad del suelo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura, ya que ayuda a capturar carbono en el suelo.

Además, el biochar se utiliza en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales y
15 eliminación de contaminantes, ya que tiene la capacidad de adsorber metales pesados, contaminantes orgánicos y otros productos químicos.

Haciendo referencia a la FIG. 1A y FIG. 1B, la presente divulgación corresponde a un
20 horno de pirolisis, que comprende un recipiente (1), una resistencia calefactora (2) eléctrica ubicada dentro del recipiente (1), una cámara (3) ubicada dentro del recipiente (1), donde la cámara (3) está rodeada por la resistencia calefactora (2). Además, en la cámara (3) se introduce una biomasa a ser convertida en biocarbón o biochart.

Particularmente, en el horno, se dispone un material orgánico dentro de la cámara (3),
25 luego, la resistencia eléctrica está dispuesta en la superficie externa de la cámara (3) se activa calentando dicha superficie externa de la cámara (3), calentando así la cámara (3) y por ende, calentando el material orgánico. Además, el recipiente (1) permite aislar la cámara (3) para evitar pérdidas de calor.

30 Además, el recipiente (1) es un elemento hueco que tiene un lado curvo, una primera abertura (8) y una base opuesta a la primera abertura (8), una superficie interior y una

superficie exterior, en donde la primera abertura (8) del recipiente (1) se cubre con una segunda tapa (7) que sella el recipiente para evitar las fugas de calor.

5 Así mismo, la cámara (3) es un elemento hueco que tiene un lado curvo, una segunda abertura (9) y una base opuesta a la segunda abertura (9), una superficie interior y una superficie exterior, en donde la segunda abertura (9) de la cámara (3) se cubre con una primera tapa (6) que sella el recipiente para evitar las fugas de calor y encerrar la biomasa ingresada.

10 Adicionalmente, teniendo en cuenta que la cámara (3) se introduce en el recipiente (1) de tal manera que la cámara (3) y el recipiente (1) son colineales, es decir sus centros geométricos están alineados. Lo anterior, permite que, al ser colineales, en el espacio que queda entre el interior del recipiente (1) y el exterior de la cámara (3) se ubica una o más resistencias eléctricas calefactoras (2). También, la cámara (3) y el recipiente (1) se
15 disponen de manera perpendicular respecto a cualquier superficie horizontal donde se disponga el horno.

Además, la cámara (3) y el recipiente (1) pueden tener una forma geométrica que se selecciona, entre cubos, cilindros, esferas, entre otros.

20

Haciendo referencia a la FIG. 1, el recipiente (1) y la cámara (3) del horno de pirólisis pueden tener un diseño cilíndrico. Lo anterior, se debe a que con este diseño cilíndrico la distribución de calor es uniforme en el interior del horno de la presente divulgación en comparación con un horno con recipientes y cámaras con bordes afilados y ángulos
25 rectos.

Además, el diseño cilíndrico del recipiente (1) y la cámara (3) ofrece mayor resistencia a la estructura, lo que la hace menos propensa a deformarse o agrietarse bajo altas temperaturas y presiones.

30

Así mismo, el diseño cilíndrico también puede contribuir a mejorar la eficiencia energética del horno de pirólisis. Esto se debe a que la forma cilíndrica permite un mejor

aprovechamiento del calor generado por la resistencia eléctrica calefactora (2), lo que reduce las pérdidas de energía.

5 También, el diseño cilíndrico permite una limpieza más fácil y completa del horno de pirólisis. Al no tener bordes afilados y esquinas, se evita la acumulación de residuos y cenizas en áreas de difícil acceso.

10 En una modalidad, en el exterior de la base del recipiente (1) existe un soporte que eleva el horno y provee un espacio en la parte baja del recipiente (1) para el cableado, y de esta manera procura que los cables queden bien aislados y no tengan contacto con ninguna parte del recipiente (1) para así evitar daños en los elementos eléctricos.

