



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Análisis AMEF y QFD en el Diseño y Manufactura de un Reactor
Pirólítico de 100 L de Capacidad con Calentamiento por
Resistencias Eléctricas y Cama Refractaria Móvil”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Industrial

PRESENTA:

Diego Armando Torres López

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

MES. Edgar Zacarías Moreno

Lic. Arturo Berzaín Moreno Dondiego

Pabellón de Arteaga, Ags., abril del 2022



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO®
de Pabellón de Arteaga

TEC

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS**

Tesis:

**“ANÁLISIS AMEF Y QFD EN EL DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN
REACTOR PIROLÍTICO DE 100 L DE CAPACIDAD CON
CALENTAMIENTO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS Y CAMA
REFRACTARIA MÓVIL”**

Presenta:

Diego Armando Torres López

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

MES. Edgar Zacarías Moreno

Lic. Arturo Berzaín Moreno Dondiego

Pabellón de Arteaga, Ags., abril del 2022.

AGRADECIMIENTOS

Al haber finalizado esta etapa tan importante de mi vida, me he dado cuenta que no hubiera logrado seguir adelante sin ayuda de mi familia.

En cada instante me proporcionaron su confianza y apoyo incondicional para verme crecer. Especialmente, agradezco a mis Tíos y Padres, a quienes les dedicó este triunfo. Gracias a ellos y a su gran esfuerzo que realizaron, me ayudaron a poder concluir esta etapa, en cada momento me inculcaron sus valores, principios y enseñanzas.

Agradezco al Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga y a sus docentes, que, a lo largo de mi formación profesional, fueron los encargados de orientarme y guiarme, proporcionándome las herramientas adecuadas para desarrollarme profesionalmente al compartir sus conocimientos.

Agradezco al Dr. José Alonso Dena Aguilar por brindarme la oportunidad y su rotunda confianza y apoyo incondicional para la culminación de esta etapa. Agradezco el que me haya brindado la confianza y seguridad para lograr concluir este éxito. Agradezco el que me haya dado la oportunidad de demostrar que puedo cumplir mis metas.

Agradezco a MICRO REFINERÍA ECOLÓGICA S. DE R. L. DE C. V. y al MES. Edgar Zacarías Moreno por permitirme trabajar en este proyecto.

Agradezco a Dios, por darme la fuerza necesaria para no rendirme en el transcurso de estos 5 años, los cuales fueron constante reto de superación y desarrollo personal. Agradezco a mis compañeros que siempre me apoyaron e incluso los que no, ya que siempre fueron un pilar donde sostenerse, motivándome a día tras día a seguir adelante.



Pabellón de Arteaga, Ags., 14/marzo/2022

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada “**ANÁLISIS AMEF Y QFD EN EL DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN REACTOR PIROLÍTICO DE 100 L DE CAPACIDAD CON CALENTAMIENTO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS Y CAMA REFRACTARIA MÓVIL**” del estudiante **DIEGO ARMANDO TORRES LÓPEZ** con numero de control 161050493 de la carrera de Ingeniería Industrial. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

MES. EDGAR ZACARÍAS MORENO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

LIC. ARTURO BERZAÍN MORENO DONDIEGO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags., 17/marzo/2022

DIEGO ARMANDO TORRES LÓPEZ
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NO. DE CONTROL 161050493

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **“ANÁLISIS AMEF Y QFD EN EL DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN REACTOR PIROLÍTICO DE 100 L DE CAPACIDAD CON CALENTAMIENTO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS Y CAMA REFRACTARIA MÓVIL”**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS



RESUMEN

“ANÁLISIS AMEF Y QFD EN EL DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN REACTOR PIROLÍTICO DE 100 L DE CAPACIDAD CON CALENTAMIENTO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS Y CAMA REFRACTARIA MÓVIL”

Por: **DIEGO ARMANDO TORRES LÓPEZ**

El proceso de pirólisis, es un mecanismo que emplea el concepto de la degradación térmica de la materia por efecto de la temperatura dentro de un recipiente. Un reactor pirolítico es un contenedor (generalmente de geometría circunferencial) habilitado para llevar a cabo dentro de él una serie de reacciones pirolíticas. En los años recientes, los reactores de pirólisis han sido empleados para el reciclaje de plásticos de desecho.

En el Laboratorio de Conversión de la Energía, adscrito al programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, se llevan a cabo estudios de la obtención de combustibles brutos por medio de la pirólisis de plásticos de desecho. Por lo que se contempla la manufactura de reactores pirolíticos bajo diseño propios.

En este trabajo, se presenta la manufactura de un equipo pirolizado consistente de un reactor de pirólisis de 100 L de capacidad con sistema de calentamiento por resistencias eléctricas y con cama refractaria móvil.

La propuesta de solución consistió en aprovechar un recipiente de recycle e integrarlo a una estructura de soporte, incorporarle resistencias eléctricas industriales, revestirlo con una arquitectura aislante a base de ladrillo refractario y analizar los resultados de la manufactura del equipo pirolizado mediante herramientas para el diseño de productos.

Se logró (1) diseñar y construir un equipo pirolizado, (2) rehabilitar un tanque-contenedor de recycle incorporándole una tapa desmontable con cierre por sujeción, (3) revestir el reactor con una pared refractaria para la contención térmica del sistema, (4) diseñar y construir una estructura de soporte con sistema de balanceo tipo columpio para otorgar grados de inclinación al reactor para operaciones de descarga, (5) incorporar una resistencia eléctrica industrial de 220V 2500W como sistema de calentamiento, (6) realizar un análisis de modos y efectos de fallos potenciales donde se sugiere que los principales focos de riesgo se atribuyen a la falta de competencias del operador en el conocimiento de las propiedades de los materiales y el manejo de herramientas de operación manual, principalmente de soldadura. Para solventarlos se requiere principalmente capacitación del operador para el manejo de maquinaria y herramientas de manufactura (trabajo a futuro) y (7) elaborar un estudio del despliegue de la función de la calidad del equipo, donde se sugieren que son 3 los factores de relevancia que solicita el cliente: (a) eficiencia del sistema con un buen funcionamiento operativo, (b) buen rendimiento de conversión y (c) buen diseño

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

de tamaño y volumen. Para solventarlos se requiere inversión de tiempo y dinero para acercarlos a los requerimientos del cliente (trabajo a futuro).

El costo de producción del equipo se estima en \$15,167.78 (IVA incluido, moneda nacional) sin considerar los costos de mano de obra, impuestos aplicables y depreciaciones

La presente Tesis es una secuencia más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis. Este trabajo es parte de un proyecto global de obtención de combustible bruto mediante un proceso de pirólisis. En este estudio se presenta la manufactura de un equipo pirolizado consistente de un reactor de pirólisis, de un sistema de calentamiento y de un sistema aislante, así como su validación por medio de herramientas para el diseño de productos.

