

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN REACTOR DE MICROONDAS PARA LA OBTENCIÓN
DE MATERIALES CARBONÁCEOS

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE: LICENCIADO EN INGENIERÍA
EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA: MIGUEL ANGEL DE LOS SANTOS TELLEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ LUIS SOSA SÁNCHEZ



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

26 DE SEPTIEMBRE DE 2024

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por permitirme llegar hasta aquí, agradezco a mis padres por apoyarme en todo momento en especial a mi madre María Loreto Tellez Velázquez, agradezco a mis tíos y también especialmente a mis abuelos Antonio Tellez Fuentes y Teresa Velázquez Romero que en paz descansen, agradezco a mis jefes y patronos de mis empleos que tuve cuando cursaba la carrera en la universidad, por su apoyo ¡muchas gracias!

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.

Albert Einstein

“La estructura de los animales aun habiendo sido destinada para tantos otros fines, es una maquina más perfecta que la mejor máquina de vapor artificial jamás concebida; es decir, es capaz de trabajar más con el mismo gasto de combustible”.

James Prescott Joule

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. JUSTIFICACIÓN.....	13
III. OBJETIVOS.....	14
A. Objetivo general.....	14
B. Objetivos específicos.....	14
IV. HIPÓTESIS.....	15
V. ANTECEDENTES.....	16
C. Biomasa.....	16
1). Producción de biomasa y energía provenientes de biocombustibles y desechos.....	17
2). Transformación de desechos y pirólisis.....	19
3). Reactores de pirólisis convencionales.....	20
a). Combustión.....	20
b). Gasificación.....	21
c). Pirólisis.....	21
4). Reactores asistidos por microondas.....	24
5). Carbón y biocarbón.....	26
VI. MARCO TEÓRICO.....	28
D. Diseño y tipos de reactores.....	28
6). Modelo de flujo y de contacto.....	28
7). Modo de operación.....	29
8). Tipos de reactores químicos.....	29
d). Reactor discontinuo.....	29
e). Reactor continuo.....	30

f). Reactor de flujo tubular	30
9). Dispositivos utilizados para la reacción de pirólisis.....	31
E. Calor y temperatura	34
10). Calentamiento convencional vs calentamiento con microondas	34
11). Microondas	35
g). Ruptura del dieléctrico.....	36
12). Transferencia de calor	37
13). Resistencia térmica.....	39
14). Química de la pirólisis.....	40
h). Etapas de la pirólisis	41
15). Parámetros de diseño	41
F. Metrología.....	42
VII. METODOLOGÍA.....	44
G. Tipo de reactor y modo de operación.....	44
16). Características específicas del reactor de microondas para la obtención de materiales carbonáceos.....	45
17). Balance y velocidad de reacción	46
H. Geometría y dimensionamiento.....	47
18). Volumen	48
I. Análisis térmico	49
19). Producción de energía térmica	50
20). Balance de energía.....	51
21). Conducción de energía	52
22). Expansión y choque térmico.....	56
23). Etapa transitoria.....	57

i). Calentamiento	57
j). Enfriamiento	59
24). Modelo térmico completo del sistema.....	62
J. Diseño de componentes	66
25). Planos de fabricación.....	69
K. Desarrollo y construcción.....	71
L. Sistema de medición de temperatura	72
M. Validación del diseño	75
k). Evaluación del equipo de trabajo.....	75
N. Costos del equipo	76
VIII. RESULTADOS	78
26). Materiales carbonáceos obtenidos	79
IX. CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA.....	83

LISTA DE TABLAS

TABLA I. TOTAL DE ENERGÍA SUMINISTRADA POR TIPO DE FUENTE, MÉXICO 1990-2021	18
TABLA II. RANGOS DE OPERACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN UN PROCESO DE PIRÓLISIS	22
TABLA III. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES DISPOSITIVOS PARA MEDIR LA TEMPERATURA EN UNA REACCIÓN DE PIRÓLISIS.....	42
TABLA IV. COSTOS (USD)	77

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Consumo mundial de energía (2000–2019) y una proyección a 2050.....	19
Fig. 2. Planta de pirólisis flash esquemática en 3D.....	23
Fig. 3. Reactor discontinuo	29
Fig. 4. Reactor continuo	30
Fig. 5. Reactor de flujo tubular	31
Fig. 6. Calentamiento por microondas vs calentamiento convencional.....	34
Fig. 7. Crisol, tapa y contenedor	48
Fig. 8. Dimensiones del crisol.....	49
Fig. 9. Temperatura del crisol	55
Fig. 10. Gráfica de la distribución de temperatura.....	55
Fig. 11. Calentamiento del equipo hasta los 400 °C para un determinado tiempo	59
Fig. 12. Calentamiento del equipo hasta los 300 °C para un determinado tiempo	59
Fig. 13. Enfriamiento del equipo para un determinado tiempo.....	61
Fig. 14. Representación gráfica de las salidas del sistema.....	66
Fig. 15. Diseño de cuerdas del contenedor y transportador de gas	68
Fig. 16. Conjunción de roscas del transportador, tapa y contenedor	68
Fig. 17. Cuerdas y roscas del transportador de gas	68
Fig. 18. Vista frontal y lateral del transportado de gas	69

Fig. 19. Diferentes vistas a detalle de la tapa del contenedor	70
Fig. 20. Diferentes vistas a detalle del contenedor.....	70
Fig. 21. Fabricación de los equipos.....	71
Fig. 22. Sensor infrarrojo de la marca Raytek.....	72
Fig. 23. Rango del objetivo	73
Fig. 24. Simulación del circuito de control (ON).....	74
Fig. 25. Simulación del circuito de control (OFF)	74
Fig. 26. Piezas terminadas del reactor.....	78
Fig. 27. Puesta en marcha del reactor.....	78
Fig. 28. Reactor en funcionamiento	79
Fig. 29. Primer producto carbonáceo	80
Fig. 30. Productos carbonáceos.....	80

RESUMEN

En el siguiente trabajo de tesis, se realizó el diseño y desarrollo de un reactor asistido por microondas con el fin de transformar biomateriales y plásticos en productos carbonáceos mediante un proceso de pirólisis.

Se inicia en la investigación de reportes y dispositivos que previamente ya se utilizan para tal proceso, posteriormente se hizo un análisis de los fenómenos que intervienen en la producción térmica del carbón y las leyes que los gobiernan. La siguiente etapa fue realizar los modelos y análisis de los sistemas que contienen la reacción de pirólisis desde un punto de vista teórico ya que los resultados de los análisis son fundamentales para determinar en primera instancia las características térmicas del sistema sobre todo de la principal variable que interviene en cada fase, desde la concepción preliminar hasta la construcción y puesta en marcha del reactor. Por último, se realizaron los diseños básicos de cada elemento del equipo tomando en consideración las características del horno de microondas, el reactor también incorpora un sensor de medición de temperatura con el fin de medir y validar los análisis y modelos teóricos, de esta manera se pueden obtener las constantes cinéticas de la reacción.

Palabras clave: Reactor, Pirólisis, Temperatura, Microondas, Diseño.

I. INTRODUCCIÓN

La presencia de desechos de biomasa y plásticos en vertederos constituye un problema para el medio ambiente natural que además de facilitar el incremento de agentes patógenos y sustancias tóxicas, produce gases de efecto invernadero a partir de un proceso de descomposición [1].

Estudios realizados por varias décadas han identificado algunas alternativas de gran potencial para reducir grandes cantidades de biomasa a través de un proceso de pirólisis y la posibilidad de obtener energía de la biomasa ha sido también identificada como una fuente de energía renovable prometedora para la producción de calor y electricidad [1, 2].

Durante el proceso se obtienen hidrocarburos líquidos, gas sintético y biocarbón [1, 3] y cuando el biocarbón es activado física o químicamente se transforma en carbón activado que puede emplearse como una alternativa de bajo costo en las tecnologías disponibles para remover contaminantes orgánicos en el agua [4]. Otra aplicación de los productos de carbón obtenidos por pirólisis de desechos es la producción de electrodos de carbón para baterías ion-litio y para supercapacitores [5].

Recientemente la investigación y desarrollo de plantas que combinan procesos de pirólisis, gasificación y combustión están dando buenos resultados en el tratamiento térmico de residuos, haciendo inerte el sólido obtenido y destruyendo los contaminantes atmosféricos [6]. Los métodos de calentamiento convencionales son: conducción, convección y radiación, pero tienen inconvenientes los cuales incluyen la resistencia a la transferencia de calor, pérdida de energía y tiempo de calentamiento [7]. Debido a estos problemas se ha desarrollado la técnica de calentamiento por microondas como una fuente alternativa de energía [8].

El proceso de pirólisis de la biomasa ocurre a altas temperaturas (aproximadamente a 850 °C) es decir, consume una gran cantidad de energía sobre todo si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad [9]. Las ventajas del tratamiento de pirólisis asistida por microondas se encuentran en: menor consumo de energía, tiempo y costo para descomponer los productos de biomasa [8].

El calentamiento por microondas no solo necesita menor tiempo para la reacción, sino que también genera productos diferentes a los obtenidos por calentamiento convencional y estas diferencias están dadas por el propio proceso de calentamiento [10].

Afortunadamente, a partir de los años 90's los hornos de microondas domésticos han sido transformados en reactores de plasma en cuyo interior ocurren reacciones químicas o biológicas [11, 12].

La tecnología de microondas se destaca por su efectividad en la pirólisis y también por su velocidad, eficiencia, volumetría y selectividad. El biocarbón puede ser obtenido por calentamiento de la biomasa así como de plásticos [13] - [15]. Para convertir un horno de microondas convencional en reactor, es necesario introducir dos conductos transportadores de gas precursor, los campos electromagnéticos de las microondas llevan la energía hasta el material [12, 16], esta energía se propaga en medios ilimitados o en una cavidad resonante [17].

Por otro lado, cuando un gas es calentado a altas temperaturas surge el cuarto estado de la materia llamado plasma, la tecnología de plasma es una tecnología limpia para el proceso de pirólisis ya que transforma los materiales en productos como gas de síntesis y sólidos reciclables [18, 19].

En todo proceso químico se debe tener en cuenta factores como la presión, temperatura y condiciones necesarias para que los materiales reaccionen [20]. Hay dos formas para realizar la medición de la temperatura, la primera es por detección óptica del cuerpo negro, la segunda por contacto y medición de la temperatura con dispositivos eléctricos termosensibles [21].

Las fuentes de energía de microondas son esenciales para cualquier sistema de microondas, se dividen entre fuentes de estado sólido para bajos voltajes y bajas frecuencias, y de tubos para altos voltajes y/o altas frecuencias [22], las fuentes de microondas de estado sólido pueden ser categorizadas por dispositivos de dos terminales (diodos) y de tres terminales (transistores osciladores) mientras que las fuentes de tubos engloban al magnetrón, klistrón y girotrón [22].

Este trabajo de tesis tiene como finalidad diseñar y hacer un reactor de microondas, a partir de un horno de microondas convencional multimodal (con magnetrón), para transformar desechos de biomasa y plásticos en productos de interés comercial y científico con el fin de reducir los contaminantes de naturaleza biológica y desechos de plástico. El reactor contará con un sistema de monitoreo de temperatura para poder optimizar los procesos de pirólisis y obtener productos a base de carbón que puedan ser comercializados.

II. JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta tesis se centra en las posibilidades de evitar que los desechos poliméricos de biomasa o plásticos contribuyan a la contaminación del medio ambiente y para obtener productos de valor agregado a partir de ellos. Los productos de valor agregado que cumplan con las especificaciones requeridas para su aplicación particular, podrán ser introducidos en la sociedad como activos comerciales valiosos y una de las consecuencias inmediatas sería la generación de empleos además de una derrama económica sin olvidarnos que se aprovechan esos materiales que en otras circunstancias provocarían problemas a una sociedad, pueblo o región.

Aunque existen muchos procesos y equipos para obtener materiales carbonáceos de manera convencional, no son suficientemente viables debido a su funcionamiento, por lo cual, se planteó la idea de fabricar un nuevo reactor que se ajuste a los requerimientos deseados y desde luego que pueda incorporar partes cuyo propósito sea soportar las altas exigencias de trabajo a las que será sometido. Este nuevo prototipo será similar a los actuales hornos de microondas comerciales y su funcionamiento estará determinado por la generación de ondas electromagnéticas.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de reactor asistido por microondas para obtener materiales carbonáceos a partir de biomasa y/o plásticos.

B. Objetivos específicos

- Definir las nuevas características específicas del reactor, así como su clasificación y modo de operación.
- Realizar las operaciones de diseño e ingeniería a detalle.
- Diseñar el dispositivo mediante softwares para asegurar las condiciones adecuadas de operación en fundamento a los parámetros seleccionados.
- Construir un prototipo de reactor y evaluar el equipo como sistema de obtención de materiales carbonáceos.
- Equipar el reactor de microondas con un sistema de monitoreo de temperatura en el interior del reactor.

IV. HIPÓTESIS

El núcleo del reactor de microondas a escala laboratorio, fabricado en su totalidad por materiales cerámicos, será transparente a las microondas así como resistente a la temperatura de reacción y flujo de calor provenientes de la biomasa residual debido a un proceso de desintegración térmica llamado pirólisis.

V. ANTECEDENTES

C. Biomasa

Los desechos de biomasa y plásticos se generan alrededor del mundo, algunos de estos materiales se recuperan para aprovecharlos como materia prima química o fuente de energía, el resto se abandona al medio ambiente o a vertederos provocando contaminación [23], por lo que la biomasa residual presenta un peligro grave para la biosfera cuando se acumula y daña recursos naturales como el agua y suelo fértil [24].

Además, Mielnicki et al. [25] señalan otro problema relacionado con la quema intencional de esta materia orgánica por la acción humana, en esta actividad se incinera biomasa resultando en liberación de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 y óxido nitroso N_2O , provocando efectos nocivos para la salud. García [26] menciona en su informe el aumento de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, se ha disparado en el último siglo hasta las 400 ppm cuando históricamente debería situarse entre 180 y 260 ppm, debido a eso, una prioridad global es su reducción. Este gas proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles y también se genera por uso de combustibles renovables como bioetanol y biodiesel, la diferencia radica en la atmósfera donde el balance es cero, es decir, los residuos gaseosos de combustibles renovables se absorben completamente [27].

El aumento del precio de los combustibles fósiles así como su escasez, la protección del medio ambiente con la mitigación del CO_2 y la dependencia energética de países sin recursos energéticos han motivado el uso de energías renovables [28]. La biomasa se considera un tipo de energía renovable debido a las características de inagotabilidad, competitividad y menos contaminante en su producción [29]; además, representa un gran recurso en carbono para la producción de bioenergía, biomateriales y biocombustibles [30, 31].

En la biomasa se encuentran cuatro fuentes energéticas distintas: la biomasa sólida, biogás, residuos sólidos urbanos y biocombustibles [32].

De acuerdo a la forma de obtención, se puede clasificar cada fuente en: primaria, secundaria y terciaria [33].

En la biomasa primaria se encuentra la biomasa sólida o biocombustibles sólidos que son: productos obtenidos directamente de la naturaleza y/o de cultivos energéticos. Los residuos obtenidos de la actividad agrícola e industrial, por ejemplo; podas, residuos agroalimentarios, agrícolas, madereros, pecuarios y urbanos corresponden a biomasa secundaria o residual. Cuando es procesada la biomasa primaria y secundaria en procesos bioquímicos o termoquímicos se obtienen productos de biomasa terciaria o biocombustibles estos son: biogás, biodiesel, bioetanol, bioaceite y biocarbón [33, 34, 35, 38].

1). Producción de biomasa y energía provenientes de biocombustibles y desechos

Según la agencia internacional de energía (IEA) [36] en el año 2015, el suministro total de energía renovable en México fue de 15.5 Mtep (Megatonelada equivalente de petróleo), es decir, el 8.3 % del suministro total de energía primaria (TPES). Los biocombustibles y desechos representaron la principal fuente de energía renovable con una participación de 8.7 Mtep o 4.6 % de (TPES), en términos de capacidad de generación eléctrica, estas representaron 1.4 TWh, el 0.5% de la capacidad total. Para 2018 el volumen de generación de biomasa se estimó en aproximadamente 278 millones de toneladas de biomasa y biomasa residual mientras que el potencial energético fue de aproximadamente 2980 PJ [34]. La tabla 1 muestra la producción total de energía para México desde 1990 hasta 2021.

TABLA I. TOTAL DE ENERGÍA SUMINISTRADA POR TIPO DE FUENTE, MÉXICO 1990-2021

Año	Carbón	Gas natural	Nuclear	Hidráulica	Viento, Solar etc.	Biocombustibles y desechos	Derivados del petróleo	Unidad
1990	172807	968260	32040	84521	185198	358132	3382597	TJ
1995	241116	1041372	92105	99101	205187	368640	3473002	TJ
2000	288044	1485622	89684	119279	214352	374343	3740186	TJ
2005	508969	1930446	117873	99754	266405	371988	4271668	TJ
2010	555072	2270834	64135	133672	161277	339871	3953639	TJ
2015	479029	2707282	126295	110933	175984	361165	3782636	TJ
2020	369000	3356537	88702	96541	225321	367129	2888981	TJ
2021	327626	3432456	126600	124369	236223	367133	3258858	TJ

Nota: Source IEA World Energy Balances 2022, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>

La biomasa en su totalidad se considera la mayor fuente potencial de energía verde para el futuro y por eso se ha mostrado gran interés en sustituir los combustibles sólidos convencionales que se emplean en los sistemas de producción de energía [37], mediante el aprovechamiento de los residuos agrícolas, de esta forma; se reducen las emisiones de azufre, monóxido de carbono y metano entre otras. Numerosas investigaciones demuestran que México y América latina tienen un potencial favorable para la producción de biomasa [39].

La producción de biocombustibles depende del potencial social, económico y ambiental de cada región del mundo, es un mercado de oportunidades para el beneficio y desarrollo de áreas rurales principalmente [40].

En los próximos 20 años se espera un importante cambio en la estructura social y ambiental donde empresas y organizaciones de todo el mundo busquen crecimiento y oportunidades en el desarrollo sostenible [41]. La figura 1 muestra el incremento en el consumo de energía renovable para el año 2050.

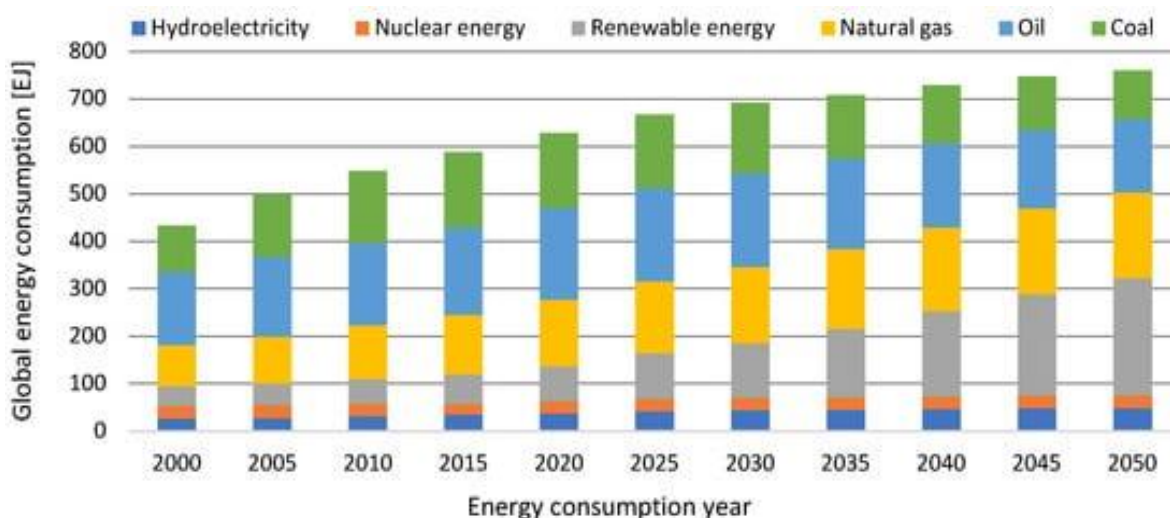


Fig. 1. Consumo mundial de energía (2000–2019) y una proyección a 2050

Nota: Se muestra el consumo de energía renovable desde el año 2000 hasta 2050 incluyendo otras fuentes de energía también llamadas primarias, fuente [43].

2). *Transformación de desechos y pirólisis*

La biomasa es la parte biodegradable de los residuos, desechos y productos de origen biológico de la agricultura, silvicultura, acuicultura y la parte biodegradable de los desechos industriales y municipales [42]. Estos desechos se generan en grandes cantidades: la paja de arroz, la paja de trigo, el bagazo de caña de azúcar y los rastrojos de maíz, son generados principalmente por las regiones de Estados Unidos, Asia y la Unión Europea [43], otros productos como tallos, hojas, cáscaras de semillas y cáscaras de fruta también son considerados biomasa de desechos agrícolas [44]. A nivel mundial, más del 66% de toda la biomasa residual vegetal proviene de cultivos de cereales y más del 60% de estos desperdicios provienen de países con bajos ingresos o en vías de desarrollo, la mayoría no se utilizan ni se tratan adecuadamente [44].

En estos países existe otro problema relacionado con la gestión de residuos plásticos, cuando son desechados en vertederos debido a la falta de servicios o tecnología para su tratamiento, derivan en problemas ambientales, sociales y climáticos [44, 45]; Aproximadamente 3200 millones de toneladas de residuos están presentes a nivel global, aumentan entre 7 y 10 mil millones de toneladas cada año, el 47% se deposita en vertederos, el 31% se recicla y el 22% se incinera [46].