15 Por otro lado, el recipiente (1) consta de un diámetro de entre 300 mm y 3000 mm y una altura de entre 450 mm y 4500 mm, por lo cual se obtiene un volumen interno del recipiente (1) de entre 0.038 m³ y 31.83 m³.

20 Adicionalmente, la cámara (3) consta de un diámetro de entre 120 mm y 1800 mm y una altura de entre 350 mm y 4000 mm, por lo cual se obtiene un volumen interno del recipiente (1) de entre de 0.076 m³ y 10.2 m³. Por lo anterior, la cámara (3) tiene una capacidad para procesar una cantidad industrial de biomasa para comercializarla.

25 Además, el espesor de las paredes del recipiente (1) y la cámara es de entre 0.01 mm a 0.05 mm. También, espesor de la base del recipiente (1) y la cámara es de entre de 0.03 mm y 0.05 mm.

30 Así mismo, el recipiente (1) y de la cámara (3) comprenden una primera tapa (6) para sellar la cámara (3) y, una segunda tapa (7) para sellar el recipiente (1) y por ende el horno de pirólisis. Las tapas (6,7) deben tener una forma y tamaño que se adapte perfectamente a las aberturas (8,9) del recipiente (1) y de la cámara (3), evitando el ingreso casi total de oxígeno pero permitiendo el escape de algunos gases y humo.

En una modalidad, el recipiente (1) y la cámara (3) tienen una sola tapa para sellar ambos recipientes, de esta manera se introduce la cámara (3) en el interior del recipiente (1) y con una sola tapa, que se ubica sobre la primera abertura (8) del recipiente se sella el horno de pirólisis.

5

También, el material utilizado para fabricar las tapas (6,7) debe ser capaz de soportar las altas temperaturas que se producen en el horno durante el proceso de pirólisis sin deformarse ni derretirse. Por otro lado, las tapas (6,7) pueden contar con un mecanismo de cierre seguro y resistente para asegurarse de que no se abra accidentalmente durante el

10

Entre los mecanismos de cierre para cada tapa (6,7), se pueden seleccionar entre un cierre de rosca el cual utiliza una rosca en el borde de la tapa y el recipiente (1) o la cámara (3) para unir ambas partes. Un cierre de clip el cual utiliza clips de metal o materiales resistentes a temperaturas de entre 300 °C y 1000 °C para sujetar las tapas (6,7). Un

15

cierre de presión el cual utiliza una junta que se comprime cuando las tapas (6,7) se cierran. Un cierre de palanca el cual utiliza una palanca de metal o plástico para sujetar las tapas (6,7). Un cierre de bayoneta el cual utiliza un sistema de bayoneta que se ajusta en una ranura en el recipiente (1) y en la cámara (3).

20

Ahora bien, las tapas pueden tener un espesor de entre 0.02 mm y 0.04 mm siendo lo suficientemente resistentes para soportar las altas temperaturas.

A su vez, el recipiente (1), la cámara (3) y las tapas (6,7) se fabrican de un material seleccionado entre níquel, cromo, cerámica, acero inoxidable, hierro fundido, aluminio y equivalentes conocidos por una persona medianamente versada en la materia o combinación de los anteriores.

25

Por otro lado, el horno comprende un sistema de calentamiento que comprende una resistencia eléctrica calefactora (2) ubicada dentro del recipiente (1). En una modalidad preferida, el sistema de calentamiento cuenta con al menos tres resistencias eléctricas

30

calefactoras (2) que rodean la cámara (3) una vez ésta se introduce dentro del recipiente (1).

En una modalidad, cada resistencia eléctrica calefactora (2) tiene una potencia de entre
5 1000 W a 2000 W y entre los materiales en los que se fabrica cada resistencia eléctrica calefactora (2) es níquel, cromo, cerámica, polímeros, acero inoxidable y equivalentes conocidos por una persona medianamente versada en la materia o combinación de los anteriores.