Este estudio fue soportado por (i) la empresa MICRO REFINERÍA ECOLÓGICA S. DE R. L. DE C. V., (ii) el Instituto para el Desarrollo de la Sociedad del Conocimiento del Estado de Aguascalientes mediante el proyecto 025-FEIT-2021 “reactor pirolítico automatizado para la obtención de combustible y su aplicación en el reciclaje de plásticos”, (iii) el Tecnológico Nacional de México a través de trabajos previos y por medio del proyecto 11057.21-P “reactor pirolítico automatizado hecho a la medida para la obtención de combustible y su aplicación en la industria del reciclaje de plásticos” y (iv) el Programa para el Desarrollo Profesional Docente, tipo Superior mediante el Fortalecimiento de Cuerpos Académicos, ITPA-CA-1, proyecto “Diseño, implementación y control de sistemas mecatrónicos de registro y monitoreo de variables de operación en prototipos de aplicación en la industria del reciclaje de plásticos: trituración, extrusión y pirolisis”.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

MES. Edgar Zacarías Moreno

Lic. Arturo Berzaín Moreno Dondiego

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Alcances y limitaciones.....	3
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Tratamiento térmico de residuos por pirólisis.....	5
2.2 Reciclaje de plásticos por pirólisis.....	9
2.3 Tecnología de pirólisis (reactores pirolíticos).....	10
2.4 Conceptos de manufactura.....	11
2.5 Despliegue de la función de calidad (QFD).....	15
2.6 Análisis de modos y efectos de fallos (AMEF).....	18
III. METODOLOGÍA	20
3.1 Diseños mecánicos CAD 3D.....	20
3.2 Acondicionamiento de reactor y sección prefabricada del sistema de condensación.....	20
3.2.1 Reactor de trabajo.....	20
3.2.2 Sección prefabricada del sistema de condensación.....	20
3.3 Manufactura del equipo pirolizado.....	22
3.4 Listado de materiales, cuantificación y presupuestación.....	23
3.5 Aplicación AMEF y QFD.....	23
3.5.1 Metodología empleada para elaborar el AMEF del equipo pirolizado.....	23
3.5.2 Metodología empleada para elaborar el QFD del equipo pirolizado.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1 Diseño CAD 3D.....	28
4.2 Manufactura del equipo pirolizado.....	35

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

	Pág.
4.3 Análisis AMEF y QFD.....	47
4.3.1 Resultados AMEF.....	47
4.3.2 Resultados QFD.....	50
V. CONCLUSIONES.....	53
VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
ANEXO 1. Dibujos técnicos del equipo pirolizado.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
1	Valorización de residuos por tratamiento térmico.....	5
2	Procesos de incineración de residuos con recuperación de energía eléctrica.....	6
3	Esquema de un proceso de pirólisis simple.....	7
4	Clasificación de la pirólisis.....	8
5	Cadena de un proceso de pirólisis de biomasa hasta llegar a la conversión de aceite.....	9
6	Poderes caloríficos de materiales.....	10
7	Reactor de pirólisis de tambor rotativo.....	11
8	Reactor con efecto vortex integrado para reacciones fotoquímicas desarrollado por Lee et al	12
9	La manufactura como un proceso técnico.....	12
10	Vista de un centro de torneado de la marca Puma de la serie 700/800.....	13
11	Vista de un centro de perforación tipo fresadora marca Neway modelo VM 740 H.....	13
12	Clasificación de los procesos de manufactura.....	14
13	Procesos de manufactura de maquinado: torneado (izq.), perforación (centro) y fresado (der.).....	15
14	Partes de la plantilla del formato de la casa de calidad.....	16
15	Ejemplo de la casa de la calidad aplicado al sector automotriz.....	17
16	Ejemplo de plantilla AMEF de un proceso de soldadura de una silla.....	19
17	Tanque de recicle empleado para el reactor: vista en el centro de reciclaje de adquisición.....	21
18	Tanque de recicle empleado para el reactor: vista en área de resguardo previo a trabajos de manufactura.....	21
19	Porta-condensador, sección de la estructura de soporte manufacturado por Sánchez-Lezama.	22
20	Máquina de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400 (fuente: Martínez-Casillas).....	23
21	Torno CNC DMTG CKE 6150Z. (fuente: Martínez-Casillas).....	24
22	Vista de la estructura de soporte principal con el porta-condensador integrado, pero sin el porta-reactor.....	28
23	Vista de la estructura de soporte del porta-reactor.....	29
24	Vista de la estructura de soporte completa con el porta-reactor y porta-condensador integrados.....	29
25	Vista del porta-reactor con la cama refractaria.....	30
26	Vista completa de la estructura con el porta-reactor, porta-condensador y revestimiento refractario.....	30
27	Diagrama del reactor de estudio propuesto con tapa de cierre hermético.....	31

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

	Pág.
28	Diagrama del reactor de estudio propuesto sin la tapa de cierre hermético..... 31
29	Vista completa del equipo pirolizado: escala de grises..... 32
30	Vista completa del equipo pirolizado: acabado final..... 33
31	Concepto de un sistema de condensación comunicado con el reactor pirolítico..... 34
32	Inicio de trabajos de acondicionamiento de reactor..... 35
33	Construcción de porta-reactor..... 36
34	Operación de cortadora de plasma para construcción de tapa..... 36
35	Operación de torneado de ejes de giro del porta-reactor..... 37
36	Unión de porta-reactor con porta-condensador..... 37
37	Porta-reactor y porta-condensador integrados (antes del acabado final)..... 38
38	Montaje de cama refractaria: aislante cerámico inferior..... 38
39	Montaje de cama refractaria: ladrillo refractario..... 39
40	Trabajos de acabado final..... 39
41	Equipo pirolizado concluido: vista 1, inclinación perpendicular..... 40
42	Equipo pirolizado concluido: vista 2, inclinación perpendicular..... 41
43	Equipo pirolizado concluido: vista 3..... 42
44	Equipo pirolizado concluido: vista 4..... 42
45	Equipo pirolizado concluido: vista 5..... 43
46	Equipo pirolizado concluido: vista 6..... 43
47	Equipo pirolizado concluido: vista 1, inclinación 45°..... 44
48	Equipo pirolizado concluido: vista 2, inclinación 45°..... 45
49	Acercamiento zona de hospedaje de resistencia eléctrica..... 46
50	Acercamiento eje de giro del porta-reactor..... 46
51	Grafica de COMO's vs importancia relativa (%)..... 52
52	Estructura de soporte integrada (porta-condensador y porta-reactor) sin la cama móvil..... 58
53	Tapa de reactor..... 58
54	Cama móvil del porta-reactor..... 59
55	Reactor..... 59
56	Estructura de soporte integrada (porta-reactor + porta-condensador)..... 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Guía de puntuación para estimaciones del método AMEF.....	18
2	Cuantificación y presupuestación del equipo pirolizado.....	25
3	Rubrica de evaluación de criterios de gravedad para AMEF.....	26
4	Rubrica de evaluación de criterios de ocurrencia para AMEF.....	26
5	Rubrica de evaluación de criterios de detección para AMEF.....	26
6	Análisis AMEF del diseño de equipo pirolizado.....	47
7	Resumen del análisis AMEF: 3 principales fallos detectados.....	50
8	Tabla de resultados del QFD aplicado.....	51

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los plásticos de desechos contribuyen a la contaminación del medio ambiente debido a que la mayoría de ellos no son degradables y se acumulan en rellenos sanitarios o en hábitats diversos por su mal manejo de confinamiento.¹ El reciclaje de estos desechos es una opción para reducir el impacto negativo en el ambiente, además de otorgar un valor agregado a este tipo de residuos y poder ser partícipe dentro de una economía circular de reciclaje.^{2,3}

La pirólisis es uno de estos procesos de reciclaje de plásticos de desecho, que puede ser partícipe de una economía circular de los plásticos debido a que es un proceso de descomposición térmica donde se obtienen combustibles líquidos aprovechables.^{4,5}

Para llevar a cabo un proceso de pirólisis se emplean convencionalmente reactores pirolíticos, los cuales poseen ciertas características técnicas que permiten llevar a cabo las reacciones pirolíticas bajo control y poder recolectar los residuos pirolíticos.⁶ Aunado a lo anterior, los reactores de pirólisis se pueden integrar a un ciclón y un condensador para conformar equipos pirolizadores.⁷ Entre los tipos de reactores de pirólisis más empleados son los de tipo batch, de lecho fijo, de lecho en movimiento, de lecho de fluido burbujeante, de pirólisis ultra-rápida, entre otros.^{7,8}

En los últimos años se han reportado diversos trabajos de diseño y construcción de reactores pirolíticos para usos diversos como, por ejemplo, obtener aceite pirolítico, obtener carbón vegetal, carbón activado, biocarbones, para tratamiento de biomasa residual o hasta la valoración energética de residuos de hospital, entre otros.⁹⁻¹⁴ De manera común, la mayoría de los estudios disponibles en la literatura hacen referencia a equipos de bajo volumen o a nivel laboratorio.