Para transformar los residuos vegetales y plásticos en alguna forma energética se requiere de la aplicación de tecnologías y normas específicas de cada país [47, 48], estas tecnologías se dividen en dos grupos: conversión termoquímica y conversión bioquímica. La primera radica en aplicar calor o catalizadores químicos en procesos de combustión y pirólisis [49], mientras que la conversión bioquímica utiliza organismos biológicos y catalizadores bioquímicos en procesos de compactación y digestión anaerobia [50].

El proceso de pirólisis es la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno [51], de donde se obtienen diferentes productos en los tres estados de la materia: Carbón, agua, bioaceite, alquitrán, hidrógeno y metano [52]. A través de la variación de parámetros como el tipo de biomasa, condiciones atmosféricas, tasa de calentamiento, tiempo de permanencia y temperatura [53]. Es un proceso que ocurre entre 400 °C y 1200 °C, en comparación a la combustión, es más amigable con el medio ambiente, estas reacciones se llevan a cabo por calentamiento directo e indirecto a partir de gases, sólidos, transferencia de calor y oxidación [52].

3). Reactores de pirólisis convencionales

Las técnicas y procesos para descomponer biomasa han estado presentes a lo largo de la historia, conforme avanzaba la civilización se fueron desarrollando reactores y sistemas de recuperación. A finales del siglo XVIII, aparecieron los primeros hornos de ladrillo para retener gas condensable y no fue hasta el siglo XIX cuando los recipientes de hierro sustituyeron a los hornos de ladrillo [54]. A partir de 1970 durante la crisis del petróleo, se obligó a reconsiderar la pirólisis de biomasa como una tecnología alternativa a la dependencia del petróleo fósil [54]. Desde entonces no se han detenido los esfuerzos en la investigación y desarrollo de plantas experimentales y comerciales que combinan procesos de combustión, gasificación y pirólisis como sistemas avanzados en el tratamiento térmico de residuos [55].

a). Combustión

Por mucho tiempo la biomasa se incineraba en pequeña escala, en la actualidad las calderas de biomasa transforman la materia para superar los 500 MWh. Los principales tipos de calderas son:

de parrilla, de lecho fluidizado burbujeante o circulante y pulverizado [56, 57]. Esas tecnologías dependen del tipo de combustible, las dimensiones y aplicaciones (calefacción, calor combinado y energía) [56]. Las principales plantas de biomasa para producir electricidad están localizadas en Europa, cuyas potencias oscilan en el rango de 125 MW. y 740 MW. Mientras que los países con mayor capacidad instalada son Estados Unidos, China y Brasil [58, 59].

b). Gasificación

El gas de síntesis es una mezcla de monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, metano y otros hidrocarburos que se obtiene por conversión de sólidos carbonosos y líquidos en ausencia de oxígeno a altas temperaturas, aproximadamente entre 700 a 1000 °C. Se puede utilizar para sintetizar combustibles u otros químicos, en transportes y para generar energía eléctrica, es una mejor opción para el tratamiento de residuos en comparación a la incineración [60, 61]. La gasificación depende de las propiedades de la materia prima, diseño del reactor, presión, tiempo de residencia y temperatura. Las reacciones se pueden distinguir como heterogéneas (gas-sólido) y homogéneas (vapor-gas/gas-gas) [62].

c). Pirólisis

Diversas son las plantas y proyectos que incineran biomasa, caucho o plástico para producir electricidad u obtener productos de valor agregado como biocarbón, gas de síntesis y biodiesel [63, 64]. Así mismo, la pirólisis puede clasificarse en referencia al tiempo de residencia dentro del reactor: esta puede ser lenta (no isoterma), rápida (isoterma) o instantánea [63, 65]. La tabla 2 muestra rangos de clasificación del proceso.

TABLA II. RANGOS DE OPERACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN UN PROCESO DE PIRÓLISIS

	Temperatura (°C)	Relación de calentamiento (°C/s)	Tiempo de residencia (s)	Tamaño de la partícula (mm)	Presión (MPa)
Lenta	300-700	0.1-1	300-550	5-50	0.1
Rápida	550-1250	10-300	0.5-20	<1	0.1
Flash	800-1300	>1000	<0.5	<0.2	0.1

Nota: La tabla muestra datos de operación como relación de calentamiento (incremento de temperatura respecto al tiempo), tiempo de permanencia dentro del recipiente que contiene la muestra, tamaño de la partícula a diferentes escalas de temperatura y la presión en el interior del recipiente, fuente [66].

En los últimos años del siglo XX, el gobierno municipal de una ciudad al oriente de Tokio Japón, sustituyó sus viejos sistemas de incineración que procesaban el 80% de los residuos domésticos y comerciales de una población de 500 000 habitantes por una planta de pirólisis. Las razones principales engloban la reducción de gases contaminantes, recuperar valor energético y obtener residuos de baja materia orgánica. La planta de pirólisis consta del pulverizador, alimentador, reactor donde se lleva a cabo la reacción, el ciclón separador de vapores y un vasto sistema de recuperación/tratamiento de gases incorporando una turbina generadora [67].

A mediados de la primera década del siglo XXI, se pone en marcha una planta en Malasia con una capacidad instalada de 2 toneladas-hora para procesar racimos de palma de aceite que hasta esa fecha se incineraban. Durante los dos primeros años posteriores a su apertura se obtuvieron más de 1 millón de litros de aceite que fueron aprovechados para secar la biomasa en un pretratamiento, también se utilizó para generar electricidad y como sustituto del Diesel. Debido al éxito, se discutió la posibilidad para instalar una nueva planta en los Países Bajos con una capacidad instalada de 5 toneladas-hora alimentada con madera y desechos de madera [68].

Klug [2] en el año 2012 realizó experimentos en una planta piloto experimental, con el fin de obtener bioaceite, gas y coque a partir de procesar residuos orgánicos de biomasa en una reacción de pirólisis flash. El describe los pasos a realizar, así como las diferentes partes de la planta que intervienen en el proceso; sus conclusiones y resultados muestran que es posible obtener los tres productos mencionados, sin embargo, la eficiencia del proceso fue baja por lo que se debe prestar atención en los parámetros, así como también en las condiciones óptimas de operación. Klug

propone seguir utilizando (principalmente) desechos agrícolas o forestales sin intervenir en la producción de bioenergía o alimentación. La figura 2 muestra un ejemplo de su planta.

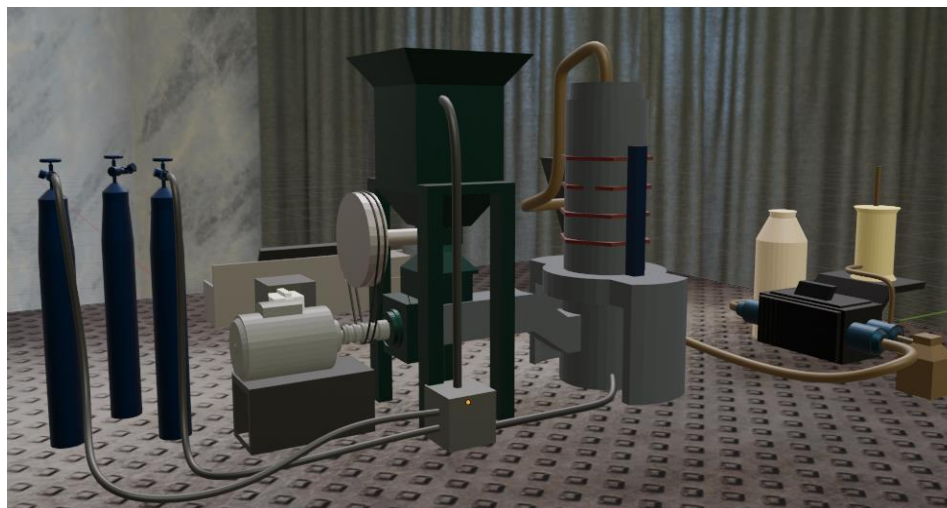


Fig. 2. Planta de pirólisis flash esquemática en 3D

Nota: Esta representación gráfica corresponde a la planta piloto descrita de forma esquemática por el autor, fuente [2].

Más tarde, en 2016 María [69] en su tesis doctoral “pirólisis a baja temperatura de la pomasa de manzana para la producción de biocombustibles” menciona: las bajas cantidades de ceniza y altos porcentajes de materia volátil hacen que la pomasa de manzana (subproducto de extracción de jugo) sea un candidato potencial para producir biocombustibles; añade que, a partir de sus datos de análisis termogravimétricos en correspondencia a los datos obtenidos en el reactor experimental, la base para diseñar, construir y operar un reactor a escala industrial para procesar pomasa de manzana.

Aspiazu [70] indica la necesidad de incorporar un ciclón - condensador y equipos de acumulación como elementos de principal aportación en reactores de lecho fluidizado. Menciona también la implementación de ecuaciones convencionales de diseño de reactores para probar diferentes configuraciones y determinar cuál se ajusta a las mediciones experimentales, sin embargo; alude que, en los reactores de pirólisis de biomasa, no se conoce lo que sucede internamente por lo que no es posible determinar el flujo masico y correspondientemente su composición.

Uno de los más recientes proyectos de investigación realizado a finales del año 2022 sobre obtener energía a partir de la biomasa es presentado por Cruz y Hernández [71] de la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde proponen el uso de hidrógeno como fuente de energía con el fin de reducir gases de efecto invernadero. Con fundamento en las ecuaciones de diseño, realizaron el diseño del reactor tomando la temperatura como uno de los principales factores que intervienen en el proceso de pirólisis y la obtención del gas hidrógeno.

Los procesos están ligados a múltiples etapas en las que intervienen todas las partes de tecnologías de pirólisis y la intervención en las escalas de espacio y tiempo desde el pretratamiento hasta la separación de productos [72]. Los estudios realizados por Zarraga [73] en su tesis doctoral, destaca el interés y muestra los resultados obtenidos de un micro reactor de pirólisis para procesar biomasa residual vegetal resaltando las siguientes características del reactor: estabilidad/versatilidad, economía del diseño, construcción y facilidad de operación.

4). Reactores asistidos por microondas

La pirólisis asistida por microondas ha sido estudiada como un método no convencional para aplicarse en el procesamiento de biomasa y desechos, de esta forma, se mejora la calidad de bioaceite, biocarbón y gas de síntesis obtenidos [74] – [76], ha resultado ser una opción prometedora en comparación de la pirólisis convencional [77].

El calentamiento asistido por microondas implica la entrega directa de energía al material mediante la interacción molecular con ondas electromagnéticas en una frecuencia de oscilación de 300 MHz. a 300 GHz. y longitudes de onda de 1 milímetro hasta 1 metro, mientras el calentamiento convencional transfiere energía desde las paredes del material por conducción, convección y radiación [78], Esto se traduce en ventajas significativas a comparación del método convencional, el método de calentamiento con microondas transfiere energía a los materiales dieléctricos, generando calor interno que deriva en menor tiempo de calentamiento y una reacción más rápida además de que se puede controlar la potencia y tiempo de irradiación [78]. Este tipo de proceso se lleva a cabo en un reactor de microondas que puede ser polimodal o monomodal, algunos autores trabajan con un modelo llamado: Traveling-wave microwave reactor (reactor de microondas de

onda viajera). Este último es una tecnología reciente cuyo estudio se ha presentado mayoritariamente en simulaciones [79].

La primera planta de pirólisis energizada por microondas que se tenga registro fue instalada en el Reino Unido en 1989 cuya materia prima era polímeros de neumáticos, en consecuencia, la investigación y patentes en el ámbito han tenido un aumento significativo [63]. Durante los años 2000 a 2010 los esfuerzos en esta tecnología se centraron en: el secado de biomasa como pretratamiento en reactores de lecho fluidizado para obtener bioaceite en comparación al pretratamiento en un horno eléctrico [80], también se estudiaron los efectos de utilizar catalizadores en el rendimiento de la producción de bioaceite. El trabajo realizado por Wan et al. [81] concluyen en: la ventaja de utilizar catalizadores (óxidos metálicos, sales y ácidos) como absorbentes de microondas para incrementar la velocidad de reacción y mejorar el rendimiento del bioaceite. Mientras que Jun et al. [82] utilizaron líquidos iónicos como catalizadores en el tratamiento de paja de arroz y aserrín irradiados por microondas para obtener bioaceites.

Otros trabajos se enfocaron en el gas de síntesis y carbón provenientes de madera, transformados en un reactor de configuración monomodal [83]. Así mismo, Huang et al. [84] presentan en su informe: la recuperación de recursos y energía después de someter paja de arroz en un tratamiento de pirólisis por microondas.

Recientemente Zhao et al. [85] reportaron la implementación de un sistema de control de temperatura basado en termopares en un reactor asistido por microondas diseñado por ellos, en sus resultados hacen énfasis en el rendimiento positivo de gas y coque todo en función de la temperatura. Este último parámetro se investigó por su influencia en la velocidad de reacción y la potencia, tanto en calentamiento convencional como en calentamiento por microondas así lo expresan Wu et al. [86], además, mencionan las diferencias entre el gas adquirido por las dos vías de calentamiento.

La tesis presentada por Obando [87], establece las condiciones de diseño de un reactor a escala laboratorio para transformar residuos sólidos orgánicos en biocarbón, describe las características: energía de suministro y procesamiento, la fuente de calentamiento, temperatura y recipiente donde

la reacción se llevará a cabo. Él concluye lo siguiente: los parámetros de temperatura y tiempo de reacción son lo más importante para obtener biocarbón. Añadiendo: la eficiencia superior de utilizar microondas como método de calentamiento en comparación a transmitir energía por conducción o radiación solar.

El proyecto publicado por Salema y Ani [7] donde presentan los resultados de realizar pirólisis inducida por microondas para transformar biomasa de palma aceitera agregando carbón como absorbente de ondas electromagnéticas. Descubrieron que los productos obtenidos a partir de la reacción, dependen de las cantidades de biomasa y del absorbente de microondas, concluyen que: el tiempo de calentamiento es corto también hay un ahorro energético así como de costos. Utilizaron un recipiente de cuarzo acoplando dos termopares para monitorear la temperatura.

Se desarrollaron estudios con la implementación de un sistema de pirólisis continua asistida por microondas donde se obtuvo gas de síntesis en sus respectivos porcentajes, los resultados fueron mejores en comparación al proceso convencional [88]. Por lo anterior, la pirólisis continua con microondas es una prometedora técnica para transformar biomasa en biocarbón. Los estudios se han hecho en proyectos de baja escala teniendo que acoplarse a nuevas configuraciones para niveles industriales, la transición no se ha generalizado incluso es limitada [89], aunque existen plantas a escala industrial, estas presentan numerosos inconvenientes relacionados a la temperatura, cavidad de resonancia y distribución/configuración de los componentes [89]. También se han realizado modelos de reactor de microondas midiendo la variación del coeficiente dieléctrico de la biomasa durante la pirólisis, la densidad de potencia de las microondas, el radio de carga y la densidad aparente, todo esto para simular la producción de gas hidrógeno [90].

5). *Carbón y biocarbón*

La pirólisis lenta se dirige principalmente a la producción de biocarbón el cual puede poseer hasta un 50% del carbono de la biomasa, el resto es bioaceite y gas [91]. Si la temperatura y potencia de reacción es relativamente alta, influirá negativamente en el rendimiento del biocarbón más sin embargo beneficia la formación de su estructura porosa [92]. Debido a su estructura molecular más estable que el carbón original, se emplea como combustible; en aplicaciones medioambientales, en

electrodos para supercapacitores, como fertilizante fijador de carbono y nitrógeno; convertido en carbón activado, se emplea como eliminador de contaminantes en la purificación de agua [93]. La diferencia entre carbón y biocarbón radica en su estructura, el carbón es más sólido y menos poroso. Ambos pueden ser obtenidos por pirólisis convencional de biomasa y biomasa residual [94].

En conclusión, el aprovechamiento de los residuos es fundamental para mitigar el cambio climático, reducir la contaminación y obtener un beneficio de estos, sin embargo, no se están aprovechando en su totalidad como es el caso de los países en vías de desarrollo, más precisamente, en América latina y México. Aunque son diversas las técnicas para obtener beneficios de los residuos, la que más se utiliza es la combustión para generar electricidad, por otro lado, la implementación de tecnologías por calentamiento de microondas se ha multiplicado en los últimos 10 años aun presentando problemas para escalarse a niveles industriales, por lo que se deben encontrar alternativas a fin de garantizar el perfecto funcionamiento de las diferentes plantas en cada respectiva escala (laboratorio, planta piloto e industrial).

VI. MARCO TEÓRICO

D. Diseño y tipos de reactores

Al iniciar el estudio de reactores es necesario conocer los tipos y configuraciones que existen para determinar el más apropiado [95], donde se llevara a cabo la reacción de pirólisis asistida por microondas de biomasa y plásticos.

Un reactor químico es un dispositivo diseñado para realizar una o varias reacciones químicas, dicho dispositivo integra un recipiente cerrado, incorpora entradas y salidas de sustancias químicas y está regido por un sistema de control [96]. Las principales funciones son: mantener el contacto y la fluidización de los reactivos dentro del recipiente, establecer el tiempo suficiente entre los reactantes y catalizadores (si es que existen) en el interior del reactor, asegurar las condiciones de composición, temperatura y presión de modo que se lleven a cabo las reacciones tomando en cuenta los aspectos cinéticos y termodinámicos [96].

Hay una gran variedad de reactores químicos que se clasifican de acuerdo a varios principios, de esta manera se facilita su comprensión. Los más utilizados son los reactores discontinuos, continuos, de tanque agitado (CSTR) y de flujo de pistón [96, 97]. Esta clasificación parte inicialmente de dos principales criterios: el modo de operación y el modelo de flujo y contacto, estos dos criterios pueden ser ideales o no ideales (reales).

6). Modelo de flujo y de contacto

Según este modelo, las sustancias fluyen y se mezclan unas con otras para lo cual intervienen algunos factores como el tiempo de mezclado y el estado de agregación de las moléculas, ciertos materiales tienden a tener un alto grado de aglutinamiento como los sólidos [95, 97]. El modelo de contacto engloba las reacciones de una sola fase llamada reacción homogénea, mientras que cuando hay dos fases son llamadas reacciones heterogéneas. Más de dos fases es una reacción multifásica [95, 98].

7). *Modo de operación*

Según este criterio de clasificación, los reactores pueden ser discontinuos también llamados Batch (por lotes), semicontinuos y de flujo continuo, tomando en cuenta las fases de operación y si se realizan secuencial o simultáneamente (carga en el reactor, reacción química y descarga del reactor) [99]. Otros criterios de clasificación están determinados por evolución en el tiempo o el tipo de reacción química [98].

8). *Tipos de reactores químicos*

d). *Reactor discontinuo*

Nombrado reactor discontinuo, intermitente, por lotes o Batch, es un reactor que opera en estado no estacionario debido a que la composición y las propiedades de la mezcla varían o dependen del tiempo, el cambio de temperatura es un factor favorable en cuestiones de selectividad además de completar de manera exitosa y segura la conversión. Este equipo es fácil de operar para tratamientos de pequeña escala experimental en laboratorios y es posible su uso a escala industrial dependiendo de la cantidad de carga, los reactivos se introducen al inicio del experimento y su costo es relativamente bajo [100] – [103]. La figura 3 es un ejemplo ilustrativo de un reactor discontinuo.



Fig. 3. Reactor discontinuo

Nota: En esta representación de un reactor discontinuo, se pueden apreciar sus elementos principales de funcionamiento como el sistema de agitación, estructura y la remoción de productos, fuente [104].

e). Reactor continuo

Es un reactor alimentado constantemente mientras se está llevando a cabo la reacción química y a la vez, se retiran los productos sin interrupciones. Las composiciones reactantes no varían en el tiempo por lo que se dice que el reactor opera en estado estacionario, en diversas aplicaciones también se les llaman reactores continuos de tanque agitado debido a que incorporan un agitador para conseguir una mezcla completa y así obtener buen rendimiento [100] - [105]. La figura 4 muestra un ejemplo de un reactor continuo.

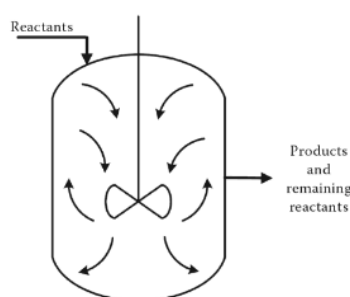


Fig. 4. Reactor continuo

Nota: Esta ilustración muestra en esencia la alimentación, forma de operación y extracción de productos de un reactor continuo, fuente [106].

f). Reactor de flujo tubular

Consiste en cargar la alimentación en la entrada del tubo que es el cuerpo principal del reactor y se retiran los productos en el otro extremo, es necesario intercambiar calor con el entorno, si el reactor está vacío se produce entonces una reacción homogénea, por otro lado, si contiene pequeñas cantidades de catalizadores se dice que la reacción es heterogénea. Este tipo de diseño funciona en estado estacionario por lo que las condiciones físicas y químicas no varían en el tiempo [107]. La figura 5 es una representación gráfica de un reactor de flujo tubular.

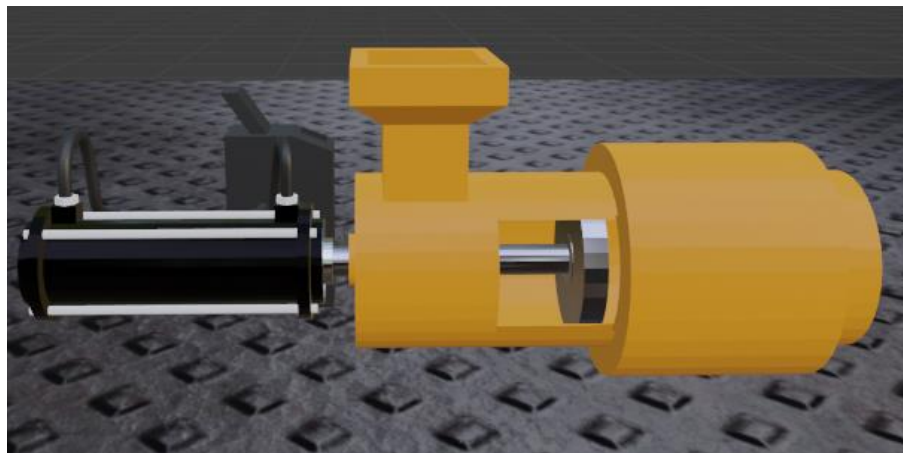


Fig. 5. Reactor de flujo tubular

Nota: Reactor de flujo tubular representado por la cámara de flujo y reacción además de un sistema de control y un cilindro hidráulico como actuador, fuente [104].