10 Las tres resistencias eléctricas calefactoras (2) ubicadas alrededor de la cámara (3) y dentro del recipiente (1) permiten una distribución uniforme del calor en todo el proceso de pirólisis. Las resistencias eléctricas calefactoras (2), al estar colocadas en diferentes puntos alrededor de la cámara (3), generan un calor homogéneo que permite que la biomasa se descomponga adecuadamente y se transformen en biochar. Además, la
15 presencia de tres resistencias eléctricas calefactoras (2) asegura que la obtención de biochar se obtenga en un tiempo de entre 30 minutos a 60 minutos.

Además, con tres resistencias eléctricas calefactoras (2), se puede ajustar con mayor precisión la temperatura dentro del horno, lo que es especialmente importante para
20 procesos que requieren temperaturas precisas y constantes y también, para disminuir los tiempos del proceso de pirólisis.

En otra modalidad, cada resistencia eléctrica calefactora (2) comprende un extremo inferior, donde el extremo inferior tiene un elemento de sujeción, como una rosca para
25 sujetarse al interior de la base del recipiente (1).

Adicionalmente, las resistencias eléctricas calefactoras (2) hacen parte de un sistema de calentamiento que además comprende un sistema de control eléctrico que incluye un interruptor eléctrico para encender o apagar el sistema, un pirómetro ubicado en el
30 exterior del horno para medir la temperatura sin necesidad de entrar en contacto directo con la biomasa, una termocupla ubicada en el interior del horno o en contacto directo con la biomasa que se está procesando para medir la temperatura.

Además, el sistema comprende un contactor que controla la conexión y desconexión de la energía eléctrica a las resistencias calefactoras (2) y una luz piloto para indicar el estado del sistema, como si el sistema está encendido o apagado, o si se alcanzó la temperatura deseada. Los anteriores elementos controlan el sistema de energización de las resistencias eléctricas calefactoras (2).

En principio, el interruptor eléctrico es un dispositivo que se utiliza para abrir o cerrar un circuito eléctrico. Funciona como una especie de “puerta” que controla el flujo de corriente eléctrica a través de un circuito.

El interruptor eléctrico de la presente divulgación permite controlar el suministro de energía eléctrica proveniente de los paneles fotovoltaicos (4) y el inversor de voltaje (5) a las resistencias eléctricas calefactoras (2). Este interruptor puede tener una palanca o botón que se activa mediante una presión manual.

También, en una modalidad el interruptor eléctrico se puede controlar mediante dispositivos electrónicos, que se pueden programar para encender o apagar las resistencias eléctricas calefactoras (2) automáticamente. Los dispositivos electrónicos se seleccionan entre microcontroladores, micro procesadores, DSCs (Digital Signal Controller por sus siglas en inglés), FPGAs (Field Programmable Gate Array por sus siglas en inglés), CPLDs (Complex Programmable Logic Device por sus siglas en inglés), ASICs (Application Specific Integrated Circuit por sus siglas en inglés), SoCs (System on Chip por sus siglas en inglés), PSoCs (Programmable System on Chip por sus siglas en inglés), computadores, servidores, tabletas, celulares y celulares inteligentes.

Además, el pirómetro permite medir la temperatura de las resistencias eléctricas calefactoras (2) sin necesidad de estar en contacto directo con ellas. En otras palabras, es un termómetro sin contacto que mide la radiación infrarroja emitida por las resistencias eléctricas calefactoras (2) para determinar su temperatura.

Existen diferentes tipos de pirómetros, como los pirómetros ópticos, que utilizan lentes y espejos para enfocar la radiación infrarroja en un detector, y los pirómetros de termopar, que utilizan un termopar para medir la temperatura de la superficie de un objeto.

5 Adicionalmente, el contactor eléctrico es un dispositivo electromecánico que se utiliza para controlar el flujo de corriente eléctrica en un circuito. Está compuesto por un conjunto de contactos eléctricos que se abren o cierran mediante un mecanismo electromagnético.