En el Laboratorio de Conversión de la Energía, adscrito al programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, se llevan a cabo estudios de la obtención de combustibles brutos por medio de la pirólisis de plásticos de desecho. Por lo que se contempla el diseño y construcción de reactores pirolíticos automatizados hechos a la medida bajo diseño propios y empleando técnicas de manufactura avanzada.

En este trabajo, se propone la manufactura de un equipo pirolizado consistente en un reactor de pirólisis de 100 L de capacidad con sistema de calentamiento y arquitectura refractaria integrada, así como aplicar herramientas para el diseño de productos para validar la calidad de fabricación del reactor.

Ante esto, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

- 1.- Manufactura de un equipo de pirólisis:

- Diseño y construcción de un equipo pirolizado consistente de un reactor y una estructura de soporte.
- Integrar un sistema de calentamiento y un sistema de asilamiento a base de arquitectura refractaria.

2.- Aplicación de herramientas para el diseño de productos:

- Análisis de modos y efectos de fallos (AMEF)
- Despliegue de la función de la calidad (QFD).

La propuesta de solución consistió reacondicionar un recipiente prefabricado como reactor de pirólisis con estructura de soporte integrada, un sistema de calentamiento por resistencias eléctricas, un revestimiento refractario y aplicar herramientas de calidad.

La presente Tesis es una secuencia más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este estudio fue soportado por (i) la empresa MICRO REFINERÍA ECOLÓGICA S. DE R. L. DE C. V., (ii) el Instituto para el Desarrollo de la Sociedad del Conocimiento del Estado de Aguascalientes mediante el proyecto 025-FEIT-2021 “reactor pirolítico automatizado para la obtención de combustible y su aplicación en el reciclaje de plásticos”, (iii) el Tecnológico Nacional de México a través de trabajos previos y por medio del proyecto 11057.21-P “reactor pirolítico automatizado hecho a la medida para la obtención de combustible y su aplicación en la industria del reciclaje de plásticos” y (iv) el Programa para el Desarrollo Profesional Docente, tipo Superior mediante el Fortalecimiento de Cuerpos Académicos, ITPA-CA-1, proyecto “Diseño, implementación y control de sistemas mecatrónicos de registro y monitoreo de variables de operación en prototipos de aplicación en la industria del reciclaje de plásticos: trituración, extrusión y pirolisis”.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y manufacturar un equipo pirolizado mediante la integración de un reactor pirolítico, estructura de soporte con cama móvil, sistema de calentamiento y revestimiento refractario para su implementación en el reciclaje de plásticos de desecho.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar mecánicamente el equipo pirolizado mediante software especializado de diseño mecánico 3D CAD para validar el funcionamiento y dimensiones del sistema previo a su construcción.
- Manufacturar el equipo pirolizado mediante técnicas de manufactura avanzada para llevar a cabo reacciones de pirólisis.
- Integrar el sistema de calentamiento al reactor mediante el uso de resistencias eléctricas industriales para las pruebas de operación del equipo.
- Integrar una arquitectura aislante refractaria mediante el uso de ladrillos refractarios para contención del calor del sistema en las pruebas de operación del equipo.
- Aplicar herramientas para el diseño de productos mediante técnicas AMEF y QFD para validar la calidad de la fabricación.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los reactores de pirólisis son una opción para el reciclaje de plásticos de desecho ya que coadyuvan a disminuir la contaminación que estos residuos producen al medio ambiente.

Dentro de las ventajas de este tipo de procesos es la obtención de residuos líquidos pirolíticos que pueden ser empleados como combustibles. Sin embargo, la eficiencia de una reacción de pirólisis es dependiente del tipo de materia prima, las características técnicas del tipo de reactor y demás variables de operación.

En particular, los reactores de pirólisis deben contar con una configuración que permita (i) la fácil descarga de los residuos de manera controlada, (ii) contar con el suministro de calor para llegar a las temperaturas de operación y (iii) poder integrar un sistema simple de condensación.

Con base en lo anterior, en este estudio se presenta una propuesta de diseño y manufactura de un equipo pirolizado consistente de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad, una estructura de soporte con cama móvil, un sistema de calentamiento y un revestimiento refractario.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y manufacturar un equipo pirolizado con una calidad de fabricación que cumpla con lo estipulado por el cliente y que no presente fallas de diseño ni de producto terminado.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

- Para el reactor se empleó un recipiente cilíndrico cerrado de recicle y se habilitó con tapa desmontable con sistema de cierre con sujeción.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

- La estructura de soporte se compone de dos secciones integradas: (1) sección de cama refractaria móvil (resultante de este trabajo) y (2) sección para el sistema de condensación (obtenida de un trabajo previo).
- El sistema de condensación está fuera del alcance del presente estudio. Únicamente se presentan diseños de la idea conceptual de este componente.
- No se realizan pruebas preliminares de funcionamiento mecánico y térmico del equipo pirolizado ya terminado.
- No se realiza ningún análisis de esfuerzos mediante software de diseño.
- La calidad del diseño del equipo pirolizado –como producto final– solo es evaluado mediante un análisis AMEF y QFD.
- Por derechos de propiedad industrial y patentado, las dimensiones específicas del prototipo no son presentadas en el presente trabajo. Por lo que los diseños mecánicos solo se presentan en vistas isométricas y –a manera de referencia– en los dibujos técnicos del prototipo solo especifican dimensiones generales de largo x ancho x alto y/o diámetro.
- Ningún estudio de rentabilidad es realizado, solo se describe la cuantificación y presupuestación de los materiales empleados en el equipo pirolizado a manera de referencia. Tampoco se especifican los costos por mano de obra, impuestos, ni depreciaciones aplicables.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS POR PIRÓLISIS

Un tratamiento térmico es una operación unitaria donde se aplica energía calorífica a la materia. Dentro de las tecnologías de tratamiento térmico se encuentra la incineración, gasificación y la pirólisis. De manera común, cada uno de los procesos anteriores, pueden ser empleados en el reciclaje de residuos con el objetivo de valorizarlos, ya que a partir de ellos se puede obtener energía.¹⁵ En la Figura 1, se muestra una propuesta de economía lineal del tratamiento de residuos donde se aprecia que el lugar que ocupa el tratamiento térmico dentro de una cadena de tratamiento de residuos (fuente: terravivasas.com).

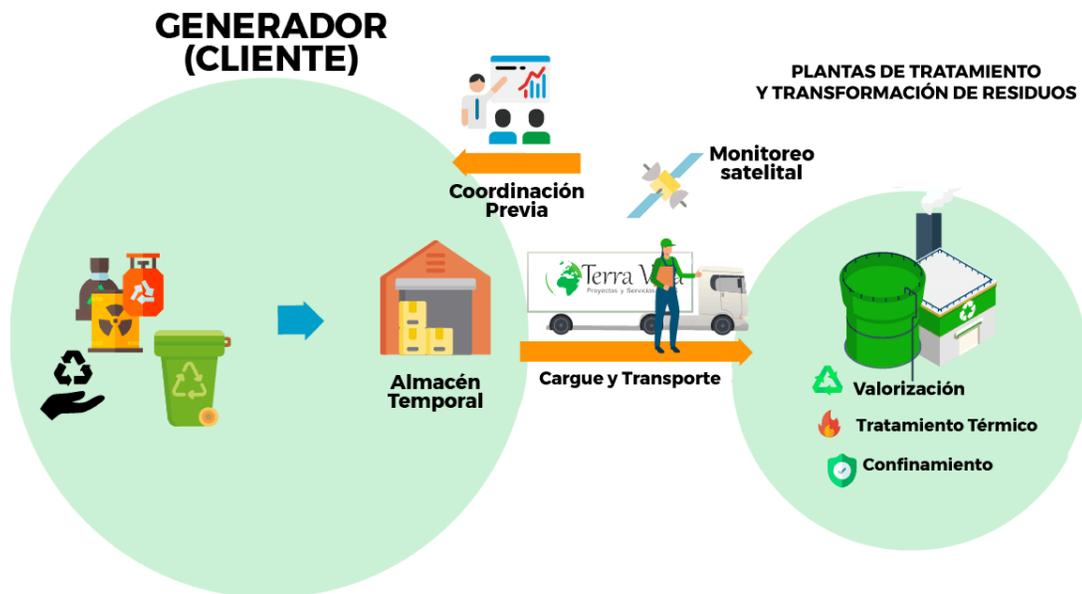


Figura 1. Valorización de residuos por tratamiento térmico.