9). Dispositivos utilizados para la reacción de pirólisis

El reactor de lecho fluidizado, es un dispositivo en el cual hay una circulación de gas inerte desde la parte inferior del reactor como medio de calentamiento, este sistema es aprovechado para obtener productos de pirólisis, es fácil de operar y controlar además de que se obtienen altos rendimientos de bioaceite alrededor de un 70 %, sin embargo, se requiere pretratamiento de la materia prima y puede ser difícil de financiar [108, 109].

Este equipo se puede definir como un reactor de tornillo sin fin, donde inicialmente se introduce la materia prima y se transporta mediante la rotación del tornillo a través de las hélices, la energía proporcionada para el proceso es suministrada en las paredes del reactor calentándolas a temperaturas mayores que la requerida para la desintegración térmica de la materia, ciertamente la rotación del tornillo proporciona una mejor mezcla de la masa y por consiguiente un mejor contacto en el canal transportador, existen otras configuraciones relacionadas como el reactor de doble tornillo [110].

El reactor de calentamiento por inducción, fue desarrollado para calentarse por inducción, añadiendo un sistema de recolección de gases y módulos de análisis, consta de un tubo de acero inoxidable como cuerpo principal del reactor envuelto en una bobina metálica como agente

inductivo, capaz de soportar temperaturas de hasta 1000 °C, se utiliza gas nitrógeno como purgante del sistema [111].

Existe otro dispositivo para realizar la desintegración térmica, llamado reactor solar, aún en fase de investigación y desarrollo. El diseño asegura la alimentación, dirección, enfoque y recolección de la radiación solar a una superficie o volumen determinado. Varias investigaciones han dedicado sus esfuerzos en la utilización de lentes de Fresnel, así como el uso de cilindros concentradores parabólicos para suministrar el calor suficiente de reacción [112].

Por otro lado, se denomina reactor asistido por microondas al equipo encargado de transformar la energía de microondas en energía térmica, dicho equipo incorpora el magnetrón como emisor de microondas y principal fuente de calentamiento, además de incluir un sistema de enfriamiento, se utiliza una cavidad de resonancia y un crisol de cuarzo como contenedor de la muestra de reacción. Este tipo de reactor también emplea un gas inerte que circula hacia el interior del crisol creando un ambiente libre de oxígeno. Una de las principales características de este dispositivo es la mejora de la calidad de los productos obtenidos a comparación de la pirólisis convencional, la energía térmica aplicada es rápida y uniforme en toda la muestra disminuyendo el tiempo de reacción y aumentando la tasa de calentamiento demostrando alta eficacia en la recuperación química de la biomasa [113] – [115].

El procedimiento adecuado de diseño incumbe tres etapas esenciales: síntesis, análisis y evaluación. La parte de síntesis trata sobre la combinación coherente de conceptos y elementos con el único propósito de desarrollar objetos artificiales cuyas propiedades sean las deseadas. El análisis corresponde a observar los elementos del conjunto constituido y la interacción/relación de sus elementos. Consecuentemente del análisis, se debe hacer una evaluación con el fin de determinar la eficiencia y rendimiento del objeto creado, si los resultados no son los deseados se deberá repetir los pasos de síntesis y análisis [116].

En el desarrollo de reactores químicos intervienen dos principales etapas. Etapa 1) diseño del proceso, etapa 2) diseño de detalle o mecánico, si bien la etapa 1) es con la cual inicia el desarrollo o construcción de reactores, la etapa 2) tiende a tener la misma importancia que la primera etapa.

La concepción de diseño de la etapa 1 tiene como objetivos definir:

- 1.- El tamaño del reactor, configuración y dimensiones de las partes importantes.
- 2.- La composición de los productos finales y subproductos.
- 3.- La temperatura de los reactivos en el equipo y el calor que se intercambia.
- 4.- La presión de operación y pérdidas de presión debido al flujo en el equipo.

En consecuencia, del diseño hemos de obtener información valiosa acerca de los cambios que se producen en referencia a la termodinámica y a la rapidez (cinética de la reacción) con la que se llevan a cabo. La termodinámica proporciona dos fuentes esenciales para el diseño: el calor liberado o absorbido (estas magnitudes deberán ser conocidas para realizar el diseño más adecuado) y la extensión máxima de reacción. Por otra parte, la rapidez concierne a los procesos de velocidad o velocidad de reacción (transmisión del calor, cinética química etc.) [95, 116].

La etapa 2 que corresponde al diseño de detalle, es una etapa final de todo proyecto antes de su realización, es la fase donde se establece y define totalmente todos los elementos, componentes partes o subsistemas que integran el sistema del proyecto. Los documentos que describen y desarrollan un proyecto deben de ser suficientes para hacerlo realidad (implementarlo y ponerlo en práctica) mediante la supervisión del equipo encargado de realizar el proyecto o por un equipo externo de especialistas [117]. El diseño de detalle siempre debe implementarse es obligatorio, en todo momento se debe de considerar, sean cualesquiera las características del objeto y del proyecto que se anhela realizar, Esta etapa se diferencia de otros procedimientos ya que aquí las posibles soluciones de un objetivo dado deben concretarse no basta con solo proponer una solución [117].

Los principales objetivos a cumplirse en esta etapa son los siguientes:

- a). Comprobar las hipótesis y soluciones del diseño.
- b). Proporcionar toda la información técnica al proveedor.
- c). Proporcionar los datos técnicos, condiciones y detalles para la fabricación del sistema del proyecto.

d). Fungir como documento informativo para aquellas situaciones en las que el anteproyecto es insuficiente o inexistente [118].

E. Calor y temperatura

10). Calentamiento convencional vs calentamiento con microondas

La pirólisis convencional es una tecnología clásica y confiable que siempre se ha aplicado en la industria desde sus inicios. En esta tecnología, la energía térmica es transferida desde el horno hasta la superficie de la masa reactiva por medio de conducción, convección y radiación, estableciendo un gradiente de temperatura desde el exterior hacia el interior. Por otro lado, la energía de la pirólisis asistida por microondas es suministrada directamente al núcleo de las partículas creando un gradiente de temperatura inverso al de la pirólisis convencional, la temperatura se distribuye uniformemente en todo el volumen del material [119]. la figura 6 es una representación de ambos sistemas de calentamiento.

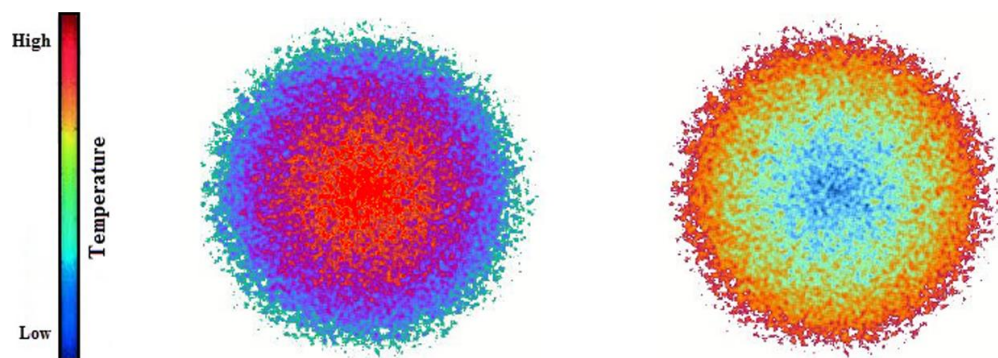


Fig. 6. Calentamiento por microondas vs calentamiento convencional

Nota: La figura 6 muestra la dirección de la transferencia de calor en la masa de una partícula, la primera imagen (izquierda) corresponde a la energía transferida desde el interior hacia el exterior por pirólisis asistida por microondas, la siguiente ilustración (derecha) muestra un proceso inverso que corresponde al calentamiento por pirólisis convencional, fuente [66].

11). *Microondas*

A diferencia del calentamiento convencional, el calentamiento por microondas implica la entrega directa de energía a la biomasa generando calor por movimiento y fricción de moléculas dipolares, este fenómeno ocurre cuando la molécula rota o gira en dirección al campo eléctrico de las microondas [120, 121].

Los materiales que pueden absorber las microondas se llaman dieléctricos [121] o materiales de muy baja conductividad eléctrica. Estos materiales están constituidos de átomos y moléculas cuya ordenación interna de cargas cambia en presencia de un campo eléctrico, las cargas positivas se mueven en relación a las negativas originando distribuciones atómicas o moleculares de carga por dipolos, es decir, dos cargas de igual magnitud pero de signos opuestos separadas por una distancia [122, 123]. Las moléculas de los dieléctricos son normalmente de dos tipos: a) moléculas polares (tienen un momento dipolar en ausencia de un campo eléctrico) y b) moléculas no polares (no poseen un momento dipolar en ausencia del campo eléctrico), una molécula de agua es por ejemplo un dieléctrico [122].

La radiación electromagnética es un modo de transferencia de energía (siempre que se hable en términos ópticos de baja energía) a través de la frontera de un sistema y la rapidez de flujo de energía se representa mediante el vector \vec{S} llamado vector de *Poynting* definido por medio de la ecuación 1.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (1)$$

Si \vec{S} esta dirigido en la dirección de propagación de la onda, el análisis dimensional se escribe por medio de la ecuación 2.

$$[\vec{S}] = \frac{[\vec{E}][\vec{B}]}{\mu_0} = \frac{NC^{-1}T}{TmA^{-1}} = \frac{N \cdot m}{m^2 \cdot s} = \frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{W}{m^2} \quad (2)$$

La ecuación 2 representa la intensidad, la rapidez con la que fluye la energía a través de una superficie perpendicular a la fuente de propagación, el vector \vec{S} es la energía propagada por unidad de área [124], si las ondas se propagan en todas direcciones desde una fuente entonces la intensidad I es inversamente proporcional a r^2 , si la potencia emitida desde la fuente es W , entonces la intensidad media I_m en una esfera está representada por la ecuación 3 [125].

$$I_m = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (3)$$

Para las ondas electromagnéticas que viajan a través de un medio dieléctrico y en el vacío, la densidad de energía en el espacio donde el campo eléctrico y magnético están presentes, está dada por la ecuación 4.

$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0}(\sqrt{\epsilon_0\mu_0}E)^2 = \epsilon_0 E^2 \quad (4)$$

Cuando se trata de un medio dieléctrico tanto el vector \vec{S} y u , los valores de permeabilidad y permitividad del espacio vacío se cambian, por los valores del material que se está analizando [126].

g). Ruptura del dieléctrico

Al aplicar un campo eléctrico suficientemente grande a un dieléctrico, se comienza a liberar iones y electrones arrancándolos de las moléculas y a la vez que son lanzados a otras moléculas provocan la ruptura del dieléctrico [126]. La ruptura puede clasificarse como intrínseca o térmica, esta última radica en el calentamiento y generación de energía calorífica que no puede disipar el material dieléctrico dando lugar a la elevación de temperatura y al aumento de velocidad de los electrones que provocan la ruptura, a este fenómeno se le conoce como efecto joule [122].

En general al calentamiento por microondas de un material se puede definir como “tangente de perdida” que vincula el factor de perdida dieléctrica y la constante dieléctrica del material [120, 121].

12). Transferencia de calor

Un sistema es una región delimitada en el universo llamada límite del sistema, cualquier subsistema incluyendo energía, puede estar dentro de estos límites también conocidos como superficie de control, indeterminados por su área o volumen, pueden ser límites reales o imaginarios. En muchos problemas termodinámicos existe un intercambio de calor entre dos o más sistemas, cuando se llega al intercambio de energía de un sistema con un sistema dado, se dice que hay un medio exterior o un entorno del sistema, ambos conforman el universo. Si un sistema no intercambia energía y materia con el entorno, se define entonces como un sistema aislado. Cuando hay materia dentro de los límites del sistema, pero no pasa a través de ellos y energía fluyendo hacia el medio exterior entonces se dice que es un sistema cerrado, si hay flujo de materia y energía entre los límites del sistema y el entorno entonces el sistema es abierto [127, 128].

La transferencia de calor por conducción se realiza por la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las partículas menos energéticas, es decir; de un medio sólido, líquido o gaseoso de mayor temperatura al medio de menor temperatura cuando están en contacto entre sí, este concepto es propio de la segunda ley de la termodinámica. En el caso de gases y líquidos la transferencia toma una importancia significativa por la naturaleza del fluido y se deberá asumir precauciones por los posibles sucesos que puedan presentarse. Para los sólidos, la conducción es un fenómeno originado por vibraciones de átomos dando lugar a ondas inducidas, la propagación de energía calorífica en los sólidos solo se puede realizar por conducción [129, 130].

La temperatura está asociada con la energía de las moléculas, es el movimiento aleatorio traslacional, y también se vincula con los movimientos de rotación y vibración de las moléculas internas [129].

La conductividad calorífica (k) de un gas, sólido o un líquido esta expresada mediante la ley de Fourier de la conducción del calor, la cual establece que el flujo de calor por unidad de área es directamente proporcional a la disminución de la temperatura (gradiente de temperatura) en una distancia (X) determinada [131]. La ecuación 5 describe la ley de Fourier.

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{X} \quad (5)$$

(k) es la conductividad calorífica o térmica.

La forma diferencial de la ecuación 5 se puede expresar en su forma límite, cuando X tiende a cero, entonces la densidad de flujo de calor que es el flujo local de calor por una unidad de área, se define mediante la expresión 6 (k , es negativa por la segunda ley de la termodinámica, la energía fluye del sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura).

$$q = -k \frac{dT}{dy} \quad (6)$$

Si la temperatura varía en las 3 direcciones espaciales entonces la ecuación 6 se puede escribir para cada una de las direcciones del espacio, se representa mediante la ecuación 7.

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

La forma final de la ley de conducción de Fourier está dada en forma tridimensional, para cada expresión multiplicada por el vector unitario idóneo y luego sumando las ecuaciones correspondientes da como resultado la ecuación 8.

$$q = -k \nabla T \quad (8)$$

Esta expresión es válida para cualquier medio donde el calor fluye en todas direcciones sin una dirección específica desde el sistema con mayor temperatura hacia el sistema de menor temperatura, para un fluido en movimiento q es la densidad de energía térmica relativa a la velocidad del fluido. La conducción de calor en fluidos puede considerarse como transporte molecular de energía debido al movimiento de las moléculas como factor principal, el movimiento global del fluido se puede denominar transporte de energía convectiva [131, 132].

13). Resistencia térmica

En diversas circunstancias cuando se sitúan en contacto dos diferentes volúmenes conductores se presenta una resistencia térmica en la interfaz de los sólidos denominada resistencia térmica por contacto, sucede cuando las superficies de los volúmenes no se ajustan perfectamente lo cual da lugar a una estrecha capa de fluido, la resistencia está en función del área de los materiales sólidos así como de la presión y temperatura, la transferencia de calor entre los contactos se da de manera compleja por convección y radiación, la ecuación 9 se define como la resistencia de interfaz [133].

$$R_i = \frac{\Delta T_i}{q/A} \quad (9)$$

Las propiedades térmicas de los materiales son de significativa trascendencia en el empleo de diversas tareas y aplicaciones, allí donde se necesite minimizar o aumentar la transferencia de calor entonces estarán presentes esas propiedades, aunado a esto, un fenómeno como la expansión térmica es de particular interés debido a que puede llevar a una falla del sistema cuando sea sometido a calentamiento [134]. Para el caso de los materiales aislantes, sus características y cualidades los colocan en un rango de exclusividad diferenciándolos del resto, estas características se mencionan como; baja conductividad térmica, transmitancia térmica, calor específico y resistencia térmica [135].

Se dice entonces que la transferencia de calor en un sistema donde interviene una sustancia con otra, se analiza en términos de resistencia y capacitancia, donde las sustancias presentan una alta resistividad al flujo de calor y por consiguiente presentan una baja capacitancia y viceversa, si existe una capacitancia térmica considerable entonces la sustancia presenta una baja resistencia al flujo de calor [136], si el flujo de calor por un gradiente de temperatura fluye en paredes planas de algún material, es decir, de forma perpendicular a la dirección a la que fluye el calor entonces la resistencia térmica del material es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material, la ecuación 10 es válida para la resistencia propia del material y para un área en específico el denominador será kA , A es igual al área en la que fluye el calor, cuanto mayor sea el valor de la resistencia mayor será la capacidad aislante [135, 137].

$$R = \frac{esp}{k} \quad (10)$$

La transferencia de calor por radiación, es menos importante para el control de procesos térmicos a menos que la masa que reaccione se encuentre a una elevada temperatura de lo contrario para modelar sistemas térmicos solo se toma en cuenta la resistencia y capacitancia, la ecuación anterior solo está definida para superficies homogéneas, para superficies heterogéneas la ecuación 10 puede reescribirse mediante la expresión 11.

$$R = \frac{1}{k} \quad (11)$$

La capacitancia térmica se define mediante la ecuación 12.

$$C = mc \quad (12)$$

Donde m es igual a la masa del material en kg, y c es igual al calor específico del material en Kcal/kg*°C [138].

Un circuito eléctrico es análogo a un circuito térmico, donde el flujo de calor q es igual a la diferencia de temperatura dividido entre la resistencia, la ecuación 13 describe el flujo calor equivalente al flujo de corriente, la diferencia de temperatura equivale a la diferencia de potencial y R representa a la resistencia [133].

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (13)$$

14). Química de la pirólisis

Las propiedades de la biomasa son influyentes en la velocidad de reacción y en la transferencia de calor, tal que, se deberán cumplir las condiciones de operación. Se requiere dedicación para conseguir modelos matemáticos con el fin de desarrollar mejores diseños de reactores, estos

modelos involucran la relación entre cinética química y fenómenos de transporte. Un buen desempeño en las condiciones de operación para la pirólisis de biomasa puede asegurar un mayor rendimiento de los productos [139, 140].

La química del proceso de pirólisis de biomasa puede ser entendida bajo el esquema de reacción agrupada, en base a la estructura experimental del producto [141]. Este método consiste en evadir el tratamiento molecular de las especies y reagruparlas con el fin de desarrollar una cinética de simplificación de reacciones. Es bastante útil al no involucrar demasiados aspectos cinéticos [142], este método puede ser aplicado a la torrefacción que es modo de pirólisis “leve” y se realiza en los rangos de 220 y 350 °C, también se obtienen de manera parcial biocarbón, bioaceite y biogás [140].

h). Etapas de la pirólisis

El proceso de pirólisis se realiza en varias etapas, en la primera, se dan varios procesos: el reordenamiento interno, aparición de radicales libres, ruptura de moléculas de la biomasa, eliminación de agua, formación de carboxilos, carbonilos etc. Que se producen entre 100 y 200 °C. En la segunda etapa se forma carbón vegetal, bioaceite y gas para rangos de temperatura de 200 a 600 °C. A temperaturas mayores a 600 °C transcurre la descomposición del carbón [141]. La gasificación es una etapa siguiente a la pirólisis, sucede a partir de los 1000 °C, la materia prima se calienta entre 2000 y 4000 °C en un reactor de plasma especializado, a esa temperatura la biomasa es prácticamente desintegrada sin ninguna complicación [143].

15). Parámetros de diseño

El proceso de pirólisis se ve afectado por los parámetros operativos como tiempo de reacción, tamaño de la partícula, temperatura, catalizadores y velocidad de calentamiento [144]. El tiempo que el material este reaccionando repercute en la conversión de los productos sólidos y en la composición de los vapores. La temperatura gobierna el sistema y la reacción, si la temperatura aumenta entonces la energía inducida en las moléculas es mayor que la entalpia de enlace lo que provoca la ruptura de la molécula [144].

El calor de reacción es la energía absorbida por un sistema donde los productos se encuentran a la misma temperatura de los reactantes y la presión debe estar definida para los diferentes estados termodinámicos de los reactivos y productos además de ser igual en cada sistema. Entonces el calor de reacción es definido como el cambio de entalpia y puede ser calculada como entalpia de formación o de combustión para cualquier reacción [145].

F. Metrología

La variación de parámetros es importante en una reacción de pirólisis por microondas especialmente para la medición de temperatura, sin embargo, no es fácil de obtener [146], por lo que en diversos estudios se han utilizado termómetros de infrarrojo y de fibra óptica [147]. En el empleo de termómetros infrarrojos solo es posible obtener lecturas fuera del material de pirólisis no en la superficie por lo que el empleo del termómetro de fibra óptica fue de radical importancia para obtener datos correctos de la temperatura de reacción, así lo explican Undri et al. [147]. Controlar la temperatura es significativamente importante, en la tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes equipos [148].

TABLA III. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES DISPOSITIVOS PARA MEDIR LA TEMPERATURA EN UNA REACCIÓN DE PIRÓLISIS

Dispositivo (sensor) para medir la temperatura	Ventajas	Desventajas
Termopar	Proporciona valores confiables de temperatura en las paredes del reactor.	En un ambiente de microondas los valores de temperatura son inexactos.
Infrarrojo	Ideal para la medición de temperaturas de los gases.	No puede medir la temperatura durante la reacción por microondas.
Fibra óptica	Mide la temperatura del material cuando la reacción se lleva a cabo.	Solo proporciona información de un solo punto a la vez.