10 El contactor funciona mediante un electroimán que se activa cuando se aplica una corriente eléctrica al circuito. Al activarse, el electroimán atrae un conjunto de contactos eléctricos, lo que permite que la corriente fluya a través del circuito. Cuando se interrumpe la corriente eléctrica, el electroimán se desactiva y los contactos se separan, lo que corta el flujo de corriente.

15

Los contactores pueden ser controlados manualmente o mediante un sistema de control automático, como un PLC (controlador lógico programable) o un sistema SCADA (supervisión, control y adquisición de datos). También pueden estar diseñados para ser a prueba de explosiones o para soportar condiciones ambientales extremas.

20

Finalmente, la luz piloto ubicada en el exterior del horno que tiene como función emitir una señal luminosa la cual servirá para saber si el sistema está encendido o apagado.

Ahora bien, el sistema de calentamiento funciona de la siguiente manera, el interruptor enciende al pirómetro, el cual dependiendo de la temperatura a la que este programado y de la temperatura que está sensando, emite una señal a una bobina del contactor, que cumple la función de cerrar o abrir el circuito de fuerza. Cuando el contactor está en modo “normalmente cerrado”, significa que el circuito está cerrado, es decir las resistencias eléctricas calefactoras (2) están siendo energizadas y esto es reflejado en el

25

30 indicador de la luz piloto que se tiene en una caja de control.

Cuando el contactor está en modo “normalmente abierto” las resistencias eléctricas calefactoras (2) están sin energizar, esto se debe a que el pirómetro no manda señal de cerrado a la bobina del contactor, debido a que la temperatura sensada debe estar en un rango superior a la temperatura que se programa como límite en el pirómetro; como
5 también puede ser que el sistema este apagado, esto certifica si el indicador de la luz piloto está apagado.

Por otro lado, para el funcionamiento del horno de la presente divulgación, dicho horno puede tener un consumo eléctrico de entre 5 kW y 10 kW, dicho consumo se puede
10 abastecer por medio energía renovable como lo son la energía solar, energía eólica, energía hidroeléctrica o energía geotérmica.

En una modalidad, el horno se abastece de un sistema fotovoltaico que comprende entre 5 y 25 paneles fotovoltaicos, dependiendo de la potencia de unos paneles fotovoltaicos
15 (4).

Ahora bien, para la aplicación de sistemas fotovoltaicos, es necesario determinar la radiación solar sobre superficies inclinadas, ya que el panel solar debe ir ubicado de tal forma que se aproveche la mayor cantidad de radiación solar; para ello se requieren de
20 dos datos principales: la radiación solar global media mensual (ver Tabla 1) y la latitud de la zona en la que se encuentra el horno de pirólisis de la presente divulgación.

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

Nota. Recuperado de (Matute, 2020)

Tabla 1.

A continuación, con estos datos es necesario calcular dos factores importantes que definen el rendimiento del sistema solar que son: el ángulo de inclinación óptimo β y la orientación óptima α (azimut) de los paneles fotovoltaicos (4).

Donde, el ángulo de inclinación β determina el ángulo de la ubicación del panel fotovoltaico (4) con respecto al plano horizontal y la orientación α (azimut) que es el ángulo de orientación donde se aprovecha de forma óptima la radiación solar a lo largo de todo el año, es decir que, el panel fotovoltaico (4) deberá inclinarse hacia el Sur en el hemisferio Norte y hacia el Norte en el hemisferio Sur.

Adicionalmente, el voltaje que genera cada panel fotovoltaico (4) es entre 20 V y 60V, y en donde el sistema fotovoltaico comprende varios paneles fotovoltaicos (4) conectados

en serie los, por lo cual, los voltajes de cada panel fotovoltaico (4) se suman, generando así una fila de entre 2 y 7 paneles fotovoltaicos (4) un total de entre 180 V y 300 V.

La corriente de generación de cada panel fotovoltaico (4) es de 10 A, al tener 5 filas de paneles solares en paralelo las corrientes se suman teniendo así 50 A.