El tratamiento térmico de residuos (*waste to energy*, WTE en sus siglas en inglés) se basa en la combustión de la materia para obtener energía eléctrica o térmica. Donde las tecnologías que se emplean en los procesos WTE son la incineración, pirólisis o gasificación. El conocimiento de las tecnologías anteriores, permite establecer proyectos de recuperación de energía a partir de los residuos.¹⁶ En la Figura 2, se presenta un ejemplo de tratamiento térmico con recuperación de energía.

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirólítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

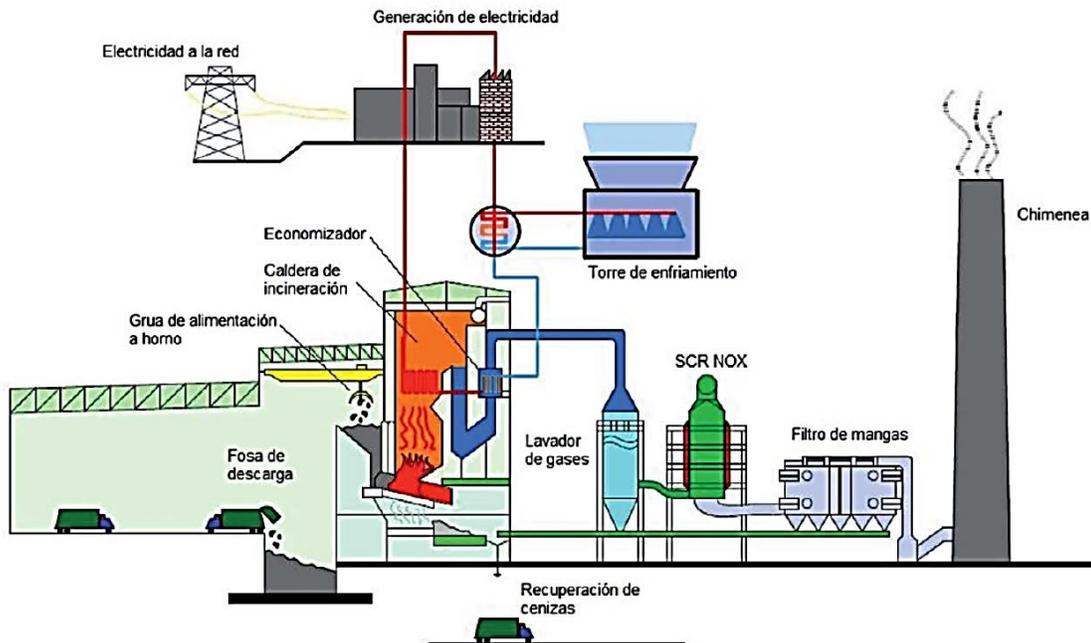


Figura 2. Procesos de incineración de residuos con recuperación de energía eléctrica.

Dentro de los procesos WTE, se encuentra la pirólisis. La pirólisis es un proceso de degradación térmica de la materia en ausencia de oxígeno y empleando temperaturas de calor entre 300 y 800 °C.¹⁷ Entre las ventajas y desventajas –en comparación con otras tecnologías–, que la pirólisis ofrece son:¹⁸

- La cantidad de emisiones peligrosas es menor.
- Se minimiza la contaminación ambiental.
- Requiere de más mano de obra.
- Permite obtener materia prima para síntesis petroquímica.

En la Figura 3, se observa un diagrama representativo de un proceso de pirólisis. La biomasa se introduce dentro de un recipiente, al cual se le aplica calor para producir energía y residuos de cenizas (tomada de <https://laurenmartinez15.angelfire.com/PIROLISIS.htm>).

La pirólisis se puede clasificar de diferentes formas:

a) Según la fuente de energía térmica que requiere el proceso:¹⁹

Pirólisis indirecta: la fuente de energía necesaria se transmite por conducción y radiación por las paredes del reactor.

Pirólisis directa: la fuente de energía necesaria la proporciona la combustión de parte de la carga.

b) Desde el aspecto técnico:²⁰

Pirólisis lenta: también llamada pirólisis convencional, se caracteriza por manejar una velocidad de calentamiento lenta entre 500-600 °C, los tiempos de residencia son entre 5 y 60 minutos y permite obtener productos líquidos, sólidos y gaseosos.

Pirólisis rápida: el material se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno a temperaturas de 650 °C y permite obtener principalmente bioaceites.

Pirólisis ultrarrápida: la temperatura del proceso es a temperaturas mayores a 1000 °C y los tiempos de residencia son menores a 5 minutos y se obtienen principalmente gases.

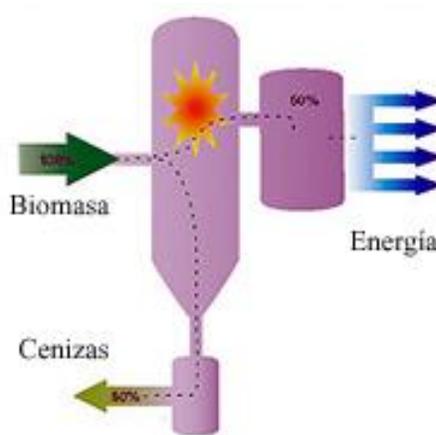


Figura 3. Esquema de un proceso de pirólisis simple.

En la Figura 4, se presenta un diagrama de los tipos de pirólisis más comunes.²¹ Se describen los productos resultantes de cada uno de los tipos de pirólisis (combustibles líquidos, carbón-*biochar*- o gas). En la Tabla 1, se describen algunas características técnicas de las diversas tecnologías de pirólisis.²²

La función de la pirólisis es degradar térmicamente la materia prima hasta obtener trazas de pirólisis como son sólidos carbonizados (carbones o biochar), gases pirolíticos (como el hidrogeno, metano, dióxido de carbono o hidrocarburos), productos líquidos (gases pirolíticos condensados, bioaceites) y/o residuos tipo tinta (residuos de externos). Los gases de pirólisis, a la salida del reactor, poseen una temperatura igual a la temperatura de operación en el reactor, pudiendo ser entre 300 y 800 °C, según la materia prima empleada y volviéndose hasta cierto punto incondensables por el elevado gradiente de temperatura que poseen.^{17,23} En particular, los gases pirolíticos pueden condensarse para formar líquidos, también llamados aceite de pirólisis (o bioaceite cuando es proveniente de biomasa), los cuales se pueden utilizar como fuentes de energía para calderas y/o plantas de energía eléctrica por su valor calórico (mitad del valor calórico del diésel de hidrocarburos).^{23,24} En la Figura 5, se visualiza un diagrama de una cadena de un proceso de pirólisis de biomasa en donde se aprecia la obtención de aceites de pirólisis como un posible residuo valorizado.²³