Nota: Aunque el uso de sensores de fibra óptica resulta más adecuado en la implementación para ambientes de radiación de microondas, no dejan de presentar fallas además necesitan optimización antes de su implementación, tan solo pueden soportar temperaturas que rondan los 350 °C, fuente [148].

La medición exacta de la temperatura dentro de un reactor sigue siendo un problema importante sobre todo si se quiere conocer lo suficiente de como las microondas afectan al proceso [149].

VII. METODOLOGÍA

Es un hecho que la investigación de la pirólisis asistida por microondas es compleja por causa de diferentes factores como el tipo de materia prima y sus características, las condiciones de irradiación electromagnética, tiempo, temperatura, potencia y reactor [150]. Diseñar reactores no es algo simple porque un mismo proceso conlleva a tener múltiples soluciones, puede ser que el costo del reactor resulte factible y posible de financiar sin embargo es probable que la manera de operar no lo sea [95]. En primera instancia se debe elegir la configuración y el modo de funcionamiento. Normalmente hay muchas adaptaciones y combinaciones a elegir con el fin de obtener las mayores ganancias posibles, vigilar el impacto ambiental e identificar los riesgos que pudieran presentarse [99].

Se procede entonces a realizar las actividades y a trabajar los objetivos definidos anteriormente.

G. Tipo de reactor y modo de operación

Antes de avanzar en esta parte, se debe dejar en claro los alcances de la palabra “diseño”, dentro de la ingeniería química, el término “diseño” es aplicado a las reacciones químicas y por consiguiente a los reactores, más concretamente al diseño de la reacción donde interviene la estequiometría, la cinética química y la termodinámica [151]. Sin embargo, cuando se habla de diseño en un sentido amplio de la ingeniería se dice que: el diseño es un proceso que tiene como fin transformar los recursos en productos y sistemas para resolver alguna necesidad [152]. Si bien ambos conceptos son parecidos el primero es exclusivo de la ingeniería química, mientras que el segundo es un concepto más general que abarca diferentes disciplinas [152].

Teniendo presente lo anterior se expone que: aunque esta tesis trata sobre el diseño y desarrollo de un reactor para un proceso químico, como tal, no se enfocará en el diseño de la reacción sino más bien se centra en el diseño y desarrollo de la estructura y sistema que contendrá la reacción a partir de los conceptos de termodinámica, transferencia de calor, sistemas y ciencia de materiales, como se menciona en el marco teórico sobre las etapas de síntesis, análisis y evaluación para el caso del

diseño y también para la etapa de desarrollo donde interviene la etapa 1 (diseño del proceso) y la etapa 2 (diseño o ingeniería de detalle).

Conociendo los límites de esta investigación se procede entonces a comenzar la metodología y el desarrollo de este trabajo, para ello se hace mención de los requerimientos y características de nuestro reactor a construir.

16). Características específicas del reactor de microondas para la obtención de materiales carbonáceos

La termodinámica y la cinética química son dos principales fuentes de información para el diseño del reactor. De antemano sabemos que a través de un proceso de pirólisis a diferentes escalas de temperatura obtendremos diferentes materiales, pero ¿a qué rapidez ocurrirán esos cambios? Una ecuación cinética determina la velocidad de reacción, pero solo a través de los experimentos es como se puede conocer los coeficientes cinéticos de la ecuación. Los dispositivos para encontrar los datos experimentales son los reactores discontinuos y los reactores de flujo [95].

Si bien la termodinámica prevé el intercambio de calor entre los sistemas durante la ejecución de un proceso no puede prever el mecanismo por el cual se lleva a cabo; tampoco puede proporcionar datos sobre los equipos, configuraciones y características que se emplean en el proceso. Solo por medio de un análisis detallado sobre la transferencia de calor es como se pueden conocer estos parámetros [130].

Por ejemplo, un equipo desarrollado y patentado por un fabricante responderá a las especificaciones de rendimiento demandadas por el usuario. Estas especificaciones pueden tratarse como diseño del proceso; que involucra condiciones de operación, capacidad, presión y otros elementos, pero no involucra el espesor de las paredes del equipo, bases y tamaños de aperturas [153].

De modo que para comenzar el estudio se elegirá un reactor discontinuo o Batch porque es más fácil de operar en pequeñas escalas de laboratorio y además ayudara para obtener los datos experimentales de la reacción de pirólisis, así como la temperatura de reacción. Este reactor opera

en estado no estacionario en régimen isoterma y es un sistema cerrado (dependiendo de las fases de la reacción).

A partir de este punto, al conjunto ensamblado de todos los subsistemas y elementos lo llamaremos reactor de microondas o simplemente reactor. La fuente de calentamiento (magnetron), cavidad de resonancia y sistema electrónico, es lo que se conoce como horno de microondas, será un subsistema del reactor. El crisol es el objeto encargado de contener la muestra de reacción además de soportar la transferencia de calor. El transportador de gas y el contenedor del crisol ensamblados junto con el crisol, los denominaremos como: “núcleo del reactor”. Al equipo encargado de medir y registrar los datos de temperatura será nombrado sistema electrónico de monitoreo (SEDM). El equipo de resguardo de datos y apoyo de información lo llamaremos base de datos. En conjunto; horno de microondas, crisol, transportador de gases, contenedor del crisol, sistema electrónico de monitoreo y base de datos, se definirán como reactor de microondas.

Una vez determinado el modo de operación del reactor, el siguiente paso es mencionar provisionalmente los materiales de los que estará constituido el núcleo. En un ambiente de microondas no puede haber la posibilidad de utilizar materiales metálicos debido a la formación de arcos eléctricos y posteriormente derivar en la descompostura del horno. Por tal motivo se deberán utilizar ciertos materiales que pueden introducirse dentro de la cavidad además de no verse afectados por las altas temperaturas de hasta 1000 °C y proporcionar un espacio inerte libre de oxígeno, lo cual, representa un gran reto. De primera instancia se pueden proponer algunos materiales que se han probado con anterioridad, por ejemplo; cerámica, cuarzo, arcilla cocida, vidrio Pyrex de laboratorio e incluso los crisoles de carburo de silicio son diversas alternativas a tomar en cuenta y entonces todo dependerá de la facilidad de acceso a ese tipo de materiales y desde luego su disponibilidad.

17). Balance y velocidad de reacción

La primera etapa del diseño de reactores químicos se centra en el balance de materia de cualquier compuesto que entra a la reacción en una unidad de tiempo, los moles introducidos son igual a los moles extraídos, más moles de reacción, más moles que se acumulan. Si la composición es

independiente del volumen entonces la muestra es válida para todo el volumen del reactor, si no, el balance debe aplicarse en un diferencial de volumen y posteriormente integrar según la variación de la muestra. Para un reactor discontinuo el balance puede simplificarse eliminando moles extraídos y moles introducidos de la ecuación, si el reactor opera en estado estacionario solo obtendremos los moles de reacción.

En el caso de que el reactor opere en régimen no isotérmico entonces el balance de materia será acompañado del balance de energía el cual es: calor introducido de alimentación, más calor debido a la reacción y será igual a: calor intercambiado hacia el medio externo, más calor perdido o acumulado de la masa de reacción, más calor extraído por el flujo de salida [154].

La velocidad de reacción indica la velocidad de moles que se consumen para formar otra especie, es representada por la ecuación 14.

$$-r_A = f(T, C_i) \quad (14)$$

La velocidad de reacción es una función de la temperatura y la concentración, tanto r_A y la concentración C_i son determinadas por experimentación además de la temperatura [155].

Un reactor discontinuo es ideal para probar nuevos procesos de los que hace falta información sobre la reacción, también funcionan para procesos difíciles que no se pueden pasar a equipos continuos, una gran ventaja es la alta conversión en un determinado tiempo, sin embargo, las características de los productos pueden variar [155].

H. Geometría y dimensionamiento

Todo diseño parte inicialmente de la necesidad de buscar soluciones a un problema en específico de modo que se pueda cumplir un objetivo deseado. Normalmente es imposible modelar un problema difícil utilizando herramientas de la matemática que engloben todos los aspectos importantes simultáneamente, para ello, resulta razonable indagar en la teoría de sistemas con el

único propósito de subdividir en pequeñas partes el problema inicial y que para cada parte sea posible su solución, de modo que se pueda resolver el problema principal [156].

Hay dos principales variables diferentes entre sí, las variables de operación que corresponden a condiciones de operación, por ejemplo: número de etapas, caudal, temperatura y presión, también conocidas como parámetros de diseño y las variables estructurales que corresponden a la estructura y determinan el uso de diferentes equipos, sus características y conexión [156].

18). Volumen

En la mayoría de los reactores discontinuos el volumen es constante debido a que son recipientes sólidos y no dependen de un volumen en específico como si lo hacen los reactores CSRT [155], por lo que se puede proponer un determinado volumen para el crisol solo dependiente de la cavidad de resonancia del horno y del contenedor del crisol. Tal como Balseca-Sampedro et al. [157] lo proponen. Por lo tanto, la figura 7; representa la propuesta de crisol, tapa y contenedor.

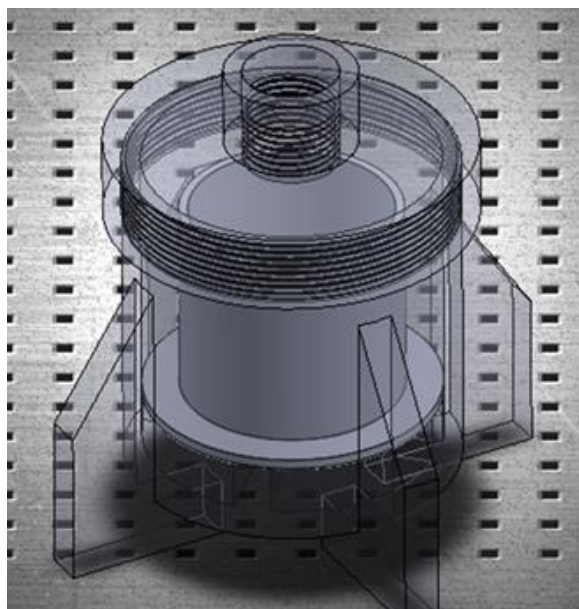


Fig. 7. Crisol, tapa y contenedor

Nota: La ilustración muestra el ensamblaje del contenedor y su tapa, acoplado en el interior se encuentra el crisol.

Las dimensiones del crisol como ya se estableció anteriormente para pruebas iniciales de experimentación se propone y se soluciona la ecuación 15.

$$V = A * h \quad (15)$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h, V = 1130.976 \text{ cm}^3$$

Donde V representa el volumen, A es el área del cilindro y h es la altura. La forma cilíndrica del contenedor es mejor que otras configuraciones y depende del crisol [157, 158], el contenedor posee otras características como: la implementación de cuatro estabilizadores que separan el contenedor del horno y mejoran la estabilización del núcleo. La figura 8 muestra las medidas de diseño para el crisol.

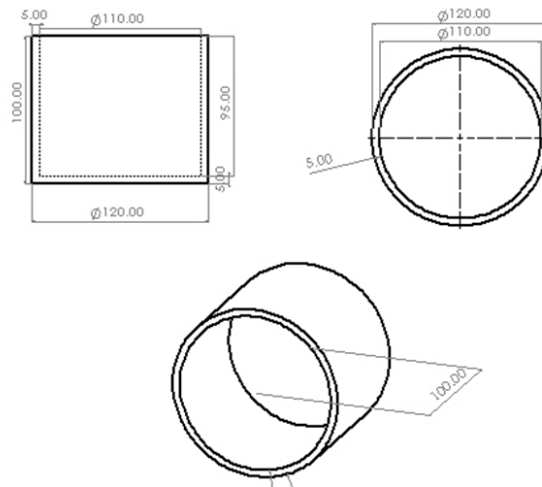


Fig. 8. Dimensiones del crisol

Nota: Las medidas están expresadas en milímetros por conveniencia se cambian a cm.

I. Análisis térmico

Los procesos térmicos ocurren con el incremento de la temperatura en un cuerpo, debido al movimiento de las moléculas que provocan transformaciones de fusión, sinterización, sublimación y estructuración [159]. El análisis térmico trata sobre la medición de los cambios que puede presentar una sustancia. Este tipo de medición se realiza sobre valores de peso, compresibilidad, resistencia al flujo de calor y/o altas temperaturas y la deformación de la estructura [159]. A menudo en las actividades cotidianas más concretamente en la ingeniería, existen diversos equipos que transfieren calor. Por ejemplo: calderas, refrigeradores, hornos, intercambiadores de calor,

colectores solares y calentadores, se diseñan tomando en consideración el análisis de transferencia de calor [160].

Las dificultades asociadas a estos equipos y sobre la transferencia de calor se sitúan en dos aspectos: por una parte, están los problemas de dimensionamiento que gestionan el tamaño de los equipos con el propósito de transferir calor a una fracción definida para una diferencia de temperatura, y por otra, los de capacidad total cuyo fin es resolver la razón de transferencia de calor a una particular diferencia de temperatura [160].

19). Producción de energía térmica

Todo medio que transforme energía eléctrica, mecánica, química o nuclear en energía térmica, se dice entonces que conduce calor y mediante el análisis de conducción de calor estas formas de transformación, se les puede llamar como generación de calor [161].

Otra circunstancia para la generación de calor es la absorción de radiación electromagnética por un medio, por lo tanto es un fenómeno que transcurre de manera volumétrica. El calor generado sobre unidades de volumen es representado por W/m^3 [161].

El reactor para el caso de este estudio, su principal fuente de energía es la radiación de ondas en el rango de las microondas del espectro electromagnético emitidas por el dispositivo llamado magnetrón, incorporado originalmente por el fabricante del horno, con una potencia que oscila entre los 1000 a 1200 watts y cuyo volumen efectivo de la muestra para la reacción es de 677.113 cm^3 . Entonces la fracción de calor generado por la muestra será la potencia consumida por la muestra de reacción mediante las ecuaciones 16 y 17 suponiendo de manera preliminar que el magnetrón emite el 100 % de su potencia nominal.

$$\frac{de}{dt} = \frac{potencia}{V_{muestra}} \quad (16)$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{Pot_{mag}}{\pi * r^2 * h} = \frac{1000 \text{ W}}{677.113 \text{ cm}^3} = 1.47 \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} = 1.47 \times 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

mientras que el flujo de calor en la superficie exterior de la muestra está dado por:

$$\frac{dQ_A}{dt} = \frac{Pot_{mag}}{\pi * D * h} \quad (17)$$

$$\frac{dQ_A}{dt} = \frac{1000 \text{ W}}{246.21 \text{ cm}^2} = 4.06 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} = 4.41 \times 10^4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Para análisis más precisos se recomienda utilizar la ecuación 1 y 4 siempre y cuando se quiera representar de forma gráfica (simulación) el proceso de calentamiento dentro del horno de microondas.

20). Balance de energía

En referencia a los ensayos experimentales y a la primera ley de la termodinámica, la energía no se puede crear o destruir solo se transforma, el cambio de la energía de un sistema durante un proceso es igual a la energía total que se transfiere desde o hacia el sistema [162]. Dicho de otra manera, la energía total del sistema será igual a la diferencia de energía entrante y la energía saliente que a su vez es igual a la suma de todas las energías que intervienen (energía potencial, energía cinética y energía interna).

Para los sistemas cerrados estacionarios (a temperatura, presión y composición constantes, sin flujo de masa, pero sí de energía a través de las fronteras del sistema) tanto la energía cinética como la energía potencial son constantes, entonces se dice que el cambio total de energía de un sistema es igual al cambio de energía interna siempre que no haya interacción de trabajo [162].

El crisol situado dentro del contenedor actúa como un sistema cerrado, no transfiere masa hacia fuera de las fronteras del sistema solo transfiere calor.

Por consiguiente, el balance de energía queda como: la diferencia de energía entrante y saliente es igual al cambio total de energía interna debido a que no existen interacciones de trabajo, energía cinética y/o energía potencial. Entonces el cambio total de energía interna es igual al total de calor transferido por el sistema, la ecuación 18 resume el balance de energía.

$$Q = mc_v \Delta T \quad (18)$$

Esta ecuación expresa el total de calor transferido o el cambio de energía interna en términos de masa, calor específico a volumen constante y la diferencia de temperatura.

Cabe aclarar que el crisol funciona como un sistema estacionario siempre y cuando la temperatura en el interior no varíe con el tiempo y el horno se mantenga a cierta potencia establecida.

El balance para el crisol se establece de la siguiente manera:

$$m = 0.285 \text{ kg}$$

$$c_v = 750 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 400 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = (0.285 \text{ kg})(750 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(375 \text{ }^\circ\text{C}) = 80150.25 \text{ J}$$

La cantidad de energía térmica que puede transferir el crisol es de aproximadamente 80.150 kJ. Cuando se llega a una temperatura de 400 °C en el interior del horno.

21). Conducción de energía

A menudo cuando se lleva a cabo un proceso, uno de los propósitos más significativos es conocer la distribución de la temperatura y su variación en determinados puntos del límite del medio con el fin de aplicar la ley de Fourier de conducción de calor. Otro aspecto de suma importancia es el conocimiento de la distribución de la temperatura para garantizar la integridad de la estructura, determinar el esfuerzo y la expansión térmica, además de calcular el espesor del material (aunque inicialmente ya se propuso un grosor no es incorrecto calcular si es el adecuado) [163].

El crisol del reactor tiene forma cilíndrica y por lo tanto el análisis de conducción de calor debe efectuarse en coordenadas cilíndricas, como ya se mencionó anteriormente, es de suma importancia conocer en qué dirección se transfiere calor, de igual manera, proponer configuraciones que incorporen otros elementos de diseño como ductos de gas inerte o de síntesis, ductos de sensores

como termopares etc. Se sabe de antemano que la temperatura es una cantidad escalar, sin embargo, la transferencia de calor no lo es.

La transferencia de calor del crisol de forma cilíndrica, involucra la transferencia por lo menos en la dirección r del plano, mientras que la propagación de energía en la variable θ (que es el Angulo de r respecto al eje de las abscisas) y en el eje z , se consideran no influyentes en los cálculos, el análisis se realiza en estado estacionario donde las temperaturas de las superficies interior y exterior del crisol se mantienen constantes y no dependen del tiempo transcurrido, es decir, cuando el horno se mantiene a cierta potencia de operación y no hay cambios en el aumento o disminución en el rendimiento, la temperatura solo depende de la posición y de las condiciones de frontera, no se considera la generación de calor en el interior del crisol (la generación solo involucra el volumen de la muestra). La ecuación 19 describe la ecuación de conducción de energía en coordenadas cilíndricas [164].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (19)$$

Sin embargo, la ecuación 19 puede resumirse a la ecuación 20 con el fin de aplicarla en el análisis en estado estacionario, las coordenadas θ y z pueden suprimirse.

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (20)$$

La temperatura en el interior por los datos anteriores se estima en 400 °C, donde ocurre la reacción química, la conductividad térmica (k) es 1.2 W/m*°C, el radio efectivo es de 5.5 cm, y el grosor de la cerámica es de 0.5 cm y existe generación de energía (\dot{e}) suponiendo que ahora el magnetrón tiene una eficiencia del 80 %, con estos datos se puede obtener la distribución de la temperatura superficial del crisol y la razón de perdida de calor.

La solución de la ecuación diferencial número 20:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \rightarrow r \frac{dT}{dr} = C_1$$

$$\left(\frac{1}{r} \right) \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{C_1}{r} \rightarrow \frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \text{ la solución de la ecuación diferencial respecto a } r:$$

$$\int \frac{dT}{dr} dr = \int \frac{C_1}{r} dr \rightarrow T(r) = C_1 \ln r + C_2$$

Estableciendo las condiciones de frontera:

$$T(r)_1 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T(r)_2 = T_S$$

Resolviendo:

$$T(r)_1 = T_1 = C_1 \ln r + C_2$$

$$T(r)_2 = T_2 = C_1 \ln r + C_2$$

Del sistema de ecuaciones:

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad C_2 = T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln r_1$$

Sustituyendo para $T(r)$:

$$T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (\ln r) + T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln r_1$$

$$T(r) = (T_2 - T_1) \left(\frac{\ln r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right) - \left(\frac{\ln r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right) T_1 = (T_2 - T_1) \left(\frac{\ln r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} - \frac{\ln r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right) + T_1$$

$$T(r) = (T_2 - T_1) \left(\frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right) + T_1$$

Si la temperatura de la muestra es uniforme es decir es la misma en todo el volumen entonces $r = r_1$ la temperatura en la superficie es:

$$\frac{\dot{e}}{2} r_1 = -k \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \left(\frac{1}{r} \right)$$

para la temperatura 2 (superficie):

$$\frac{\dot{e} r_1^2}{2k} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = T_2 - T_1 \rightarrow T_2 = T_1 - \frac{\dot{e} r_1^2}{2k} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$T_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C} - \frac{(8.86 \times 10^5 \frac{\text{W}}{\text{m}^3})(0.003025\text{m})}{2.4 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} \ln\left(\frac{0.060\text{m}}{0.055\text{m}}\right) = 303.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

La pérdida de calor en todo el volumen está condicionada a una razón de:

$$\dot{Q} = 2\pi kL \left(\frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right) = 2(3.1416) \left(1.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \right) (0.095 \text{ m}) \left(\frac{400 \text{ }^\circ\text{C} - 303.7 \text{ }^\circ\text{C}}{\ln(1.09)} \right) = 792.75 \text{ Watts}$$

La figura 9 muestra de manera gráfica la variación de la temperatura respecto al radio del crisol.