Ahora bien, el panel fotovoltaico (4) se utiliza para suministrar energía a un inversor de voltaje (5), que a su vez suministra energía a las resistencias eléctricas calefactoras (2).

El inversor de voltaje (5) es un dispositivo que convierte la corriente continua (DC) generada por los paneles fotovoltaicos (4) en corriente alterna (AC), que es la forma en que se entrega la electricidad al horno. Los paneles fotovoltaicos (4) generan energía en corriente continua, que es adecuada para cargar baterías, pero no es compatible con la mayoría de los dispositivos y sistemas eléctricos convencionales.

Además, con el inversor de voltaje (5) se puede alimentar directamente el consumo eléctrico del horno y, en caso de que se genere más energía de la necesaria, se puede verter a la red eléctrica y obtener compensaciones económicas. También, el inversor de voltaje (5) puede incluir funciones de monitoreo y control remoto para optimizar la eficiencia del sistema y detectar posibles fallos.

Por lo tanto, el inversor de voltaje (5) toma la energía en corriente continua de los paneles fotovoltaicos (4) y la transforma en corriente alterna de 120 o 240 voltios, que se puede utilizar en una red eléctrica. Los inversores de voltaje (5) pueden ser conectados en serie para formar sistemas más grandes y pueden ser programados para controlar el flujo de energía en el sistema.

En un sistema de paneles fotovoltaicos (4) conectados a la red eléctrica, el inversor de voltaje (5) también puede funcionar como un controlador de potencia, limitando la cantidad de energía que se exporta a la red para cumplir con las regulaciones de la compañía eléctrica y asegurarse de que el sistema opere de manera segura y eficiente.

Ejemplos

EJEMPLO 1

- 5 En un primer ejemplo, se construyó un horno de pirólisis como el de la FIG. 1A y FIG. 1B que comprende:
- un recipiente (1);
 - tres resistencias eléctricas calefactoras (2) ubicadas dentro del recipiente (1);
 - una cámara (3) ubicada dentro del recipiente (1), donde la cámara (3) está
 - 10 rodeada por las resistencias eléctricas calefactoras (2);
 - un inversor de voltaje (5) conectado a las resistencias eléctricas calefactoras (2); y
 - un panel fotovoltaico (4) conectado al inversor de voltaje (5).

- 15 El recipiente (1) y la cámara (3) tienen una forma de cilindro que se estableció así para una presión de 275.8 Pa, fundamentada en el código ASME G-27 para el diseño de recipientes a presión, y una temperatura de trabajo no superior a 450 °C.

- 20 En cuanto al recipiente (1) este consta de un diámetro de 350 mm y una altura de 400 mm, y se obtuvo como resultado un volumen de 38,48 litros.

- El espesor mínimo de la pared del recipiente (1), se calculó a partir de los fundamentos de la norma ASME, con la finalidad de seleccionar el espesor adecuado para el horno como es el acero ASTM A36. El espesor mínimo de pared obtenido fue de 0,03mm.

- 25 Para calcular este espesor del recipiente mediante la normativa del acero ASTM A36, se utiliza la siguiente ecuación:

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

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

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

En la base del recipiente (1), se utiliza metal de 0,04 mm de espesor debido a que se necesita una base resistente para sostener las resistencias eléctricas calefactoras (2). Para las tapas (6,7) se utiliza metal de 0,03 mm.

Para el sistema de calentamiento del horno se construyó tres resistencias eléctricas calefactoras (2) tipo cartucho cada una de 1800W.

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

Además, el pirómetro es de tipo PID REX-C100, y consta de las siguientes características:

- voltaje de alimentación: 100-240VAC;
- frecuencia 50Hz/60Hz;
- resolución 14 bits;
- apto para Termopares tipo: K, J, S, E;
- relé de alarma: normalmente abierto, capacidad 250 V/3^a AC o 30 V/3^a DC;
- dimensión: 1/16 (48mm x 48mm x 110mm);
- parámetros de control PID programables individualmente;
- salida de relé: contacto capacidad 250 V CA; y
- consumo de energía: 10 VA.