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

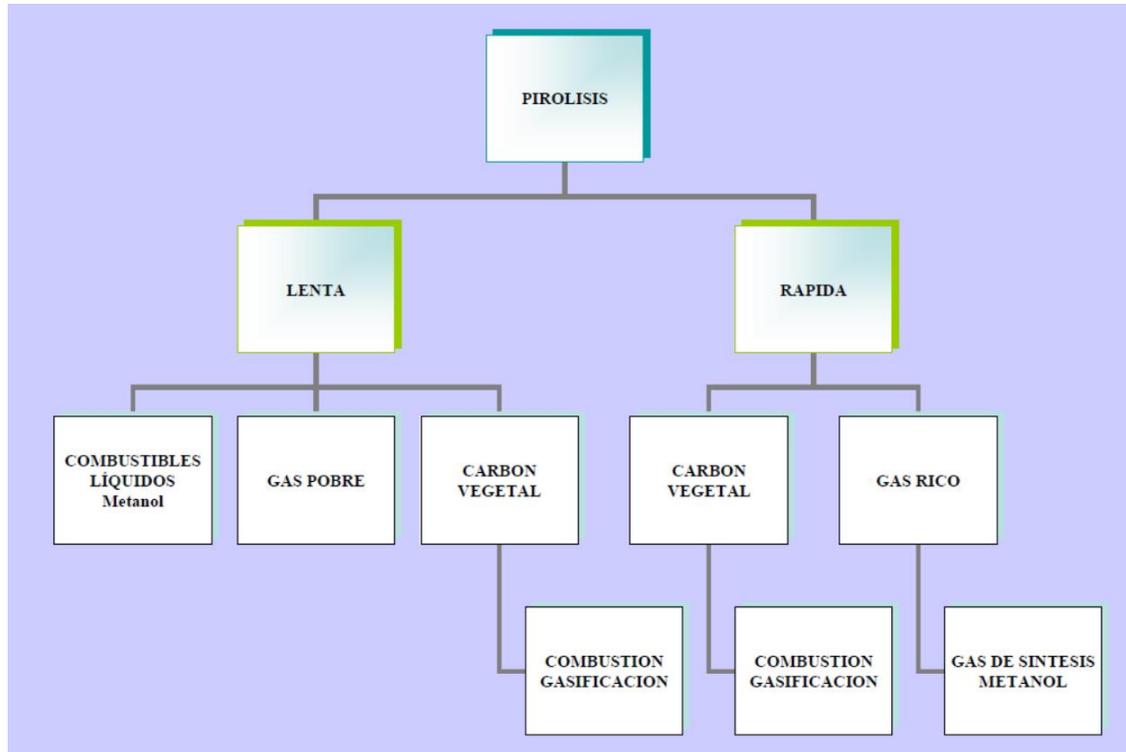


Figura 4. Clasificación de la pirólisis.

Tabla 1. Características técnicas de las tecnologías de pirólisis.

PROCESO	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	PRODUCTOS
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Bio-char
Convencional (lenta)	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
Rápida	0.5-5 s	Muy rápida	650	Bioaceites
Flash (líquidos)	< 1 s	Rápida	< 650	Bioaceites
Flash (gas)	< 1 s	Rápida	< 650	Químicos y gas
Ultrarrápida	< 0.5 s	Muy rápida	1000	Químicos y gas
Vacio	2-30 s	Media	400	Bioaceites
Hidropirólisis	< 10 s	Rápida	< 500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 s	Rápida	> 700	Químicos

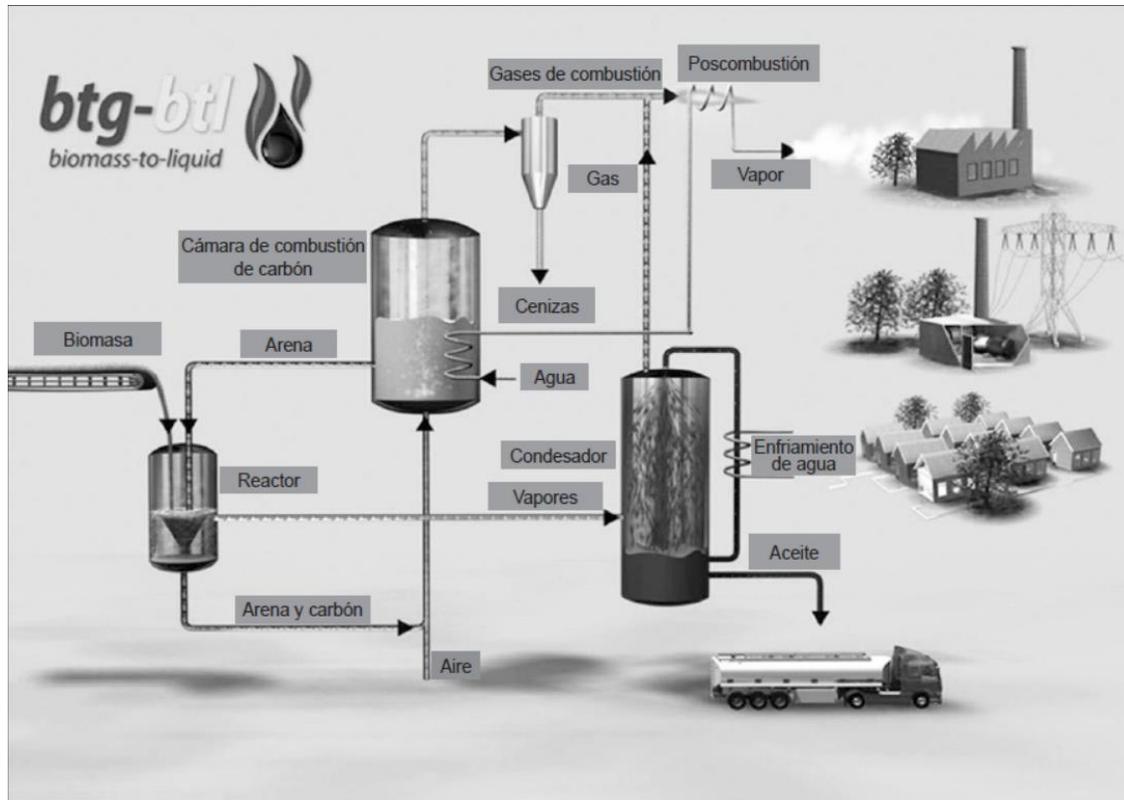


Figura 5. Cadena de un proceso de pirólisis de biomasa hasta llegar a la conversión de aceite.

2.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS POR PIRÓLISIS

Los plásticos, también llamados polímeros, son materiales naturales (como la resina), semi-sintéticos (mezcla de polímeros naturales y artificiales) o sintéticos (hechos artificialmente). Entre los plásticos de mayor uso dentro de una economía y por ende, los de mayor producción son el tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), Policloruro de vinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP) y polietireno (PS), entre otros.²⁵

Sin embargo, al aumentar la demanda de materia prima de plástico (más de 400 millones de toneladas de producción en el 2018), se incrementan los problemas de contaminación debido a que un tercio de los desechos plásticos terminan en cuerpos de agua o en el suelo. Por lo anterior, los plásticos son uno de los principales contaminantes del medio ambiente. Es por ello, que se han establecido técnicas de recolección para dar un valor a los desechos plásticos como los vertidos en mares y océanos.²⁶

La degradación térmica de los plásticos se lleva a cabo a elevadas temperaturas provocando reacciones químicas en los materiales de tal manera que se producen carbón, líquidos condensables y especies gaseosas. Una de estas técnicas que emplea el principio de la degradación térmica es la pirólisis.²⁷

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

Es por ello que se han desarrollado procesos o equipos para llevar a cabo el proceso de pirólisis de los residuos plásticos para obtener combustible diésel. En particular, se ha reportado la instalación de plantas de pirólisis capaces de procesar estos materiales, por ejemplo, la empresa Suez Environment instaló una planta capaz de obtener hasta 750 L de diésel, 250 L de queroseno y un 3% de residuos tipo tinta por cada tonelada de plástico.²⁸ Mediante el reciclado térmico, se logra una valorización energética de los plásticos, ya que estos se consideran como excelentes combustibles. Donde 1 kg de plástico equivale a 1 kg de fuel-oil o gas natural con similares poderes caloríficos.²⁹ En la Figura 6, se muestra del poder calorífico del gas natural y el fuel-oil, los cuales serían los mismos valores calóricos alcanzables por los plásticos.²⁹

Con base a lo anterior, se observa muy viable instalar procesos de pirólisis con la construcción de reactores de pirólisis para otorgar un valor agregado a los residuos plásticos.