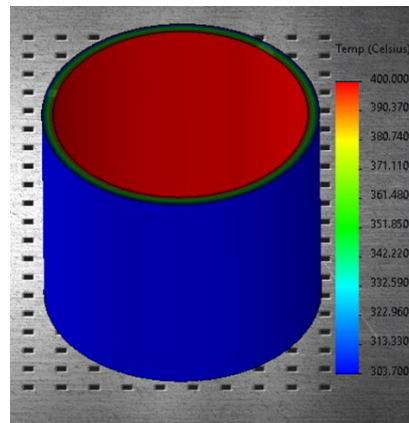


Fig. 9. Temperatura del crisol

Nota: La temperatura en el interior del crisol se estableció en 400 °C uniforme en todo el material, por este método teórico se prevé que la temperatura en el exterior es de aproximadamente 303.7 °C, mientras que la pérdida de calor transcurre a una razón de aproximadamente 800 W. (se comprobó en el software de simulación), la figura 10 muestra una gráfica de la distribución de temperatura.

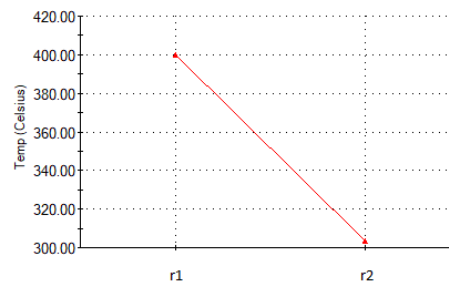


Fig. 10. Gráfica de la distribución de temperatura

Nota: El punto r1 corresponde al radio interno del crisol, mientras que el punto r2 corresponde al radio externo de las paredes del crisol, la gráfica muestra la variación de temperatura a través de diferentes puntos.

En ocasiones resulta más conveniente resolver los problemas de transferencia de calor en un medio sin utilizar ecuaciones diferenciales e introduciendo el concepto de resistencia térmica en similitud

a la resistencia eléctrica. La tasa de transferencia de calor puede entenderse como flujo de energía y la conjunción del área y espesor del material, así como la conductividad térmica se le puede llamar resistencia a este flujo [165]. Normalmente existen expresiones para describir esta resistencia para cada tipo de configuración, en paredes cilíndricas se utiliza la ecuación 21.

$$R_{Thc} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL} \quad (21)$$

$$R_{Thc} = \frac{0.0870}{0.7162} = 0.1214 \frac{K}{W}$$

Sustituyendo en la ecuación de transferencia de calor por conducción de Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{R_{Thc}} = \frac{400 \text{ °C} - 303.7 \text{ °C}}{\frac{\ln\left(\frac{0.060 \text{ m}}{0.055 \text{ m}}\right)}{2(3.1416)\left(1.2 \frac{W}{m \cdot \text{°C}}\right)(0.095 \text{ m})}} = 793.24 \text{ W}$$

La resistencia térmica por contacto normalmente se da en situaciones donde dos superficies convergen casi perfectamente, se puede solucionar a través del concepto de resistencia térmica de interfase.

22). *Expansión y choque térmico*

Cuando a los átomos de cualquier material se les suministra energía térmica entonces comienzan a vibrar y aumenta la distancia entre ellos, en consecuencia, aumentan las dimensiones del material, el aumento de las dimensiones del material está representado por el coeficiente de expansión térmica, para ciertos materiales que se funden a temperaturas elevadas como los materiales cerámicos, tienen coeficientes de expansión térmica mucho más bajos a comparación de algunos metales. Este coeficiente depende de la temperatura; puede variar o disminuir, sin embargo, en ocasiones se toma como una constante para ciertos rangos de temperatura [166].

Las fuerzas aplicadas para la ruptura en materiales se catalogan como térmicas o mecánicas, para una pieza u objeto que se expone a un rápido enfriamiento se genera en él un gradiente de temperatura que deriva en distintas contracciones en diferentes puntos de la pieza, si los esfuerzos

son altos, pueden provocar fallas. No se recomienda someter materiales vidriosos que están a una temperatura elevada en ambientes de baja temperatura de lo contrario la fractura y la avería son inminentes, caso contrario si el material se calienta de manera repentina también ocurrirán este tipo de fallas, a esto se le conoce como choque térmico. Este fenómeno depende de ciertos factores como: la conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, esfuerzo de fractura y transformación de fase. Por ejemplo, un procedimiento para calcular la resistencia al choque térmico es determinar la diferencia máxima de temperatura que la pieza puede soportar durante un procedimiento sin modificar sus propiedades mecánicas, para algunos materiales cerámicos esta diferencia de temperatura oscila entre los 3000 °C, 950 °C, 350 °C y 200 °C [166].

23). Etapa transitoria

En la etapa de calentamiento-enfriamiento del núcleo del reactor resulta razonable analizar el sistema bajo los parámetros concentrados y en estado transitorio debido a que la temperatura varía con el tiempo y la posición, es necesario realizar este análisis para determinar de forma preliminar el tiempo inicial de reacción y el tiempo final, también para visualizar de manera gráfica el aumento y disminución de temperatura así como determinar el instante adecuado para revisar la muestra de reacción sin que exista el riesgo de choque térmico en el crisol o en el reactor en general.

i). Calentamiento

Al inicio del proceso la muestra se calienta a una cierta temperatura durante un periodo de tiempo, Wu et al. [86] obtuvieron los valores de la temperatura cuando la muestra reacciona en un determinado tiempo para una determinada potencia, si se hace referencia a sus resultados, suponiendo y ajustando de manera lógica las potencias y temperaturas para este análisis entonces se obtiene que, para una potencia de 800 Watts, la temperatura aumentara 13.5 °C por minuto.

Inicialmente el crisol junto con la muestra se encuentra a temperatura ambiente de 24 °C y se calienta la muestra hasta alcanzar los 400 °C que es una temperatura segura para que ocurra la reacción de pirólisis sin ninguna complicación o contratiempo, el tiempo requerido para que el

crisol alcance la temperatura de 390 °C estará determinado por la ley de calentamiento de Newton representada por la ecuación diferencial 22 [167].

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_M) \quad (22)$$

Cuya solución de la ecuación es igual a:

$$T(t) = T_M + Ce^{kt}$$

Entonces:

$$24 = 400 + Ce^{kt} \rightarrow 24 - 400 = Ce^{kt}$$

Suponiendo que t inicial es igual a cero:

$-376 = C$, la constante C es igual a -376 , de modo que la temperatura aumento 13.5 °C en un minuto se tiene que:

$$T(1) = 24 + 13.5 = 37.5 \text{ °C}$$

La temperatura $T(1)$ determina:

$37.5 = -376e^{kt} + 400 \rightarrow 37.5 - 400 = -376e^{kt} \rightarrow -362.5 = -376e^{kt}$, y sustituyendo t por el tiempo 1:

$$\frac{-362.5}{-376} = e^k, \text{ obtenido la constante de proporcionalidad } k:$$

$$\ln\left(\frac{-362.5}{-376}\right) = -0.036$$

Para conocer el tiempo donde el crisol alcanza los 390 °C se determina de la siguiente manera:

$$390 - 400 = -376e^{-0.036t} \rightarrow \frac{-10}{-376} = e^{-0.036t} \rightarrow t = \ln\left(\frac{-10}{-376}\right) \left(\frac{1}{-0.036}\right) \rightarrow t = 100.75 \text{ minutos.}$$

Para obtener el tiempo donde la temperatura es de 300 °C (que es una temperatura segura para los dispositivos que se encuentran fuera del núcleo y que además es una temperatura ideal para la carbonización de la biomasa) se determina a partir de lo siguiente:

$$300 - 400 = -376e^{-0.036t} \rightarrow \frac{-100}{-376} = e^{-0.036t} \rightarrow t = \ln\left(\frac{-100}{-376}\right) \left(\frac{1}{-0.036}\right) \rightarrow t = 36.7 \text{ minutos}$$

Las figuras 11 y 12 muestran de manera gráfica ambas temperaturas.

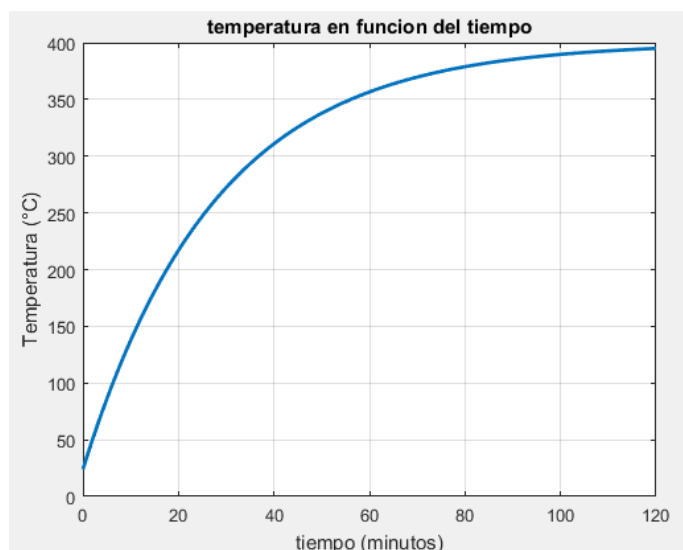


Fig. 11. Calentamiento del equipo hasta los 400 °C para un determinado tiempo

Nota: Cuando el tiempo de calentamiento llega a 101 minutos, la temperatura se sitúa en aproximadamente 390 °C.

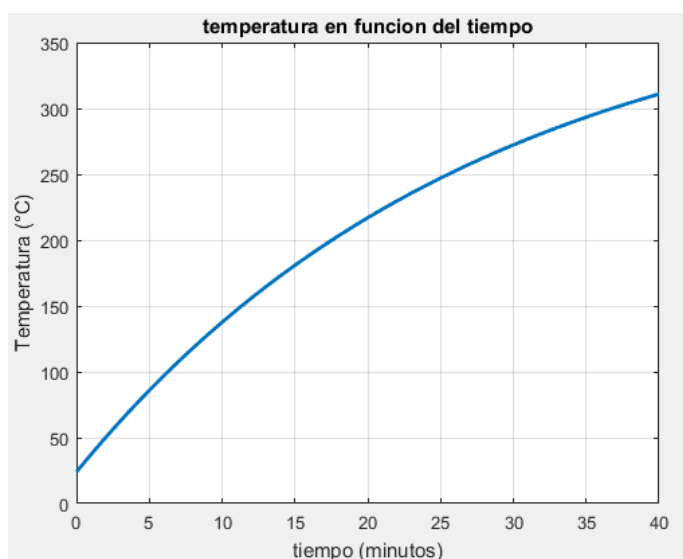


Fig. 12. Calentamiento del equipo hasta los 300 °C para un determinado tiempo

Nota: El equipo se calienta hasta los 300 °C, el tiempo estimado será de aproximadamente 37 minutos.

j). Enfriamiento

Al final del proceso, cuando la muestra alcanza su temperatura máxima de reacción establecida por el usuario, es recomendable medir y conocer la temperatura de choque térmico del material así

como saber el tiempo que tarda el crisol en situarse en una temperatura adecuada para evitar fisuras en el dispositivo, además de garantizar la seguridad del personal. Cuando el proceso termina, el aire fluye de manera controlada por los pequeños conductos de gas de síntesis a temperatura ambiente y por convección natural enfriando lentamente el reactor. Para determinar el tiempo de enfriamiento se empleó el análisis de sistemas concentrados.

Para desarrollar este análisis primeramente se calcula el número de Biot en referencia a la longitud característica de la pieza, volumen y área superficial, este número es aceptable siempre y cuando sea menor a 0.1, de esta manera el análisis puede efectuarse y es válido ya que se considera que la temperatura es uniforme en todo el material. Se tienen las propiedades del material: calor específico a presión constante (c_p) = $836.8 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$, densidad (ρ) = $3160 \frac{kg}{m^3}$, y conductividad térmica (k) = $1.2 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$, si la temperatura ambiente es de $24 \text{ }^\circ C$ y para que ocurra el choque térmico en el material cerámico debe existir una diferencia de temperatura de $200 \text{ }^\circ C$, entonces la temperatura segura para retirar la muestra será de $224 \text{ }^\circ C$ o menor, el análisis se efectúa para determinar el tiempo que tarda el crisol en llegar a esa temperatura de seguridad y también para una temperatura ambiente de $24 \text{ }^\circ C$. mientras que el coeficiente de convección (h) para un gas de convección no forzada es de aproximadamente $5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, con estos datos es posible determinar los tiempos de enfriamiento. Las ecuaciones 23 y 24 se utilizan para determinar la longitud característica (L_c) y el número de Biot.

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (23)$$

$$L_c = \frac{0.0009m^3}{0.0328m^2} = 0.02$$

El número de Biot se calcula de la siguiente forma:

$$Bi = \frac{hL_c}{K} \quad (24)$$

$Bi = \frac{(5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})(0.02)}{1.2 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0.083$, el número de Biot < 0.1 , por lo tanto, el criterio de análisis de sistemas concentrados es aplicable.

Con la ecuación 25 obtendremos el factor “b” y el tiempo:

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-bt} \quad (25)$$

$$b = \frac{h}{\rho c_p L_c} = \frac{5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}{\left(3160 \frac{kg}{m^3}\right) \left(836.8 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right) (0.02)} = 9.4 \times 10^{-5} s^{-1}$$

Para t :

$$\ln\left(\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) \left(\frac{1}{-b}\right) = t \rightarrow \ln\left(\frac{224 - 24}{400 - 24}\right) \left(\frac{1}{-9.4 \times 10^{-5}}\right) = 6715 \text{ s.} = 1.8 \text{ horas}$$

Si el crisol se calienta hasta 400 °C, se deberá esperar hasta 1.8 horas o más para retirar de manera adecuada la muestra del interior del horno sin problemas para el equipo por choque térmico, si se desea retirar la muestra a temperatura ambiente entonces el cálculo de t se efectúa como:

$$\ln\left(\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) \left(\frac{1}{-b}\right) = t \rightarrow \ln\left(\frac{25 - 24}{400 - 24}\right) \left(\frac{1}{-9.4 \times 10^{-5}}\right) = 63080 \text{ s.} = 17 \text{ horas}$$

Para un calentamiento de 300 °C:

$$\ln\left(\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right) \left(\frac{1}{-b}\right) = t \rightarrow \ln\left(\frac{224 - 24}{300 - 24}\right) \left(\frac{1}{-9.4 \times 10^{-5}}\right) = 3426 \text{ s.} = 0.95 \text{ horas (casi 1 hora)}$$

Si se calienta el material a 300 °C, el tiempo seguro para retirar la muestra es de 0.95 horas o más.

La figura 13 muestra una gráfica de la variación de la temperatura.

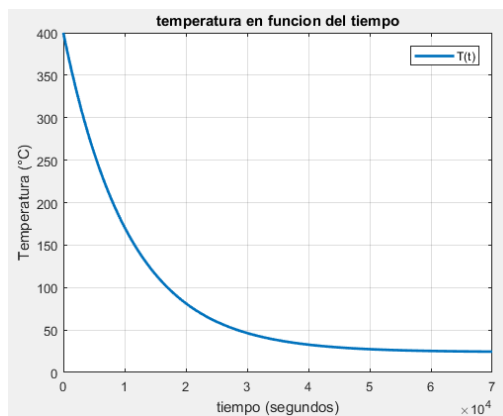


Fig. 13. Enfriamiento del equipo para un determinado tiempo

Nota: Esta gráfica muestra simultáneamente la temperatura para cada tiempo de estudio, representa el enfriamiento del crisol.

24). *Modelo térmico completo del sistema*

Los sistemas térmicos juegan un papel importante en diferentes dispositivos de la ingeniería, máquinas y procesos industriales son un ejemplo de ello. Las condiciones de estos sistemas junto con los sistemas hidráulicos/neumáticos, se analizan bajo los conceptos de parámetros distribuidos cuando se quiere obtener un análisis a detalle o extremadamente exacto, la solución de estas ecuaciones son series infinitas y ecuaciones implícitas y en muy pocos casos se puede obtener una solución analítica.

Pero se pueden utilizar aproximaciones ya sea en el resultado o durante la formulación del modelo, normalmente los sistemas térmicos operan bajo variables que cambian de un punto a otro, y de ser así, se puede obtener una linealización del sistema bajo ciertas propiedades que se pueden concentrar en un solo punto, entonces el sistema se puede modelar bajo el concepto de parámetros concentrados cuya solución es posible mediante métodos numéricos o analíticos y las soluciones son razonablemente correctas [168].

En los sistemas térmicos interviene el flujo y almacenamiento de calor, de igual manera el cambio de temperatura de un punto a otro ($\Delta T(^{\circ}C)$) y el flujo de calor ($q(J/s = Watts)$), para el caso de estudio asumiremos que la temperatura se encuentra concentrada y es la misma en todo el objeto, la temperatura es una medida de energía que esta almacenada en un cuerpo si no hay cambios de fase, por lo tanto, se asume que es una variable de estado [169]. Otras variables de estado que pueden influir o analizarse son la resistencia térmica y el flujo de calor.

La capacitancia térmica relaciona la temperatura de un objeto con el flujo de calor que entra hacia él, es decir, la característica de almacenar calor dentro del cuerpo, denotada por la expresión 12, la cual dice que la capacitancia térmica de un cuerpo será igual a la masa por el calor específico [169]. Por las leyes de conservación de la energía, la ecuación diferencial que gobierna el cuerpo es similar a la ecuación 13 y se expresa mediante la ecuación 26.

$$C \frac{dT}{dt} = q_{ent} - q_{sal} \quad (26)$$

La resistencia térmica entre 2 cuerpos esta denotada por la ecuación 11 y la ecuación de resistencia térmica en paredes cilíndricas, sin embargo, la resistencia al flujo de calor que pasa de un fluido a un sólido es igual a la ecuación 27.

$$R_{fs} \frac{1}{hA} \quad (27)$$

El modelo térmico que representa este proyecto se realiza construyendo el sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el sistema tomando como referencia la ecuación 12, 13 y 27, se tiene entonces tres diferentes capacitancias: la primera corresponde al crisol, la segunda al gas nitrógeno que fluye dentro del reactor cuyo volumen está limitado al contenedor que encierra todo el sistema y por último la capacitancia del contenedor, también existen tres resistencias térmicas: la resistencia térmica del crisol al gas inerte, la segunda corresponde entre el gas inerte y el contenedor y la resistencia que ejerce el contenedor al medio circundante, lo cual se puede suponer que sea temperatura ambiente (T_{amb}), hay una entrada de calor que es la generación de calor de la muestra que se distribuye por todo el sistema, el flujo de calor de la muestra pasa a través de crisol y este a su vez lo inyecta al gas circundante y por último, parte de ese calor fluye hacia el contenedor que lo disipa hacia el medio circundante. Entonces para realizar las aproximaciones se establece que hay 3 flujos de calor y un flujo de calor entrante.

Cabe aclarar que en este análisis supondremos que el material se calienta de forma inicial con el calor de entrada máximo con el fin de obtener las respuestas de las temperaturas de salida y de esta manera visualizar el rendimiento en base a la ciencia de materiales, que sugiere que un calentamiento rápido puede provocar la avería de la pieza, este análisis se realiza con los valores críticos de operación del sistema, de esta forma funcionara para valores bajos o seguros de operación.

Entonces nuestras variables de estado son (T_1 , T_2 y T_3), las entradas al sistema T_{amb} y $q_{ent} = 793e^{-kt}$, se procede a calcular las capacitancias y resistencias de cada componente en función a la masa (densidad * volumen) y calor específico de cada sustancia, para el caso de solidos el calor específico a volumen y presión constante se puede presumir como el mismo mientras que para los gases dependerá de su temperatura.

Capacitancias:

$$C_1 = mc = (0.684 \text{ kg})(836.8 \frac{J}{\text{kg}^\circ\text{C}}) = 572.37 \frac{J}{^\circ\text{C}}$$

$$C_2 = \rho Vc = (0.50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0.00208 \text{ m}^3)(1086 \frac{J}{\text{kg}^\circ\text{C}}) = 1.13 \frac{J}{^\circ\text{C}}$$

$$C_3 = mc = (5.14 \text{ kg})(836.8 \frac{J}{\text{kg}^\circ\text{C}}) = 4301.15 \frac{J}{^\circ\text{C}}$$

Resistencias:

$$R_1 = \frac{L}{kA} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.20 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \text{ m}^2} = 0.25 + 0.12 = 0.37 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{1}{hA} = \frac{1}{5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}} * 0.095 \text{ m}^2 = 2.1 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{L}{kA} = \frac{0.11}{0.075} = 1.57 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Construcción del sistema de ecuaciones:

Capacitancia C_1 , C_2 y C_3 :

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_{ent} - q_1,$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = q_1 - q_2,$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = q_2 - q_3$$

Flujos de calor:

$$q_1 = \frac{T_1 - T_2}{R_1},$$

$$q_2 = \frac{T_2 - T_3}{R_2},$$

$$q_3 = \frac{T_3 - T_{amb}}{R_3}$$

Sustituyendo en las ecuaciones diferenciales:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_{ent} - \frac{T_1 - T_2}{R_1},$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{R_1} - \frac{T_2 - T_3}{R_2},$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = \frac{T_2 - T_3}{R_2} - \frac{T_3 - T_{amb}}{R_3}$$

Representación en variables de estado (\dot{x}_1 , \dot{x}_2 y \dot{x}_3):

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{-1}{R_1} x_1 + \frac{1}{R_1} x_2 + q_{ent} \right]$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_2} \left[\frac{1}{R_1} x_1 - \frac{1}{R_1} x_2 - \frac{1}{R_2} x_2 + \frac{1}{R_1} x_3 \right] = \left[\frac{1}{R_1} x_1 - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) x_2 + \frac{1}{R_1} x_3 \right]$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_3} \left[\frac{1}{R_2} x_2 - \frac{1}{R_2} x_3 - \frac{1}{R_3} x_3 + \frac{1}{R_3} T_{amb} \right] = \left[\frac{1}{R_2} x_2 - \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) x_3 + \frac{1}{R_3} T_{amb} \right]$$

Simplificando:

$$\dot{x}_1 = \frac{-1}{C_1 R_1} x_1 + \frac{1}{C_1 R_1} x_2 + \frac{1}{C_1} q_{ent}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_2 R_1} x_1 - \frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) x_2 + \frac{1}{C_2 R_1} x_3$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_3 R_2} x_2 - \frac{1}{C_3} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) x_3 + \frac{1}{C_3 R_3} T_{amb}$$

Representación en la ecuación de espacio de estados (a):

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, y = \mathbf{C}x_0 \quad (\text{a})$$

el vector de estados $x = T_1, T_2$ y T_3 , el vector de entrada $u = q_{ent}$ y T_{amb} , y el vector de salida $x_0 = T_1(0), T_2(0)$ y $T_3(0)$.