También, se utiliza un contactor trifásico de 220V a 40A para la conexión y desconexión de cada una de las tres fases.

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

- La ciudad de Cuenca está ubicada al sur del país que está dentro de la línea ecuatorial, cuyas coordenadas geográficas son: Latitud -2.9005500 y Longitud -79.0045300, por lo tanto, con el dato de la Latitud se procede a calcular el ángulo de inclinación óptima para la ubicación de los paneles fotovoltaicos (4), mediante la siguiente ecuación (Barros et al., 2018).

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

Dónde:

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

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

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

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

Posteriormente, en la Tabla 2 se detalla los valores calculados de radiación efectiva sobre una superficie inclinada, considerando un ángulo de inclinación para los paneles fotovoltaicos (4) de $\beta = 15^\circ$ con un azimut $\alpha = 0^\circ$; es decir con orientación al Norte, así mismo se considera los coeficientes de perdidas, teniendo como resultado la estimación de los valores de la irradiación efectiva incidente sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos (4).

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

Nota. Recuperado de (Matute, 2020)

Tabla 2.

10

Se observa en la Tabla 2 que los valores de irradiación con una inclinación del panel de $\beta = 15^\circ$, se puede decir que los valores de radiación promedio se encuentran sobre los 4 kWh/m²/día, lo que quiere decir que en la ciudad de Cuenca existe al menos 4 horas de sol al día siendo una radiación aprovechable y aplicable para cualquier sistema solar fotovoltaico. La potencia trifásica de operación del horno es de 8.9KW.

15

Ahora bien, el sistema fotovoltaico comprende 5 filas de 6 paneles de 400W en serie, como resultado se tiene 5 entradas con una potencia de 12000W. El voltaje generado por cada panel es de 40V, al estar conectados en serie los voltajes se suman, generando así en cada fila de 6 paneles un total de 240V.

5

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

Además, las características y parámetros de operación del panel fotovoltaico (4) se
10 detallada en la Tabla 3.

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

Tabla 3.

15 También, el inversor de voltaje (5) se utiliza de la marca Growatt el modelo 15000~22000TL3-SL. Las especificaciones y características técnicas del inversor de voltaje (5) están detalladas en la Tabla 4.

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

Tabla 4.

Por lo anterior, una vez se obtiene la ubicación e inclinación adecuada para los paneles fotovoltaicos (4), en la cámara (3) del horno, se dispone como materia prima residuos forestales como: ramas de ciprés, pino, polylepis Se utilizó el 50 por ciento de la capacidad de la cámara (3) para que el calentamiento de la madera sea uniforme y tener la facilidad al momento de sacar los resultados al final del proceso.

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

En la prueba 1, el tiempo de calentamiento del horno hasta llegar a los 100 °C, fue de 5 minutos; mientras que el tiempo de pirolisis fue de 30 minutos. Para la extracción de la materia prima final, se esperó un tiempo de 10 minutos de enfriamiento del horno. En la Tabla 5, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 1; y en la FIG. 2 su representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

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

Tabla 5.

En la prueba 1 se pudo constatar, que el tiempo y la temperatura no son suficientes para generar un proceso adecuado de pirolisis, según los resultados esperados.

En la prueba 2, el tiempo de calentamiento se programó a 40 min a una temperatura constante de 150 °C, el tiempo que el horno tomo en calentarse y llegar a dicha temperatura fue de 10 minutos. Para la extracción de la materia prima final, se esperó un tiempo de 10 minutos de enfriamiento del horno. En la Tabla 6, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 2; y en la FIG. 3 su representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

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

Tabla 6.

En la prueba 2 al elevar la temperatura 50 grados más que en la prueba 1 se pudo constatar, que el tiempo y la temperatura no son suficientes para generar un proceso adecuado de pirolisis según los resultados esperados, como se muestra en la FIG. 3.