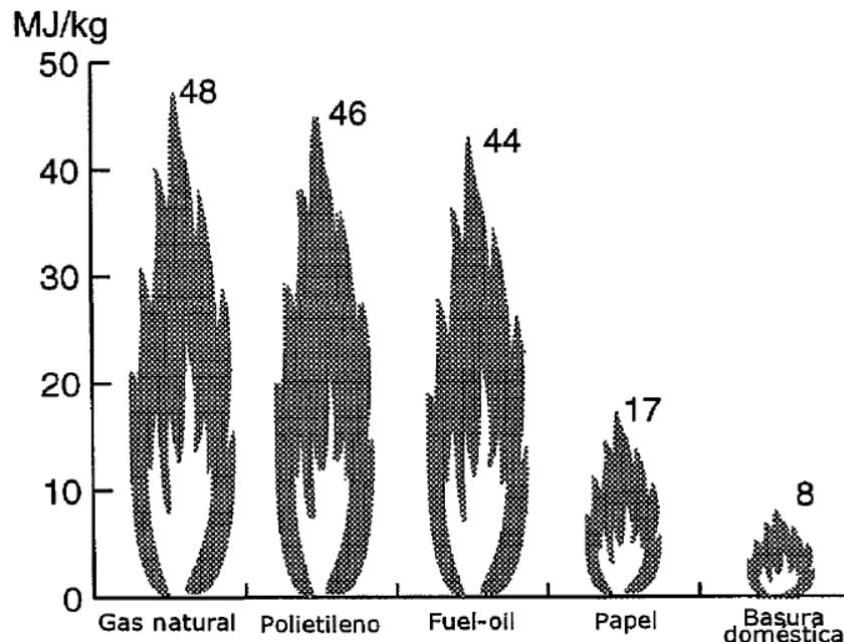


Figura 6. Poderes caloríficos de materiales.

2.3 TECNOLOGÍA DE PIRÓLISIS (REACTORES PIROLÍTICOS)

La pirólisis consiste en el uso de temperaturas medias bajo ambientes controlados donde se busca recuperar productos pirolíticos, los cuales se someten a tratamientos posteriores para purificarlos u otorgarles una valorización. Diversas tecnologías (tipos de reactores) de pirólisis se han reportado según el tipo de proceso, donde todas estas tecnologías ellas involucran el calentamiento indirecto del material, entre las cuales se describen:³⁰

- a) **Pirólisis lenta.** Es una tecnología que emplea hornos rotatorios u hornos estáticos equipados con paletas o tornillos móviles para mezclar el material. En algunos casos se acompañan de sistemas de condensación de gases pirolíticos. Los hornos pueden ser cilíndricos con arreglos verticales u horizontales y equipado

con paletas movibles rotativas o no rotativas; o pueden ser de tubos horizontales equipados con tornillos de Arquímedes. En la Figura 7, se presenta una vista de un reactor de pirólisis de tipo tambor rotatorio (fuente: <https://www.cartif.es/planta-piloto-pirolisis-tambor-rotatorio/>).

- b) **Pirolisis rápida.** Requieren de una transferencia rápida de calor hacia la materia. La tecnología de lecho fluidizado ha sido adaptada para estas aplicaciones. Se considera dentro de esta tecnología los reactores de vórtice abatibles. A manera de ejemplo del aspecto de estos reactores con efecto vortex, en la Figura 8, se observa una vista de un reactor de vórtice para reacciones fotoquímicas desarrollado por Lee et al.³¹



Figura 7. Reactor de pirólisis de tambor rotativo.

2.4 CONCEPTOS DE MANUFACTURA

La manufactura es una secuencia de operaciones o un conjunto de acciones encaminadas a cambiar las dimensiones, aspecto físico y propiedades de una materia prima inicial a un producto terminado mediante operaciones físicas y/o químicas. La manufactura involucra la creación de geometrías de piezas y la fabricación de productos mediante solo operaciones de ensamble (por ejemplo, montaje o soldadura). En general, se utilizan máquinas, herramientas, energía y mano de obra para obtener el producto final planeado, ver Figura 9.³²

La manufactura es una metodología para transformar materiales en artículos útiles, técnicamente, la manufactura involucra el diseño y fabricación de bienes durables para el consumo.³³

Dentro de los procesos que abarca la manufactura podemos mencionar: fundición, moldeo, extrusión, maquinado, laminado, rectificado, tratamiento térmico, corte, soldadura, abrasión, entre otros.^{32, 34}

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 8. Reactor con efecto vortex integrado para reacciones fotoquímicas desarrollado por Lee et al.³¹

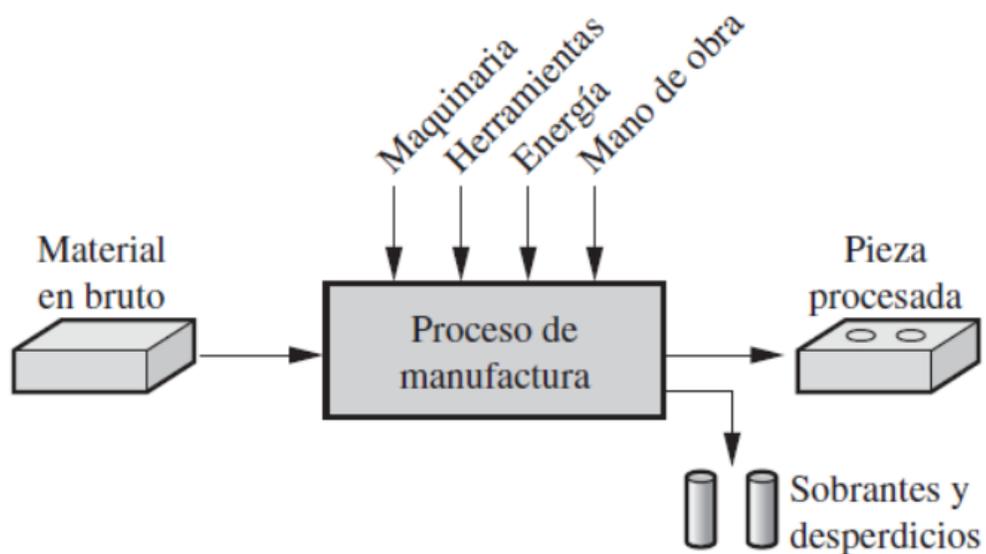


Figura 9. La manufactura como un proceso técnico.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

En las Figuras 10 y 11, se presentan vistas de maquinaria comúnmente empleada en procesos de manufactura convencionales (tomadas de <https://intermaq.mx/>).



Figura 10. Vista de un centro de torneado de la marca Puma de la serie 700/800.



Figura 11. Vista de un centro de perforación tipo fresadora marca Neway modelo VM 740 H.