La matriz de estado \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_1 R_1} & \frac{1}{C_1 R_1} & \mathbf{0} \\ \frac{1}{C_2 R_1} & -\frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) & \frac{1}{C_2 R_1} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{C_3 R_2} & -\frac{1}{C_3} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \end{bmatrix} + \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{C_3 R_3} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} T_1(0) \\ T_2(0) \\ T_3(0) \end{bmatrix}$$

La solución de la ecuación (a) puede efectuarse con la implementación del método numérico de Runge-Kutta de orden 4 descrito por la ecuación 28 [170].

$$y_{n+1} = y_n + h(w_1 k_1 + w_2 k_2 + \dots + w_m k_m) \quad (28)$$

El procedimiento de Runge-Kutta de 4 orden puede efectuarse de la siguiente manera:

$$y_{n+1} = y_n + h(w_1k_1 + w_2k_2 + w_3k_3 + w_4k_4)$$

Donde:

$$k_1 = f(x_n, y_n)$$

$$k_2 = f(x_n + \alpha_1 h, y_n + \beta_1 h k_1)$$

$$k_3 = f(x_n + \alpha_2 h, y_n + \beta_2 h k_1 + \beta_3 h k_2)$$

$$k_4 = f(x_n + \alpha_3 h, y_n + \beta_4 h k_1 + \beta_5 h k_2 + \beta_6 h k_3)$$

Se implemento un software de cálculo numérico para resolver la ecuación (a) mediante el método numérico de Runge-Kutta, el resultado se muestra en la figura 14.

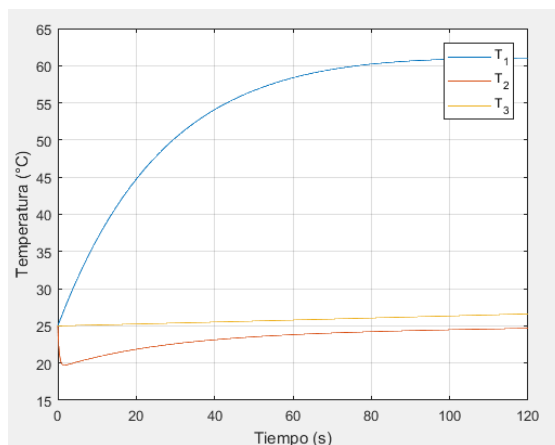


Fig. 14. Representación gráfica de las salidas del sistema

Nota: La gráfica muestra las temperaturas del sistema, la temperatura 1 corresponde a la capacitancia del crisol que recibe en gran proporción el flujo de calor proveniente de la reacción, mientras que la temperatura 2 corresponde a la capacitancia del gas inerte (nitrógeno) y la temperatura 3 muestra la temperatura de la capacitancia del contenedor en el interior del horno, estas temperaturas son consideradas como variables de estado del sistema.

J. Diseño de componentes

Hasta este punto se ha trabajado con la principal variable de operación que interviene en el funcionamiento del reactor, es decir, la temperatura. Sin embargo, como se mencionó

anteriormente, los dispositivos utilizados en procesos y actividades sometidos a esfuerzos térmicos o mecánicos pueden presentar fallas en su estructura, de modo que, obtener información preliminar de su utilización es provechoso con el fin de garantizar el perfecto funcionamiento del equipo.

Ya se realizó el modelo y análisis térmico del sistema, en cuyo caso particular es posible variar o ajustar los datos para obtener mejores resultados. Pero las variables estructurales aún no se han implementado, en cierta manera algunas de esas variables que corresponden al grosor de los equipos pueden tratarse en los análisis térmicos y están presentes de manera implícita en el modelo, pero aun así otras variables como dimensiones, aberturas de entrada/salida de gas, tensión, rigidez, elasticidad y resistencia al desgaste no se han tratado aún.

No obstante, realizar los modelos para cada variable o para un grupo de ellas resultaría muy complicado de efectuar, para ello, es posible implementar un modelo físico y someterlo a experimentación, aunque es demasiado tardado, pero puede incluso ayudar para validar el modelo térmico como también: saber si los parámetros estructurales que se propongan y seleccionen son los correctos [171].

Por lo tanto, se procede entonces a diseñar los componentes y características del sistema, y una vez se obtengan dichos recursos se procederá entonces a su fabricación.

El material principal del cual estará constituido el núcleo del reactor, así como la entrada y salida del gas nitrógeno, será de cerámica porque este material es ampliamente efectivo para tratar procesos térmicos y además es transparente a las microondas, la resistencia a la corrosión es también otra característica positiva de este material. Fácilmente puede actuar como sustituto de algunos metales.

Todo diseño debe suministrar la cantidad necesaria de información para llevar a cabo su realización, hecho que asegura su implementación conforme a los requisitos de funcionamiento, en el diseño de cuerdas y roscas esto no es la excepción [172]. Las figuras 15, 16 y 17 muestran el diseño de cuerdas y roscas así como el ensamblaje de cada equipo.

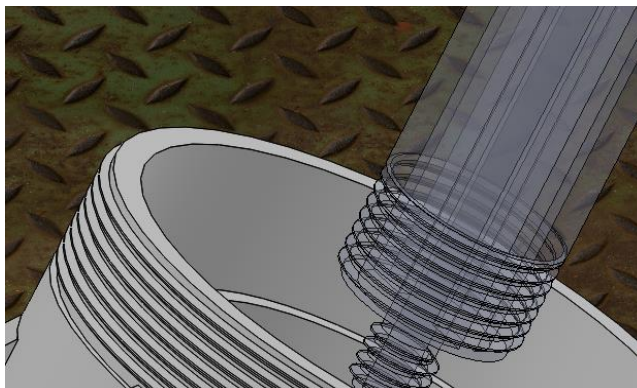


Fig. 15. Diseño de cuerdas del contenedor y transportador de gas

Nota: Imagen correspondiente a las roscas que acoplan el contenedor y el transportador de gas.

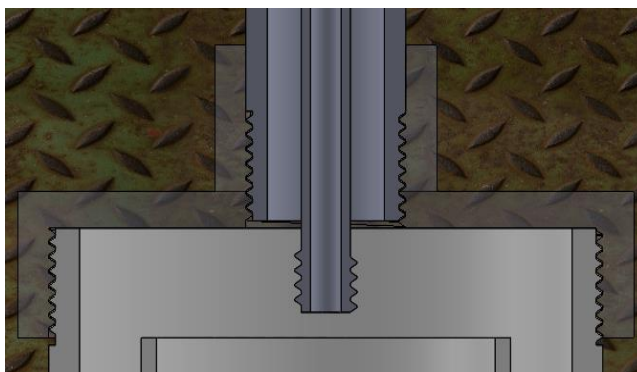


Fig. 16. Conjunción de roscas del transportador, tapa y contenedor

Nota: Perfecta conjunción y ensamblaje de las diferentes roscas de los equipos involucrados.

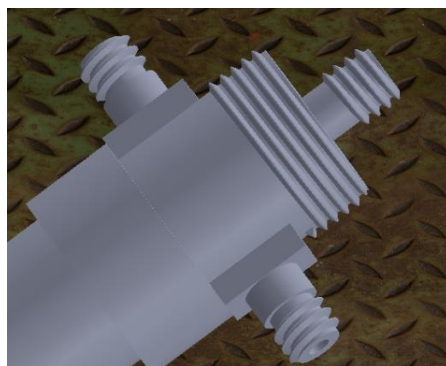


Fig. 17. Cuerdas y roscas del transportador de gas

Nota: Representación de las diferentes roscas y cuerdas del equipo en el cual se pueden adaptar diferentes dispositivos y sensores.

25). Planos de fabricación

Una vez obtenido el diseño de los equipos, inmediatamente se elaboran los planos finales de fabricación (todas las medidas se encuentran en milímetros), las figuras 18, 19 y 20 son los planos que se realizaron.

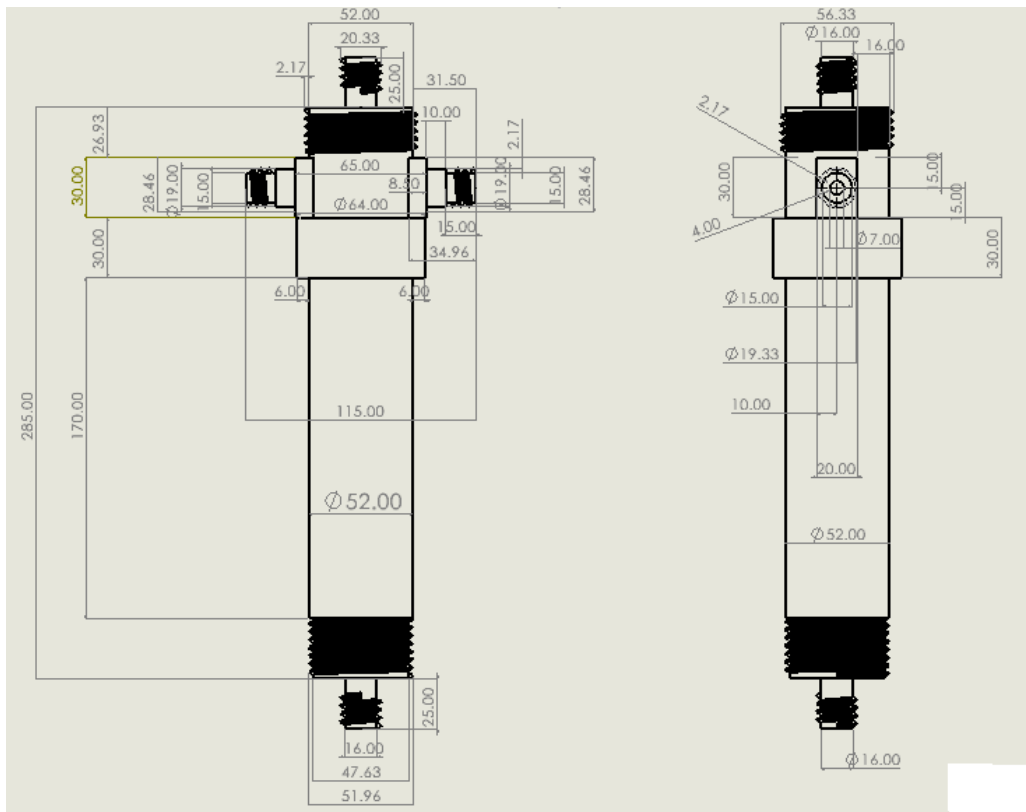


Fig. 18. Vista frontal y lateral del transportado de gas

Nota: Las medidas están expresadas en milímetros.

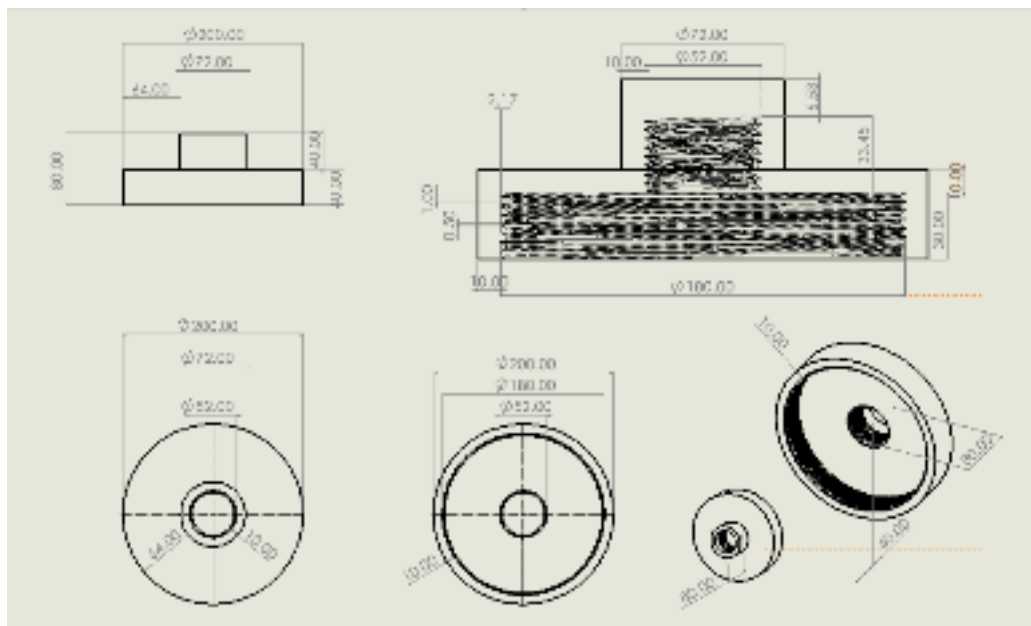


Fig. 19. Diferentes vistas a detalle de la tapa del contenedor

Nota: Las medidas están expresadas en milímetros.

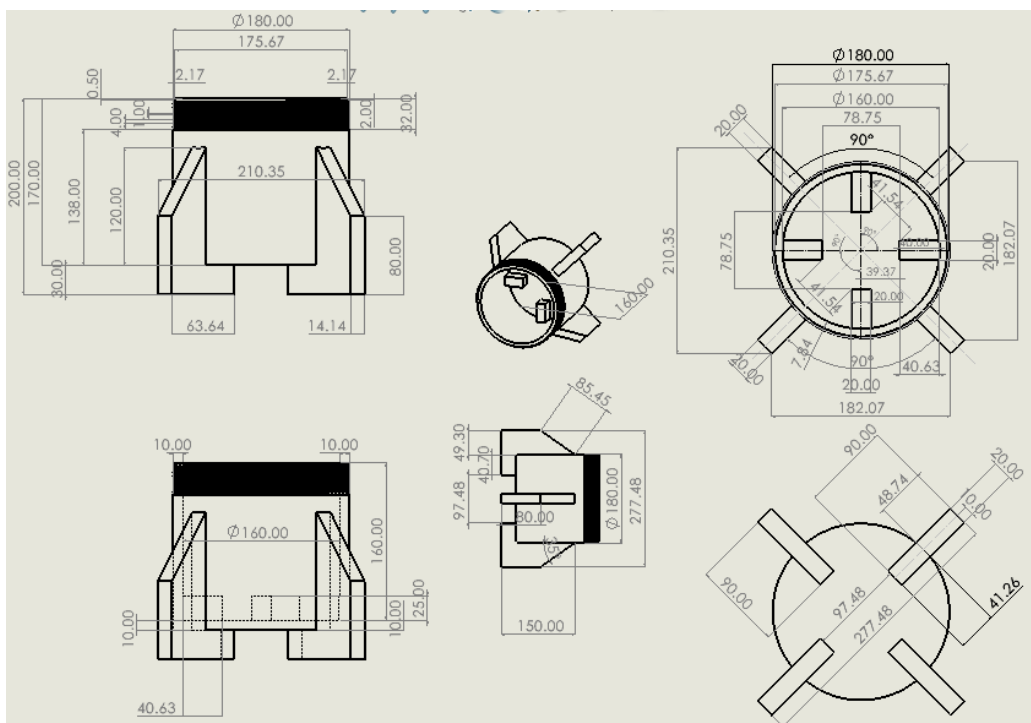


Fig. 20. Diferentes vistas a detalle del contenedor

Nota: Las medidas están expresadas en milímetros.

K. Desarrollo y construcción

Una vez se obtienen los planos de fabricación, el siguiente paso es llevar a la realidad el sistema, existen diferentes formas para ello, las más conocidas son: el mecanizado de la pieza mediante torno giratorio, también existe el método más común y tardado que es por moldeo-vaciado o moldeo-modelaje, últimamente ha surgido una tecnología bastante confiable y nueva que es la impresión 3D.

Debido a la complejidad del sistema la única opción viable y relativamente exequible fue por moldeo y vaciado de las piezas en moldes de yeso especial para cerámica. Por lo cual, aparte de realizar los diseños, también se realizaron los moldes y “modelos” 3D de las piezas a fabricar. La figura 21 representa la impresión en 3D de los “modelos”, la realización de moldes para el vaciado de la materia prima y la obtención de los primeros prototipos.



Fig. 21. Fabricación de los equipos

Nota: Imágenes a), b), c) y d) se muestra de manera resumida el proceso de fabricación de cada componente, se aprecia principalmente el transportador, el fabricante sobredimensiona los moldes debido al proceso de sacado y horneado de cada pieza, este sobredimensionamiento se sitúa entre un 15 y 18 %, el mismo procedimiento se efectúa para cada pieza diseñada.

L. Sistema de medición de temperatura

Uno de los requerimientos en el diseño es la implementación de un sistema para obtener la temperatura mientras ocurre la reacción, debido a la naturaleza de calentamiento, es poco probable y en ocasiones impráctico utilizar dispositivos con elementos metálicos por lo que medir esta variable es de particular dificultad, el diseño se realizó y ajusto atendiendo a esta necesidad. El dispositivo elegido para realizar la medición, es un sensor infrarrojo de la marca Raytek, más concretamente el dispositivo RAYMID20LT4CB3. La figura 22 muestra el sensor en su configuración externa e interna.

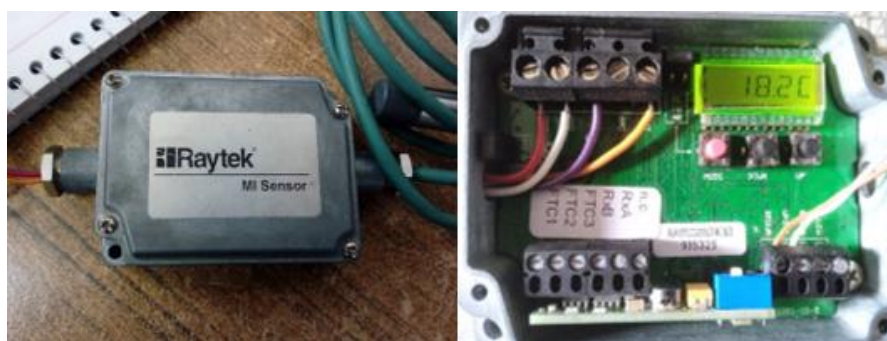


Fig. 22. Sensor infrarrojo de la marca Raytek

Nota: Sensor en funcionamiento monitoreando la temperatura ambiente, se visualiza a través del LCD que incorpora el modelo.

Todo objeto a determinada temperatura emite energía electromagnética con exactitud; radiación térmica desde su superficie, la radiación térmica tendrá longitudes de onda principalmente en la región infrarroja y mientras aumente la temperatura en un determinado tiempo, el objeto se tornará de un rojo visible [173], los sensores infrarrojos son dispositivos sensibles a la radiación térmica emitida, están compuestos por una lente; un filtro, un procesador de señales y una caja electrónica que facilita la visualización de la temperatura. Las principales ventajas de estos dispositivos son: la medición sin entrar en contacto con el objeto y la rápida respuesta de la lectura [174].

Este sensor puede medir temperaturas desde los 0 °C hasta los 600 °C, sin embargo el cabezal del lente solo soporta temperaturas de hasta 85 °C por lo que se debe adaptar un dispositivo que no solo acople el sensor sino que también lo aisle de sobrecargas de temperatura, también puede trabajar con termopares y salidas analógicas de 0 a 5 Volts o 4 a 20 miliamperios, posee la

característica de acoplarse a una computadora y transmitir los datos para el procesamiento y graficación en el ordenador, el sensor puede alimentarse desde una fuente externa en rangos de voltaje de los 12 hasta los 26 Volts y 100 mA de corriente [174]. La figura 23 muestra los parámetros ideales de medición.

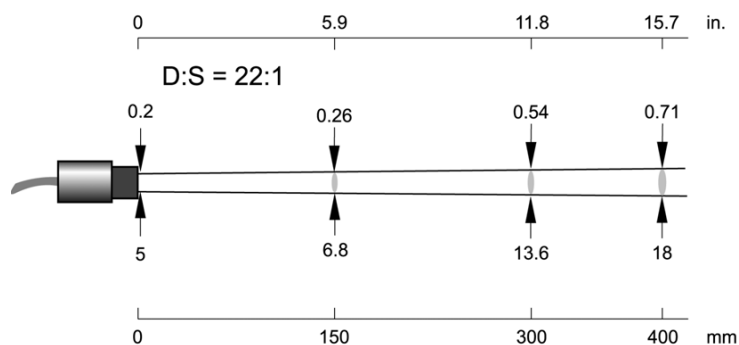


Fig. 23. Rango del objetivo

Nota: La imagen muestra la longitud de medición, así como el rango de relación Diámetro-Superficie, fuente [174].

Aunque en el marco teórico se mencionó una de las desventajas de este dispositivo para implementarlo en una reacción de pirólisis asistida por microondas, el diseño del equipo “transportador de gas” se efectuó de una forma particular para acoplar este tipo de sensor y otras configuraciones, el sensor infrarrojo se coloca fuera de la cavidad mientras realiza la medición sin tocar la muestra.

Es de gran importancia los instrumentos que utilizan técnicas para realizar algún tipo de medición, una de las técnicas más avanzadas es la tecnología de instrumentación electrónica, que se encarga de medir cualquier magnitud física y transformarla en señales eléctricas para su tratamiento en un sistema de control [175].