En la prueba 3, se procedió a elevar la temperatura a 200°C, el tiempo que le tomo al horno en llegar a la temperatura mencionada es de 10 minutos, una vez llegada a la temperatura de 200°C se tomó el tiempo de 50 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 12 minutos de enfriamiento del horno. En la Tabla 7, se pueden

observar los datos a detalle de la prueba 3; y en la FIG. 4 su representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

PRUEBA 3						
Fecha	Tipo de material	Temperatura	Hora de encendido	Tiempo de calentamiento	Hora de apagado	Tiempo de enfriamiento
29/3/2021	Ciprés	200 °C	10:00h	10 min	11:00 h	12 min

5 Tabla 7.

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

10

En la prueba 4, se procedió a elevar la temperatura a 250°C, el tiempo que le tomo al horno en llegar a la temperatura mencionada es de 15 minutos. Una vez llegada a la temperatura se tomó el tiempo de 60 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 15 minutos de enfriamiento del horno. En la Tabla 8, se pueden observar

15 los datos a detalle de la prueba 4; y en la FIG. 5 la representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

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

20 Tabla 8.

En la prueba 4 con la temperatura de 250 grados y una hora de pirolisis se pudo constatar, que las ramas de ciprés se carbonizaron en un 80 por ciento tomando en cuenta que para quebrar las ramas se tenía que hacer una pequeña fuerza con las manos, empezando así a sentir la eficiencia del horno.

En la prueba 5, se elevó la temperatura a 300°C, el tiempo que le tomo al horno en llegar a la temperatura mencionada es de 20 minutos. Una vez llegada a la temperatura se tomó el tiempo de 40 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 25 minutos de enfriamiento del horno. En la Tabla 9, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 5; y en la FIG. 6 la representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

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

Tabla 9.

En la prueba 5 al aumentar la temperatura a 300 grados y proceder a 30 min de pirolisis se pudo constatar, que las ramas de ciprés se carbonizaron por completo, al tener contacto con las ramas conservan su forma física, es necesario someterle una pequeña fuerza para que se descomponga siendo esta una de las pruebas más eficientes del horno.

En la prueba 6, se elevó la temperatura a 350°C, el tiempo que le tomo al horno en llegar a la temperatura mencionada es de 25 minutos. Una vez llegada a la temperatura se tomó el tiempo de 30 min, para la extracción de la muestra final, se esperó un tiempo de 30 minutos de enfriamiento del horno. En la Tabla 10, se pueden observar los datos a detalle de la prueba 6; y en la FIG. 7 la representación gráfica con el comportamiento del proceso de pirolisis.

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

Tabla 10.

- En la prueba 6 al aumentar la temperatura a 350 grados y un tiempo de pirolisis de 30 min se pudo constatar, que las ramas de ciprés se carbonizaron por completo, al tener contacto
- 5 con las ramas pierden su forma física se carboniza la parte de la lignina y la celulosa, siendo esta la prueba con resultados más favorables ya que el proceso de pirolisis tiene como resultado la carbonización de las ramas por completo obteniendo así biocarbón o biochar.
- 10 Entre la validación de resultados de las pruebas se puede apreciar que la materia prima, en este caso las ramas, durante el proceso de pirolisis sufren de deshidratación ya sea de la lignina y la celulosa, haciendo que las ramas pierdan notoriamente su peso al comparar el peso inicial con el peso del resultado cuando ya se muestran como biocarbon.
- 15 También, con esta configuración, se logró fabricar un horno que permite la obtención de biochar ingresando una biomasa como madera en el horno y realizando el proceso de pirólisis mediante unas resistencias eléctricas calefactoras (2) conectadas a un inversor de voltaje (5) y unos paneles fotovoltaicos (4).
- 20 Se debe entender que el presente desarrollo no se halla limitado a las modalidades descritas e ilustradas, pues como será evidente para una persona versada en el arte, existen variaciones y modificaciones posibles que no se apartan del espíritu del desarrollo, el cual solo se encuentra definido por las siguientes reivindicaciones.