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

En específico, un proceso de manufactura contempla la ejecución de operaciones unitarias, las cuales mediante uno o varios pasos se va transformando el material inicial hasta llegar a un producto final. Estas operaciones unitarias se pueden dividir en operaciones de proceso y operaciones de ensamblado, las primeras comprenden el paso del material de trabajo desde un estado de acabado hasta otro mas avanzado hasta llegar al producto final, las segundas se refieren a la unión de dos o mas componentes para integrar una entidad nueva. En la Figura 12, se presenta una clasificación de los procesos de manufactura.³²

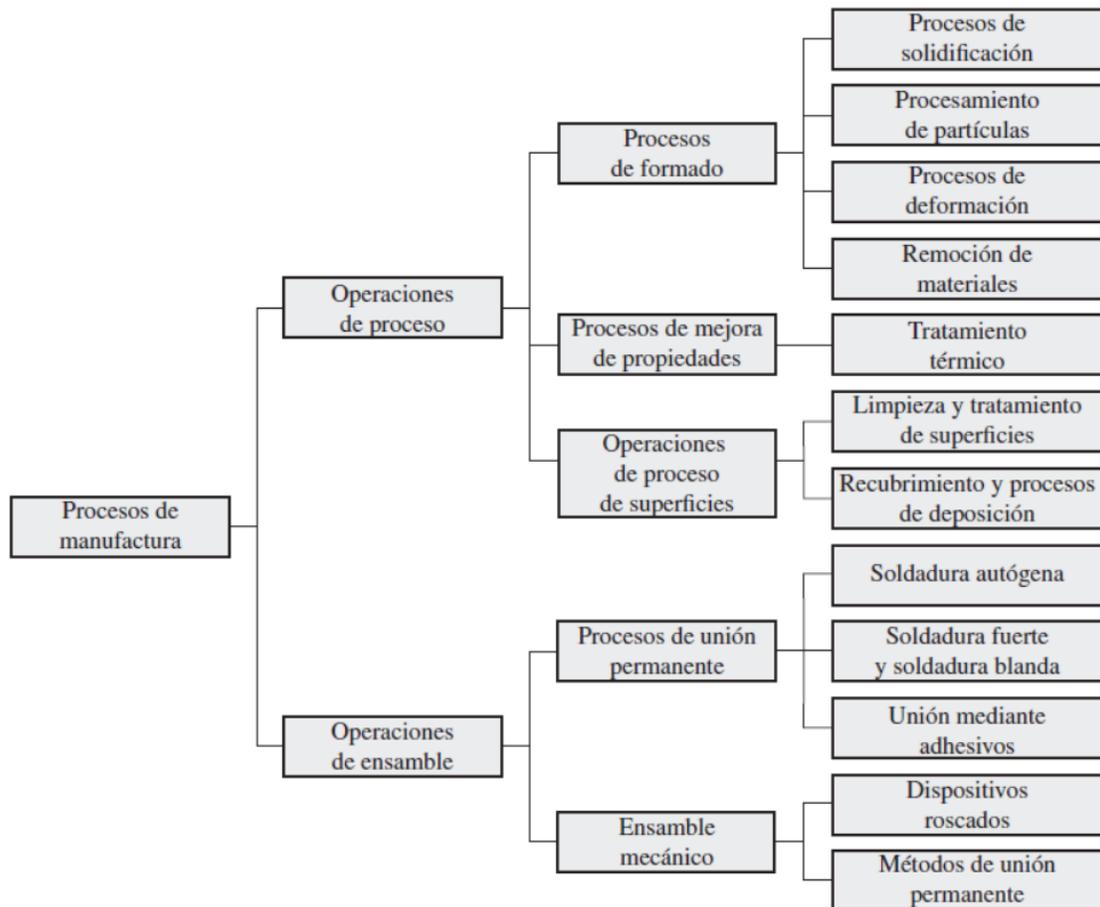


Figura 12. Clasificación de los procesos de manufactura.

En la Figura 13, se muestran algunos ejemplos de las operaciones de manufactura más representativos que se pueden encontrar en la industria, siendo las operaciones unitarias de maquinado de torneado, perforación (taladro) y fresado.³² La característica común de estos procesos es la reducción de geometría de las piezas de trabajo.

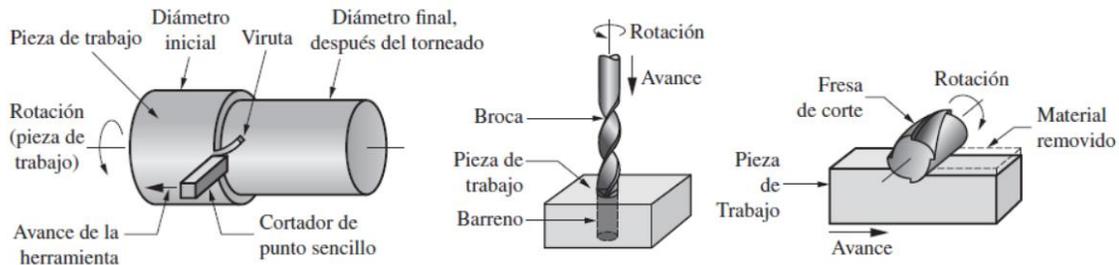


Figura 13. Procesos de manufactura de maquinado: torneado (izq.), perforación (centro) y fresado (der.).

2.5 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)

El despliegue de la función de calidad (QFD) es una metodología que acopla en los requisitos de diseño de un producto tanto las necesidades y requerimientos del cliente y consumidores, de tal manera que se traducen estas condiciones en el acabado final del producto. QFD es una técnica que emplea las siguientes etapas de planeación:³⁵

- Planeación del producto.
- Desarrollo del producto.
- Planeación del proceso.
- Planeación de la producción hasta obtener los productos fabricados.

QFD coadyuva a la calidad de los procesos y los productos debido a que ayuda a suprimir los problemas que pudieran presentarse en los procesos de producción y entrega. Para poder establecer un procedimiento QFD dentro de una organización se debe identificar las cadenas de clientes ya que cada tipo de cliente tendrá necesidades particulares. Siendo a través de un plan denominado “la casa de la calidad” donde se recopila los datos de necesidades de los clientes a contactar, los recursos necesarios para recopilar los datos y los métodos a utilizar.³⁵ En la Figura 14, se presenta un ejemplo del formato de la “casa de la calidad” y sus partes (fuente: <https://bsginstitute.com/bs-campus/blog/despliegue-de-la-funcion-de-calidad-qfd-60>). Este tipo de formato recoge de manera sistemática y estructurada los requerimientos de los clientes para el proceso de diseño y desarrollo del producto. Se emplean matrices que permiten relacionar las necesidades de los clientes con las características de los productos finales. El cruce matricial permite identificar los elementos técnicos que en mayor grado satisfacen las exigencias de los clientes.³⁶

La construcción de la “casa de la calidad” se conforma de 6 pasos:³⁶

- Identificar las necesidades del cliente.
- Identificar las necesidades técnicas.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

- Relacionar las necesidades del cliente con las necesidades técnicas.
- Llevar a cabo una evaluación de productos competidores.
- Evaluar las necesidades técnicas y desarrollar objetivos.
- Determinar que requerimientos técnicos serán desplegados en el resto del proceso de producción.

En la Figura 15, se muestra un ejemplo de aplicación de la técnica de la “casa de la calidad” aplicado a la puerta de un automóvil.³⁷



Figura 14. Partes de la plantilla del formato de la casa de calidad.