Debido al interés que existe en medir, variar y controlar la temperatura cuya mención en el marco teórico es visible, se necesita entonces no solo de un instrumento que efectuó la medición sino que también controlé la fuente de poder, de esta manera, se pueda hacer un paro de emergencia conforme a los requerimientos de temperatura por parte del usuario. Para ello se implementó un sistema de control ON/OFF [136], la simulación del circuito se muestra en las figuras 24 y 25.

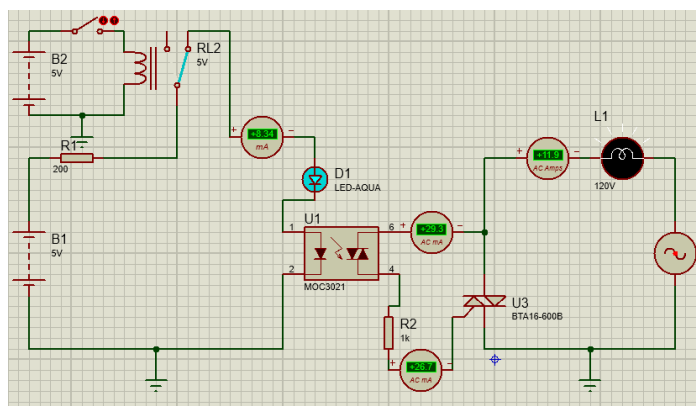


Fig. 24. Simulación del circuito de control (ON)

Nota: El circuito posee tres mallas separadas independientemente, cuya rama principal que se conecta al relé se podría definir como el circuito de control (la batería es sustituida por un microcontrolador), la segunda parte corresponde al circuito de encendido y la tercera se le puede llamar como circuito de potencia.

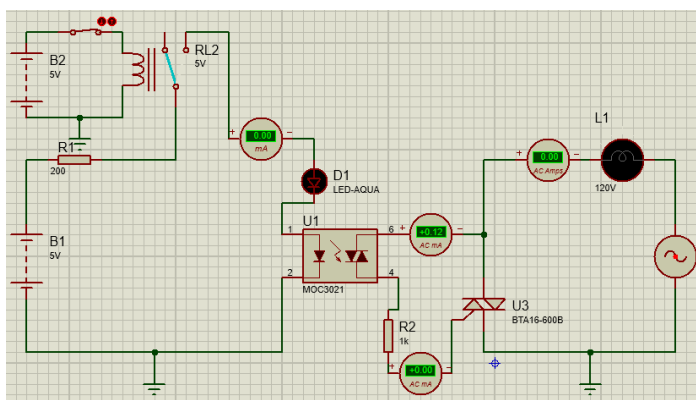


Fig. 25. Simulación del circuito de control (OFF)

Nota: Circuito en paro de emergencia (OFF), una vez que se alcanza una temperatura pico, el reactor entra en paro de emergencia para disminuir la temperatura a un valor deseado.

Este circuito de control es bastante simple en comparación a otros tipos y configuraciones, aunque es efectivo, disminuye la vida útil de los equipos debido al desgaste efectuado por el encendido y apagado.

El sistema está constituido por un controlador que puede leer la señal analógica emitida por el sensor mediante sus terminales correspondientes. También posee un relé normalmente cerrado

cuya característica es adecuada para hacer este tipo de implementaciones, puede manejar voltajes considerablemente altos.

Otro dispositivo de extrema importancia es el optotriac MOC3021, su característica principal es: aislar/interconectar perfectamente dos circuitos de diferente fuente además funciona como interruptor. El dispositivo triac modelo BTA16600B es un elemento de potencia, el rango de voltajes y corrientes nominales que puede operar es propiamente su nombre 16 amperes y 600 voltios de corriente alterna debe incorporar un sistema para evitar el sobrecalentamiento (es recomendable incorporar un filtro para atenuar los efectos de cargas inductivas), es activado por la señal de corriente que entra al pin “puerta”, proveniente del optotriac. En conjunto todos estos dispositivos conforman el sistema medición/control de temperatura [176]. Un sistema de control de temperatura fue propuesto por la entonces tesista Moran Martínez [177] en la construcción de un reactor HFCVD.

M. Validación del diseño

k). Evaluación del equipo de trabajo

La evaluación es un paso importante en el desarrollo de un nuevo sistema principalmente por la viabilidad económica debido a que toda “empresa” tiene su particular interés en esta sección, aunque el sistema en un principio no ha sido considerado para su venta o para la fabricación en serie, se deben de considerar los costos del proyecto así como de una posible retribución del capital invertido para su diseño y desarrollo, mediante un estudio de mercado que facilite la visión de negocio.

Primero, se debe precisar y delimitar la base que sirve como evaluación del éxito, aunque el beneficio económico es la principal motivación, hay otros factores cruciales en el éxito de un proyecto como la seguridad ambiental y la seguridad en los espacios de trabajo. Pero ¿Qué probabilidad hay de que ocurra el éxito? Para responder a la pregunta, se hace un estudio sobre la probabilidad que existe de que se lleve a cabo cada elemento de la “empresa” por ejemplo: el financiamiento, diseño, construcción, pruebas, aprobación y aceptación. También que la parte

técnica se pueda realizar, si la “empresa” no es viable en términos económicos, ambientales, técnicos y de seguridad entonces no es factible y puede concluir definitivamente.

Una vez se ha hecho lo anterior, se procede a realizar el diseño del sistema, estableciendo las especificaciones, componentes y condiciones de operación para resolver el problema. El proceso de diseño conlleva a definir las especificaciones, componentes y variables de operación; mediante el diseño básico, análisis, modelado, sinterización y el uso de materiales con el fin de obtener los resultados deseados.

Sin embargo, se debe hacer eficiente el diseño pues no basta con el cumplimiento de la viabilidad, para esto se debe maximizar el rendimiento en los objetivos establecidos, es decir, se debe hacer el mejor sistema para obtener la mejor calidad del producto [178], normalmente este paso ocurre después de poner a prueba el diseño ya fabricado, siempre que haya sido evaluado de manera positiva en las etapas de simulación.

N. Costos del equipo

En todo proyecto y diseño siempre el factor económico y financiero juega un papel importante por ello, antes de iniciar una “empresa”, es indispensable proporcionar los datos de los costos de cada equipo y cada procedimiento que se ha realizado con el fin de obtener financiamiento y capital ya sea por parte de la iniciativa pública o privada. La tabla 4 muestra los costos de cada equipo, procedimiento y servicio que se necesitaron en la etapa de diseño y desarrollo.

TABLA IV. COSTOS (USD)

Actividad y/o equipo	Costo
Diseño	-----
Materiales y métodos	452.94
Fabricación	82.35
Logística	117.64
Equipos	470.58
	Total: 1123.51 USD

Nota: Esta tabla muestra los costos de cada equipo, procedimiento y servicio a un tipo de cambio promedio.

El siguiente paso es el ensamblaje en físico del sistema diseñado, fabricado y armado de cada elemento que lo constituye, se pondrá a prueba y se reportarán los resultados obtenidos.

VIII. RESULTADOS

Una vez terminado el proceso de fabricación, se realizó el transporte y ensamblaje de los diferentes elementos que conforman el núcleo del reactor. A través de un proceso de rectificado mecánico, las piezas obtuvieron un aspecto estético ya que presentaron imperfecciones debido al método de fabricación, es decir, por moldeo y vaciado. La figura 26 muestra las piezas finales fabricadas.



Fig. 26. Piezas terminadas del reactor

Nota: La imagen corresponde a la fabricación del contenedor, transportador y tapas.

Posteriormente se ensambló el equipo en el laboratorio con la debida precaución requerida. La figura 27 muestra el ensamblaje y su implementación.



Fig. 27. Puesta en marcha del reactor

Nota: Implementación del núcleo del reactor en el interior del horno de microondas.

26). *Materiales carbonáceos obtenidos*

Al concluir la fase de experimentación, los resultados obtenidos muestran una clara obtención de materiales carbonáceos, sin embargo, aunque experimentalmente el reactor resistió la temperatura de reacción, no fue posible obtener las lecturas de temperatura debido a un sobredimensionamiento de la pieza llamada “transportador de gas” donde se coloca el cabezal del sensor infrarrojo. Por tanto se implementó otro transportador que también cumple con la función de conectar la tapa del reactor con los ductos de gas inerte/síntesis. La figura 28 muestra la implementación y el reactor en pleno funcionamiento.



Fig. 28. Reactor en funcionamiento

Nota: Reactor en funcionamiento y conectado para recuperar productos líquidos y/o gases como vapor de agua, biodiesel y metano.

Al terminar la prueba realizada por la tésista Mora Vargas I. de la facultad de electrónica, se obtuvo una muestra de carbón, se configuró el horno para que se calentara a potencia máxima durante un periodo de tiempo de 10 minutos. Posteriormente se realizaron diferentes pruebas para la obtención de biocarbón usando el equipo adaptado con el nuevo transportador, se obtuvieron resultados aceptables respecto a la visualización del carbón y al desempeño del equipo. La figura 29 muestra el primer producto obtenido después de enfriar el reactor.



Fig. 29. Primer producto carbonáceo

Nota: Primer producto carbonáceo obtenido a partir de cáscara de nuez a una potencia del 100 % durante 10 minutos, el volumen de la muestra es de aproximadamente 600 cm^3 .

Después de la primera prueba, se realizaron otros experimentos para diferentes potencias seleccionadas con el fin de monitorear, visualizar y probar el rendimiento/desempeño del núcleo del reactor. La figura 30 muestra diferentes productos carbonáceos que se obtuvieron mediante pruebas en el laboratorio.



Fig. 30. Productos carbonáceos

Nota: Esta figura corresponde a productos obtenidos de cáscara de nuez, el recipiente 1 corresponde a material sometido a un 100 % de potencia en el interior del horno (aproximadamente entre 800 y 1000 Watts) durante 25 minutos al igual que el recipiente 4, mientras que la muestra 2 y 3 corresponde a una potencia del 50 % durante 15 minutos, el volumen total de la muestra es de aproximadamente 500 cm^3 .

IX. CONCLUSIONES

A partir del objetivo principal, se desarrolló un reactor asistido por microondas con el que se obtuvieron materiales carbonáceos por pirólisis térmica de cáscara de nuez a diferentes potencias de operación. El reactor constituido en su totalidad por cerámica “común” (mezcla de arcillas, Feldespato, óxido de silicio y óxido de aluminio) resultó ser un equipo que soporta las altas temperaturas de trabajo en el interior del horno, el material elegido permite el calentamiento uniforme de la biomasa.

Se establecieron las nuevas características del reactor y se definió conforme a su área de implementación, el modo de operación y su clasificación; es decir, el equipo no está diseñado a partir de la cinética de reacciones químicas, sino que, se diseñó en base a los fundamentos de la teoría de sistemas y transferencia de calor. Haciendo aproximaciones de datos, cuya obtención fue efectuada por otros investigadores en procesos y configuraciones similares, tomando como referencia a estos mismos.

Se realizó el diseño con softwares computacionales de licencia estudiantil que nos permitió seleccionar un “anteproyecto” y visualizar las características y elementos con gran detalle de una forma mucho más gráfica.

Se construyó el prototipo conforme a los recursos e insumos disponibles, partiendo inicialmente desde la fabricación de “modelos” con ayuda de la impresión 3D, siguiendo los planos de fabricación. Posteriormente se fabricaron moldes, los cuales se utilizaron para el vaciado de barbotina (“arcilla” líquida precursora de la cerámica). Las piezas finales se sometieron a un rectificado mecánico debido a imperfecciones en su superficie.

No se implementó el equipo que monitorea la temperatura durante el proceso en tiempo real a consecuencia del sobredimensionamiento del componente llamado transportador.

Se puede considerar un éxito parcial el diseño y desarrollo del reactor a causa del incumplimiento el último objetivo, monitorear la temperatura es de importancia significativa porque con ello se

valida, complementa, ajusta el análisis y modelo térmico además con la medición de temperatura se obtienen los parámetros operativos de la ecuación de velocidad de reacción (cinética química). Por otra parte, el reactor no se puede considerar como un sistema para obtener materiales carbonáceos hasta que se determinen las propiedades físicas del carbón obtenido y por consiguiente utilizarlo en diferentes aplicaciones seleccionadas en la investigación, industria o agricultura.

La evaluación positiva del equipo se encuentra en el ahorro energético y en la obtención de los materiales carbonáceos en un tiempo muy corto, sin embargo, para que la evaluación sea completa, además de demostrar la utilidad del carbón para poderlo implementar en alguna aplicación a nivel industrial o comercial, el proyecto tendrá que ser viable y factible. Para lo anterior, los elementos que conforman el núcleo del sistema en particular el transportador, debe ser refabricado cuidando los aspectos técnicos del diseño, este punto se puede considerar como parte de la optimización.

Tomando en consideración todo el proceso desde las ideas iniciales hasta su implementación final, no se recomienda utilizar el método de fabricación señalado en esta tesis debido a los numerosos problemas que se presentaron estos son: económicos, técnicos, logísticos y de personal. Por lo que si se quiere partir de inicio con el mismo material se recomienda utilizar un método de fabricación por mecanizado o impresión 3D. Además de aplicar el esmalte adecuado para todo el núcleo del equipo, ya que a partir de esto, se asegura la protección a esfuerzos térmicos y mecánicos también se facilita el mantenimiento de cada pieza.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Gęca, M. Wiśniewska, and P. Nowicki, “Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems—A review”, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, Art. no. 102687.
- [2] M. Klug, “Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa”, *Revista de Química*, vol. 26, no. 1–2, pp. 37–40, 2012.
- [3] A. O. Oyedun, T. Gebreegziabher, D. K. Ng, and C. W. Hui, “Mixed-waste pyrolysis of biomass and plastics waste—a modelling approach to reduce energy usage,” *Energy*, vol. 75, pp. 127–135, 2014.
- [4] K. K. Shimabuku, J. M. Paige, M. Luna-Aguero, and R. S. Summers, “Simplified modeling of organic contaminant adsorption by activated carbon and biochar in the presence of dissolved organic matter and other competing adsorbates”, *Environmental Science & Technology*, vol. 51, no. 17, pp. 10031–10040, 2017.
- [5] R. M. A. P. Lima, G. S. Dos Reis, M. Thyrel, J. J. Alcaraz-Espinoza, S. H. Larsson, and H. P. de Oliveira, “Facile Synthesis of Sustainable Biomass-Derived Porous Biochars as Promising Electrode Materials for High-Performance Supercapacitor Applications”. *Nanomaterials*, vol. 12, no. 5, p. 866, 2022.
- [6] X. E. Castells, *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2005.
- [7] A. A. Salema and F. N. Ani, “Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass”, *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 3, pp. 3388–3395, 2011.
- [8] M. Q. Chen, J. Wang, M. X. Zhang, M. G. Chen, X. F. Zhu, F. F. Min, and Z. C. Tan, “Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 82, no. 1, pp. 145–150, 2008.
- [9] A. Álvarez, “Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamiento térmicos de avanzada”, [En línea]. Disponible: http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314_es.pdf. [Accedido: 23-mar-2018].

- [10] J. A. Menéndez, E. J. Juárez-Pérez, E. Ruisánchez, J. M. Bermúdez, and A. Arenillas, “Ball lightning plasma and plasma arc formation during the microwave heating of carbons”, *Carbon*, vol. 49, no. 1, pp. 346–349, 2011.
- [11] Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed., versión 23.6 en línea. [En línea]. Disponible: <https://dle.rae.es>. [Accedido: 15-ene-2023].
- [12] V. J. Law and D. P. Dowling, “Converting a microwave oven into a plasma reactor: a review”, *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2018, Art. no. 2018.
- [13] V. Hadiya, K. Popat, S. Vyas, S. Varjani, M. Vithanage, V. K. Gupta, ... and Z. Patel, “Biochar production with amelioration of Microwave-assisted pyrolysis: Current scenario, drawbacks and perspectives”, *Bioresource Technology*, Art. no. 127303, 2022.
- [14] J. A. Menéndez, M. Inguanzo, and J. J. Pis, “Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge”, *Water Research*, vol. 36, no. 13, pp. 3261–3264, 2002.
- [15] R. Lakerveld, G. S. Sturm, A. I. Stankiewicz, and G. D. Stefanidis, “Integrated design of microwave and photocatalytic reactors. Where are we now?”, *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 5, 2014.
- [16] D. J. Brooks and R. E. Douthwaite, “Microwave-induced plasma reactor based on a domestic microwave oven for bulk solid state chemistry”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 75, no. 12, pp. 5277–5279, 2004.
- [17] K. Zhang, D. Li, K. Chang, K. Zhang, and D. Li, *Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics*. Berlin: Springer, 1998, pp. 274–283.
- [18] P. Taboada-González, Q. Aguilar-Virgen, and C. Armijo-de Vega, “La tecnología de plasma y residuos sólidos”, *Ingeniería*, vol. 13, no. 2, pp. 51–56, 2009.
- [19] R. A. Serway and C. Vuille, *Fundamentos de Física*, 9.^a ed., vol. 1. México: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., 2012.
- [20] C. F. Sendrós, *Modelización y Control de Temperatura de un Reactor “Batch” para un Proceso Químico Exotérmico*. Universidad de Rovira, 2004, pp. 1–191.
- [21] E. Pert, Y. Carmel, A. Birnboim, T. Olorunyolemi, D. Gershon, J. Calame, ... and O. C. Wilson, “Temperature measurements during microwave processing: the significance of thermocouple effects”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 84, no. 9, pp. 1981–1986, 2001.
- [22] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

- [23] S. S. Lam and H. A. Chase, “A review on waste to energy processes using microwave pyrolysis”, *Energies*, vol. 5, no. 10, pp. 4209–4232, 2012.
- [24] J. F. San Román, “Posibilidades de aprovechamiento económico de la biomasa residual”, *Agricultura y Sociedad*, no. 34, pp. 219–236, 1985.
- [25] D. M. Mielnicki, P. O. Canziani, J. Drummond, J. P. Skalany, P. D. E. de los Procesos, and A. en el Cambio Global, “La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio”, *CONGREGMETIX*, 2005b.
- [26] R. García Cubero, *Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂* (Tesis Doctoral Inédita). Universidad de Sevilla, 2014.
- [27] E. Castellanos, “Contaminación por emisiones de vehículos automotores”, *Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático*, vol. 11, pp. 1–2, 2017.
- [28] A. R. Salvador, “Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles”, *Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Esp.)*, vol. 104, no. 2, pp. 331–345, 2010.
- [29] Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México, “Glosario de definición”, 2023. [En línea]. Disponible: <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Energ%C3%ADas%20renovables>
- [30] Y. F. Huang, P. T. Chiueh, and S. L. Lo, “A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass”, *Sustainable Environment Research*, vol. 26, no. 3, pp. 103–109, 2016.
- [31] S. Pinto-Altamiranda, J. S. Aristizábal Restrepo, M. E. González, O. D. Gutiérrez, and C. Barrera-Causil, “Influencia de los parámetros operacionales de carbonización hidrotermal asistida por microondas en la obtención de productos de valor energético: una revisión”, *TecnoLógicas*, vol. 25, no. 54, 2022.
- [32] E. Cerdá, “Energía obtenida a partir de biomasa”, *Cuadernos Económicos de ICE*, no. 83, 2012.
- [33] F. S. Nogués, *Energía de la Biomasa (Volumen I)*. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza, 2010.
- [34] Secretaría de Energía, “Atlas Nacional de Biomasa”, 04-sep-2018. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>

- [35] B. H. Cheng, B. C. Huang, R. Zhang, Y. L. Chen, S. F. Jiang, Y. Lu, ... and H. Q. Yu, “Bio-coal: A renewable and massively producible fuel from lignocellulosic biomass”, *Science Advances*, vol. 6, no. 1, Art. no. eaay0748, 2020.
- [36] International Energy Agency, *Energy Policies Beyond IEA Countries: Mexico 2017*. París, Francia: International Energy Agency, 2017.
- [37] J. B. Hernández, M. B. Hernández, and V. F. Lara, “Estudio de biomasa sólida de desecho para generación de vapor a microescala,” *Innovación en Biotecnología I*, vol. 13, 2020.
- [38] L. C. Fernández-Linares, J. Montiel-Montoya, A. Millán-Oropeza, and J. A. Badillo-Corona, “Producción de biocombustibles a partir de microalgas”, *Ra Ximhai*, vol. 8, no. 3, pp. 101–115, 2012.
- [39] Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez, and J. Dávila-Rincón, “Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión”, *Revista Politécnica*, vol. 48, no. 2, pp. 7–20, 2021.
- [40] M. E. González Ávila, “Producción de bioenergía en el norte de México: tan lejos y tan cerca...”, *Frontera Norte*, vol. 21, no. 41, pp. 177–183, 2009.
- [41] L. Hamelin, M. Borzeczka, M. Kozak, and R. Pudełko, “A spatial approach to bioeconomy: Quantifying the residual biomass potential in the EU-27”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 127–142, 2019.
- [42] S. Di Fraia, S. Fabozzi, A. Macaluso, and L. Vanoli, “Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania)”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, Art. no. 124085, 2020.
- [43] T. Kalak, “Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future”, *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1783, 2023.
- [44] N. Tripathi, C. D. Hills, R. S. Singh, and C. J. Atkinson, “Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource”, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, vol. 2, no. 1, Art. no. 35, 2019.
- [45] M. S. S. R. Tejaswini, P. Pathak, S. Ramkrishna, and P. S. Ganesh, “A comprehensive review on integrative approach for sustainable management of plastic waste and its associated externalities”, *Science of the Total Environment*, vol. 825, Art. no. 153973, 2022.
- [46] V. Zeller, E. Towa, M. Degrez, and W. M. Achten, “Urban waste flows and their potential for a circular economy model at city-region level”, *Waste Management*, vol. 83, pp. 83–94,

- 2019.
- [47] P. E. P. Martínez, “Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual”, *Innovaciencia*, vol. 2, no. 1, pp. 45–52, 2014.
- [48] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, I. M. I. Ismail, and A. S. Nizami, “Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 119, pp. 239–252, 2017.
- [49] F. Motasemi and M. T. Afzal, “A review on the microwave-assisted pyrolysis technique”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 317–330, 2013.
- [50] N. E. R. Contreras, A. Arévalo, and J. A. G. Núñez, “Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia,” *Palmas*, vol. 36, no. 4, pp. 41–54, 2015.
- [51] E. M. Manals-Cutiño, M. Penedo-Medina, and D. Salas-Tort, “Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal”, *Tecnología Química*, vol. 35, no. 2, pp. 244–255, 2015.
- [52] M. Tripathi, J. N. Sahu, and P. Ganesan, “Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 467–481, 2016.
- [53] A. Gómez, W. Klose, and S. Rincón, *Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite*. Kassel, Alemania: kassel university press GmbH, 2008.
- [54] J. A. Garcia-Nunez, M. R. Pelaez-Samaniego, M. E. Garcia-Perez, I. Fonts, J. Abrego, R. J. M. Westerhof, and M. Garcia-Perez, “Historical developments of pyrolysis reactors: a review”, *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 6, pp. 5751–5775, 2017.
- [55] X. E. Castells and E. V. García, *La pirolisis: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [56] S. Caillat and E. Vakkilainen, “Large-scale biomass combustion plants: an overview”, in *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, pp. 189–224, 2013.
- [57] J. P. Wolf, “Biomass combustion for power generation: an introduction”, in *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, pp. 3–8, Woodhead Publishing, 2013.
- [58] *J El Periódico de la Energía*, “Las 10 mayores plantas de biomasa en el mundo”, 11-ene-2016. [En línea]. Disponible: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-biomasa-del-mundo/>
- [59] I. T. R. Comercio, “Centrales eléctricas en el mundo a partir de biomasa”, 2017.

- [60] R. C. Brown, Ed., *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019.
- [61] V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. Clough, J. Yao, X. Zhong, M. Z. Memon, ... and P. S. Fennell, “An overview of advances in biomass gasification”, *Energy & Environmental Science*, vol. 9, no. 10, pp. 2939–2977, 2016.
- [62] L. Rosendahl, Ed., *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [63] S. Ethaib, R. Omar, S. M. M. Kamal, D. R. Awang Biak, and S. L. Zubaidi, “Microwave-assisted pyrolysis of biomass waste: A mini review”, *Processes*, vol. 8, no. 9, p. 1190, 2020.
- [64] M. Gholizadeh, C. Li, S. Zhang, Y. Wang, S. Niu, Y. Li, and X. Hu, “Progress of the development of reactors for pyrolysis of municipal waste”, *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 4, no. 12, pp. 5885–5915, 2020.
- [65] S. Garg, A. Nayyar, A. Buradi, K. P. Shadangi, P. Sharma, B. J. Bora, ... and M. A. Shah, “A novel investigation using thermal modeling and optimization of waste pyrolysis reactor using finite element analysis and response surface methodology”, *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, Art. no. 10931, 2023.
- [66] A. Zaker, Z. Chen, X. Wang, and Q. Zhang, “Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review”, *Fuel Processing Technology*, vol. 187, pp. 84–104, 2019.
- [67] M. Igarashi, Y. Hayafune, R. Sugamiya, Y. Nakagawa, and K. Makishima, “Pyrolysis of municipal solid waste in Japan”, *Fuel*, 1984.
- [68] D. Zwebe, “Comercialización de la tecnología de pirólisis”, *Palmas*, vol. 31 (especial), pp. 110–115, 2010.
- [69] D. R. B. G. María, “Pirolisis a baja temperatura de la pomasa de manzana para la producción de biocombustibles”, 2016.
- [70] A. Aspiazu Méndez, “Modelo matemático de un reactor de lecho fluidizado para la pirólisis de biomasa lignocelulósica”, 2017.
- [71] L. H. Cruz and E. M. Á. Hernández, “Propuesta de proceso de producción de hidrógeno a partir de biomasa lignocelulósica mediante pirólisis con captura de CO₂,” 2020.
- [72] M. Sharifzadeh, M. Sadeqzadeh, M. Guo, T. N. Borhani, N. M. Konda, M. C. Garcia, ... and N. Shah, “The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions”, *Progress in Energy and*

- Combustion Science*, vol. 71, pp. 1–80, 2019.
- [73] R. A. Zarraga, “Combustión y pirolisis de residuos de madera en spouted bed cónico”, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, 1999.
- [74] E. T. Kostas, D. Beneroso, and J. P. Robinson, “The application of microwave heating in bioenergy: A review on the microwave pre-treatment and upgrading technologies for biomass” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 12–27, 2017.
- [75] B. A. Mohamed, N. Ellis, C. S. Kim, and X. Bi, “Microwave-assisted catalytic biomass pyrolysis: effects of catalyst mixtures”, *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 253, pp. 226–234, 2019.
- [76] J. Liu, Q. Hou, M. Ju, P. Ji, Q. Sun, and W. Li, “Biomass pyrolysis technology by catalytic fast pyrolysis, catalytic co-pyrolysis and microwave-assisted pyrolysis: A review”, *Catalysts*, vol. 10, no. 7, p. 742, 2020.
- [77] J. Li, J. Dai, G. Liu, H. Zhang, Z. Gao, J. Fu, ... and Y. Huang, “Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 94, pp. 228–244, 2016.
- [78] A. A. Arpia, W. H. Chen, S. S. Lam, P. Rousset, and M. D. G. De Luna, “Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: a comprehensive review”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 403, p. 126233, 2021.
- [79] A. Martínez González, A. Stankiewicz, and H. Nigar, “Catalyst heating characteristics in the traveling-wave microwave reactor”, *Catalysts*, vol. 11, no. 3, p. 369, 2021.
- [80] X. Wang, H. Chen, K. Luo, J. Shao, and H. Yang, “The influence of microwave drying on biomass pyrolysis,” *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 1, pp. 67–74, 2008.
- [81] Y. Wan, P. Chen, B. Zhang, C. Yang, Y. Liu, X. Lin, and R. Ruan, “Microwave-assisted pyrolysis of biomass: Catalysts to improve product selectivity” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 86, no. 1, pp. 161–167, 2009.
- [82] D. U. Jun, L. I. U. Ping, Z. H. Liu, D. G. Sun, and C. Y. Tao, “Fast pyrolysis of biomass for bio-oil with ionic liquid and microwave irradiation”, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 554–559, 2010.
- [83] J. P. Robinson, S. W. Kingman, R. Barranco, C. E. Snape, and H. Al-Sayegh, “Microwave pyrolysis of wood pellets”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 2, pp. 459–463, 2010.
- [84] Y. F. Huang, W. H. Kuan, S. L. Lo, and C. F. Lin, “Total recovery of resources and energy

- from rice straw using microwave-induced pyrolysis,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 17, pp. 8252–8258, 2008.
- [85] X. Zhao, M. Wang, H. Liu, L. Li, C. Ma, and Z. Song, “A microwave reactor for characterization of pyrolyzed biomass”, *Bioresource Technology*, vol. 104, pp. 673–678, 2012.
- [86] C. Wu, V. L. Budarin, M. J. Gronnow, M. De Bruyn, J. A. Onwudili, J. H. Clark, and P. T. Williams, “Conventional and microwave-assisted pyrolysis of biomass under different heating rates”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 107, pp. 276–283, 2014.
- [87] G. A. Obando, “Condiciones de diseño de un reactor de pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS)”, 2016.
- [88] N. Zhou, J. Zhou, L. Dai, F. Guo, Y. Wang, H. Li, ... and R. Ruan, “Syngas production from biomass pyrolysis in a continuous microwave assisted pyrolysis system”, *Bioresource Technology*, vol. 314, p. 123756, 2020.
- [89] R. D. L. C. Iturbides, U. J. Haza, and I. Polaert, “Recent technological innovations on continuous microwave assisted biomass pyrolysis and perspectives for industrial scale applications”, *Bioresource Technology Reports*, Art. no. 101202, 2022.
- [90] S. Wu, Y. Song, X. Wang, J. Xu, B. Xiao, and K. Qiao, “Simulation and optimization of heating rate and thermal uniformity of microwave reactor for biomass pyrolysis”, *Chemical Engineering Science*, vol. 250, p. 117386, 2022.
- [91] S. Sri Shalini, K. Palanivelu, A. Ramachandran, and V. Raghavan, “Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—A review”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 11, pp. 2247–2267, 2021.
- [92] Y. Zhang, S. Fan, T. Liu, W. Fu, and B. Li, “A review of biochar prepared by microwave-assisted pyrolysis of organic wastes”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101873, 2022.
- [93] O. Norouzi, F. Di Maria, and A. Dutta, “Biochar-based composites as electrode active materials in hybrid supercapacitors with particular focus on surface topography and morphology”, *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101291, 2020.
- [94] Universidad de Colima, “Enseñando cómo elaborar biocarbón”, Noticias, 12-jul-2021. [En línea]. Disponible: https://www.ucol.mx/noticias/nota_8980.htm

- [95] O. Levenspiel, *Ingeniería de las reacciones químicas*. Barcelona, España: Reverté, 2010.
- [96] K. G. Denbigh and J. C. R. Turner, *Introducción a la teoría de los reactores químicos*, México: Limusa, 1990, pp. 151–153.
- [97] W. L. Luyben, *Chemical Reactor Design and Control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [98] F. C. M. Iborra, J. Tejero, and F. Cunil, *Reactores Químicos*, 2010.
- [99] C. G. Hill and T. W. Root, *Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design*. John Wiley & Sons, 2014.
- [100] A. B. Juan and C. C. Terol, *Reactores químicos y bioquímicos*. Castellón, España: Universitat Jaume I, Servei de Comunicació i Publicacions, 2014.
- [101] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1998.
- [102] G. F. Froment, K. B. Bischoff, and J. De Wilde, *Chemical Reactor Analysis and Design*, vol. 2, pp. 104–127. New York: Wiley, 1990.
- [103] L. S. Kershenbaum, “Chemical engineering kinetics by J. M. Smith”, *McGraw Hill Book Company*, 1980.
- [104] H. S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction*. 2020.
- [105] J. R. Couper, W. R. Penney, J. R. Fair, and S. M. Walas, *Chemical Process Equipment: Selection and Design*, 3rd ed., Elsevier, 2012.
- [106] R. E. Hayes and J. P. Mmbaga, *Introduction to Chemical Reactor Analysis*. CRC Press, 2012.
- [107] J. P. Abulencia and L. Theodore, *Open-ended Problems: A Future Chemical Engineering Education Approach*. John Wiley & Sons, 2015.
- [108] J. C. Vargas Espinoza, “Diseño de un reactor para pirólisis de biomasa residual: raquis de banano y tallos de rosas”, Tesis de Licenciatura, Quito: UCE, 2019.
- [109] A. Al-Rumaihi, M. Shahbaz, G. McKay, H. Mackey, and T. Al-Ansari, “A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 167, p. 112715, 2022.
- [110] F. Campuzano, R. C. Brown, and J. D. Martínez, “Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 102, pp. 372–409, 2019.
- [111] O. S. Sabogal, S. Valin, S. Thiery, and S. Salvador, “Design and thermal characterization of an induction-heated reactor for pyrolysis of solid waste”, *Chemical Engineering Research*

- and Design*, vol. 173, pp. 206–214, 2021.
- [112] S. Sobek and S. Werle, “Solar pyrolysis of waste biomass: Part 1 reactor design”, *Renewable Energy*, vol. 143, pp. 1939–1948, 2019.
- [113] W. M. Lewandowski, K. Januszewicz, and W. Kosakowski, “Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 140, pp. 25–53, 2019.
- [114] Y. Duan, P. Yuan, S. Huang, L. Wang, J. Deng, S. Yu, ... and Y. Nie, “Experimental study on reactor scale-up for microwave-assisted pyrolysis of methyl ricinoleate”. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 184, p. 109293, 2023.
- [115] C. Z. Zaman, K. Pal, W. A. Yehye, S. Sagadevan, S. T. Shah, G. A. Adebisi, ... and R. B. Johan, “Pyrolysis: a sustainable way to generate energy from waste” *Pyrolysis*, vol. 1, pp. 3–36, 2017.
- [116] I. H. Farina, O. A. Ferretti, and G. F. Barreto, *Introducción al diseño de reactores químicos*. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1986.
- [117] E. Gómez-Senent Martínez, G. Cruz, and R. M. M. C. Sánchez, *Cuadernos de Ingeniería de Proyectos II. Del diseño de Detalle a la realización*. Ed. SP UPV, 2000.
- [118] Universidad Politécnica de Cartagena, “OCW UPCT Proyectos de ingeniería,” Feb. 2013. [En línea]. Disponible: <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=140&topic=8>
- [119] G. Su, H. C. Ong, M. Y. Cheah, W. H. Chen, S. S. Lam, and Y. Huang, “Microwave-assisted pyrolysis technology for bioenergy recovery: Mechanism, performance, and prospect”, *Fuel*, vol. 326, p. 124983, 2022.
- [120] R. Gautam, S. Shyam, B. R. Reddy, K. Govindaraju, and R. Vinu, “Microwave-assisted pyrolysis and analytical fast pyrolysis of macroalgae: product analysis and effect of heating mechanism”, *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 3, no. 11, pp. 3009–3020, 2019.
- [121] Y. F. Huang, Y. Y. Huang, P. T. Chiueh, and S. L. Lo, “Heterogeneous Fenton oxidation of trichloroethylene catalyzed by sewage sludge biochar: Experimental study and life cycle assessment”, *Chemosphere*, vol. 249, p. 126139, 2020.
- [122] V. L. Rodríguez, J. M. F. Díaz, and J. M. Virgós, *Electromagnetismo I*. Madrid, España: UNE, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.
- [123] H. D. Young and R. A. Freedman, *Física Universitaria con Física Moderna*, vol. 2, 13.^a ed., México: Pearson, 2013.

- [124] R. F. Serway and J. W. Jewett Jr., *Física para Ciencias e Ingeniería*, vol. 2, Ciudad de México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2018.
- [125] F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young, R. H. Vara, M. G. García, E. R. Güemes, ... and F. G. Benites, *Física Universitaria*. Fondo Educativo Interamericano, 1986.
- [126] H. D. Young and R. A. Freedman, *Física Universitaria*, 12.^a ed., vol. 2. México: Pearson Educación, 2009.
- [127] F. W. Sears and G. L. Salinger, *Termodinámica: Teoría Cinética y Termodinámica Estadística*. Reverté, 1978.
- [128] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, 7.^a ed., 2012.
- [129] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Pearson Educación, 1999.
- [130] J. Á. M. Valadez, *Transferencia de Calor*. México: Oxford University Press, 2002.
- [131] J. R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, *Fenómenos de Transporte*. Barcelona, España: Reverté, 2020.
- [132] R. B. Bird, *Fenómenos de Transporte*, 2.^a ed., México: Limusa Wiley, 2007.
- [133] F. Kreith, R. Manglik, and M. Bohn, *Principios de Transferencia de Calor*, 7.^a ed., México: Cengage Learning, 2012.
- [134] D. R. Askeland, J. B. Llidó, and J. B. de Pedro, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, vol. 3, México: International Thomson Editores, 1998.
- [135] J. M. Palomo Cano, “Aislantes térmicos: criterios de selección por requisitos energéticos”, 2017.
- [136] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*. México: Pearson Educación, 2003.
- [137] P. Fernández Díez, *Ingeniería Térmica y de Fluidos*. Santander, España: Universidad de Cantabria, 2003.
- [138] B. T. Kulakowski, J. F. Gardner, and J. L. Shearer, *Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems*. Cambridge University Press, 2007.
- [139] E. Ranzi, A. Cuoci, T. Faravelli, A. Frassoldati, G. Migliavacca, S. Pierucci, and S. Sommariva, “Chemical kinetics of biomass pyrolysis”, *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 6, pp. 4292–4300, 2008.
- [140] H. Luo, X. Wang, K. Krochmalny, L. Niedzwiecki, K. Czajka, H. Pawlak-Kruczek, ... and Q. Xiong, “Assessments and analysis of lumped and detailed pyrolysis kinetics for biomass

- torrefaction with particle-scale modeling”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 166, p. 106619, 2022.
- [141] K. B. Ansari, B. Kamal, S. Beg, M. A. W. Khan, M. S. Khan, M. K. Al Mesfer, and M. Danish, “Recent developments in investigating reaction chemistry and transport effects in biomass fast pyrolysis: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111454, 2021.
- [142] N. J. A. S. Zavala Salazar, “Modelo cinético para el proceso de desintegración catalítica considerando la descomposición de la carga alimentaria”, Instituto Politécnico Nacional, México, 2011.
- [143] L. E. Arteaga-Pérez, Y. Casas-Ledón, J. Cabrera-Hernández, and L. R. Machín, “Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación”, *Afinidad*, vol. 72, no. 570, 2015.
- [144] M. M. Harussani, S. M. Sapuan, A. Khalina, R. A. Ilyas, and M. D. Hazrol, “Review on green technology pyrolysis for plastic wastes”, in *Proc. 7th Postgraduate Seminar on Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, pp. 50–53, Nov. 2020.
- [145] J. M. Smith, *Chemical Engineering Kinetics*, 1981.
- [146] A. Undri, L. Rosi, M. Frediani, and P. Frediani, “Upgraded fuel from microwave assisted pyrolysis of waste tire”, *Fuel*, vol. 115, pp. 600–608, 2014.
- [147] A. Undri, S. Meini, L. Rosi, M. Frediani, and P. Frediani, “Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 103, pp. 149–158, 2013.
- [148] M. Bartoli, M. Frediani, C. Briens, F. Berruti, and L. Rosi, “An overview of temperature issues in microwave-assisted pyrolysis”, *Processes*, vol. 7, no. 10, p. 658, 2019.
- [149] H. Goyal, T. Y. Chen, W. Chen, and D. G. Vlachos, “A review of microwave-assisted process intensified multiphase reactors”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 430, p. 133183, 2022.
- [150] Z. M. Mokhta, M. Y. Ong, B. Salman, S. Nomanbhay, S. F. Salleh, K. W. Chew, ... and W. H. Chen, “Simulation studies on microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production with special attention on waveguide number and location”, *Energy*, vol. 190, p. 116474, 2020.
- [151] T. Garetto, A. Castro, M. Sad, and S. D. Miguel, *Reactores Químicos: Curso Introductorio*,

- 2020.
- [152] R. Bocardo, *Creatividad en la Ingeniería de Diseño*. Caracas: Equinoccio, 2006.
- [153] J. R. Couper, *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Houston: Gulf Professional Publishing, 2005.
- [154] J. B. Álvarez and R. L. Lazcano, *Diseño de Reactores Químicos*. México: Editorial Trillas, 1978.
- [155] H. S. Fogler, *Essentials of Chemical Reaction Engineering*. Boston: Pearson Education, 2010.
- [156] N. J. Scenna, P. A. Aguirre, S. J. Benz, O. J. Chiotti, H. J. Espinosa, M. B. Ferrero, ... and J. Vega, *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*, 2015.
- [157] O. F. Balseca-Sampedro, S. M. Aquino-Arroba, S. W. Chela-Hinojosa, and J. D. Figueroa-Moreno, “Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, y PS,” *Polo del Conocimiento*, vol. 6, no. 5, pp. 394–425, 2021.
- [158] E. Y. F. García, “Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas”, 2014.
- [159] J. A. C. Ferrero, *Curso Básico de Análisis Térmico*. Alicante: Editorial Club Universitario, 2014.
- [160] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, vol. 53. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [161] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th ed., McGraw-Hill Professional, 2014.
- [162] Y. A. Cengel, M. A. Boles, and M. Kanoglu, *Termodinámica*, 9.^a ed., Ciudad de México: McGraw-Hill, 2019.
- [163] T. L. Bergman, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [164] M. P. José, M. D. Marta, and J. R. D. A. A. José, *Ingeniería Térmica*. Madrid, España: Editorial UNED, 2014.
- [165] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed., New York: McGraw-Hill, 2010.
- [166] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Ciudad de México: Cengage Learning, 2017.

- [167] D. G. Zill, M. R. Cullen, A. E. G. Hernández, and E. F. López, *Ecuaciones Diferenciales con Problemas de Valores en la Frontera*, vol. 1, México: Thomson, 2002.
- [168] B. Yang and I. Abramova, *Dynamic Systems: Modeling, Simulation, and Analysis*. Cambridge University Press, 2022.
- [169] C. M. Close, D. K. Frederick, and J. C. Newell, *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*. John Wiley & Sons, 2001.
- [170] D. G. Zill, *Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado*, 11.^a ed., Ciudad de México: Cengage Learning, 2018.
- [171] Y. Jaluria, *Design and Optimization of Thermal Systems*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
- [172] R. L. Mott, V. G. Pozo, S. S. Sánchez, Á. H. Fernández, and J. V. Sánchez, *Diseño de Elementos de Máquinas*, 2006.
- [173] R. A. Serway, *Física para Ciencias e Ingeniería*, 2015.
- [174] Raytek, a Fluke Company, *Miniature Infrared Sensor Operating Instructions*, 2010. [En línea]. Disponible: https://www.instrumart.com/assets/raytek-mi_manual.pdf
- [175] M. Á. Pérez García, *Instrumentación Electrónica*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2014.
- [176] A. Serna, F. Ros, and J. C. Rico, *Guía Práctica de Sensores*. Creaciones Copyright S.L., 2010
- [177] X. A. Moran Martinez, “Construcción de un reactor HFCVD y simulación del mecanismo de reacción para el depósito de películas SRO”. 2022.
- [178] Y. Jaluria, *Design and Optimization of Thermal Systems with MATLAB Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.