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

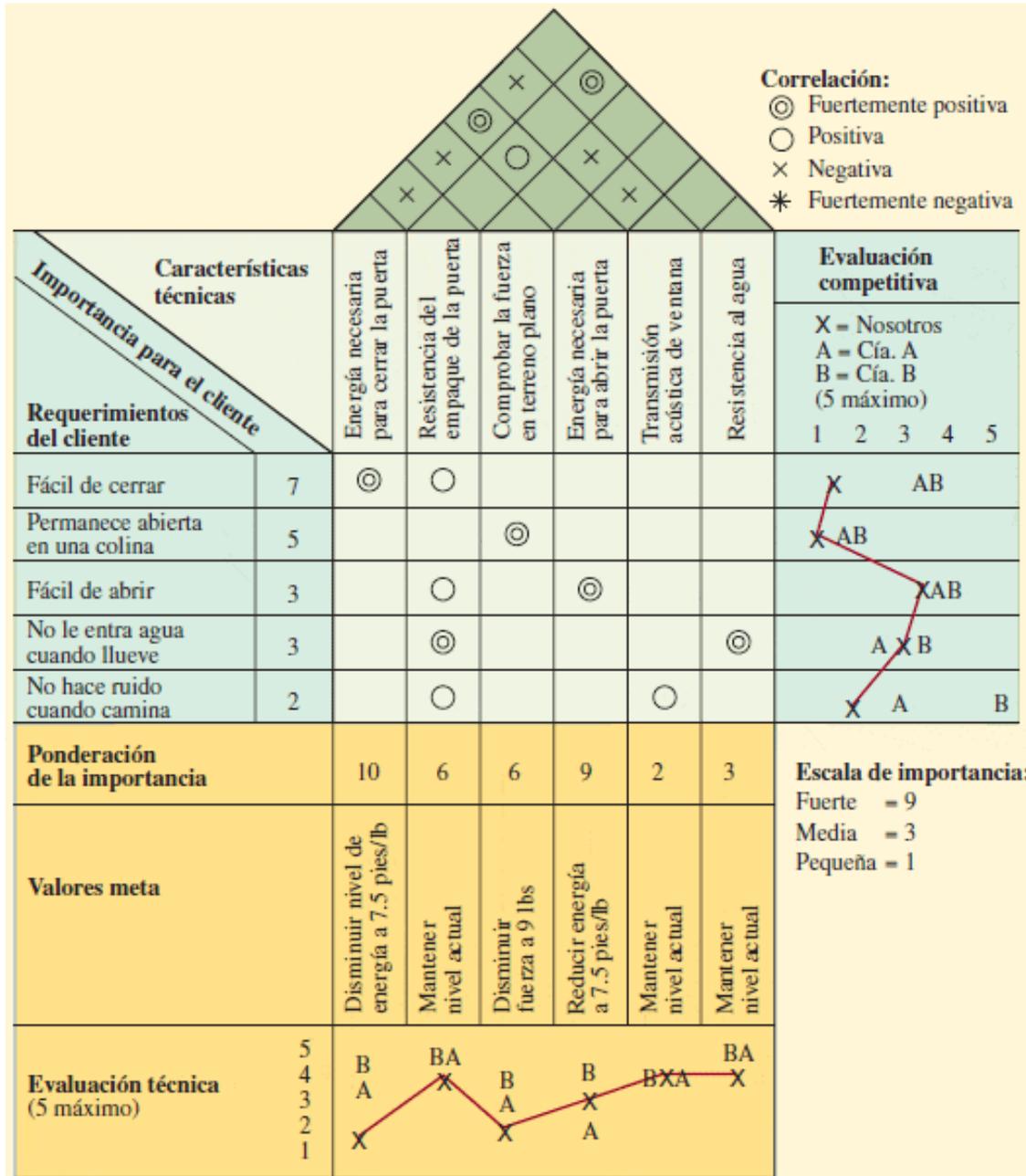


Figura 15. Ejemplo de la casa de la calidad aplicado al sector automotriz.

2.6 ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS (AMEF)

El análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) también se denomina como análisis de modos de falla y efectos de diseño (AMFED). Es una técnica que permite identificar y atender los riesgos de un producto. En otras palabras, es una herramienta sistemática empleada para evaluar un proceso e identificar donde y como puede fallar. De igual manera, el método AMEF permite evaluar como las fallas impactan a la operación, así como detectar las etapas del proceso que más necesitan el cambio. La metodología AMEF mejora la seguridad y la funcionalidad, reduce los costos provocados por las fallas y desde el aspecto de atención al cliente, reduce la posibilidad de demandas ante la responsabilidad legal que un producto no ideal llegue hasta el cliente y genere insatisfacciones. Para establecer un AMEF se define la información de cada elemento o función del diseño:^{38, 39}

- a. Modos de fallas.
- b. Efecto de la falla en el cliente.
- c. Estimación de la gravedad, probabilidad de ocurrencia y detección.
- d. Causas potenciales de falla.
- e. Acciones correctivas o controles.

En la Tabla 1, se presenta una rúbrica de puntuación para la estimación de la gravedad de la falla. La escala manejada es de 1-10 donde 1 significa que es probable que el cliente no lo note y 10 indica que el cliente podría estar en peligro.^{38, 39} En la Figura 16, se ilustra un ejemplo de una plantilla AMEF orientado al proceso de ensamble por soldadura de una silla (tomada de <https://ejemplos.net/ejemplos-practicos-de-amfe/>).

Tabla 1. Guía de puntuación para estimaciones del método AMEF.

ESTIMACIÓN	GRAVEDAD	OCURRENCIA	DETECCIÓN
10	Peligro o potencialmente amenazante para la vida	Probabilidad de ocurrencia muy alta o casi segura	No puede detectarse o defecto oculto
7-9	Impacto severo en la seguridad o la satisfacción del cliente	Probabilidad de ocurrencia alta	Poca posibilidad de detección
5-6	Impacto importante en la satisfacción del cliente	Probabilidad de ocurrencia moderada	Posibilidad moderada de detección
2-4	Defecto menor o inconveniencia para el cliente	Probabilidad de ocurrencia baja	Posibilidad de alta detección
1	Poco o ningún defecto	Improbable que ocurra	Casi siempre se podrá detectar

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

AMFE: ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS POTENCIALES (PROCESO)														
Nombre del proceso: Ensamble de componentes			Proveedor del material: Empresa ABC					Nombre y firma:						
Producto: Silla modelo TL-65			Fecha de fabricación:					Supervisor:						
Fecha AMFE Inicial: 02/05/2017							Fecha AMFE última revisión: 15/05/2017							
Modos de fallo	Efecto potencial del fallo	Causa potencial del fallo	Condiciones Existentes					Estado y acción recomendados	Área responsable acción correctora	Resultados				
			Controles actuales	O	G	D	Índice prioritario del riesgo (NPR)			Acción correctora	O	G	D	Índice prioritario del riesgo (NPR)
Falta de soldadura	Rebajos, ruidos y falta de rigidez	Defectos de acoplamiento	Ninguno	8	8	2	128	Control	Fabricación	Previstos grupos de aprietes en la zona	6	8	2	96
		Pestañas fuera de geometría	Ninguno	6	8	2	96	Rediseño	Diseño	Pestañas bien diseñadas para la geometría	3	6	2	36
Soldadura defectuosa	Agujeros en la chapa	Desacoplamiento de chapas	Ninguno	8	8	2	128	Rediseño	Diseño	Garantizar acoplamientos	6	8	2	96
	Mala ejecución de la soldadura	Falta capacitación soldadores	Ninguno	8	8	4	256	Formación	RR,HH y supervisor	Formación y supervisión a los soldadores	5	6	3	90
Adriana Gómez Villoldo							http://asesordecalidad.blogspot.com							

Figura 16. Ejemplo de plantilla AMEF de un proceso de soldadura de una silla.

III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑOS MECÁNICOS CAD 3D

Los diseños mecánicos del equipo pirolizado (reactor y estructura de soporte con sistema de calentamiento integrado y cama refractaria móvil) fueron realizados en el software de diseño CAD 3D SolidWorks® versión 2020.

Las secciones que consta el diseño son:

- Reactor de trabajo.
- Porta-reactor. Sección de la estructura de soporte con movilidad y cama refractaria móvil integrada.
- Porta-condensador. Sección de la estructura de soporte donde se integrará (trabajo a futuro) el sistema de condensación de gases pirolíticos

Los diseños permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento del sistema. Por derechos de propiedad industrial y patentado, las dimensiones específicas del prototipo no son presentadas en el presente trabajo. Por lo que los diseños mecánicos solo se presentan en vistas isométricas y –a manera de referencia– en los dibujos técnicos del prototipo solo especifican dimensiones generales de largo x ancho x alto y/o diámetro (unidades en milímetros).

3.2 ACONDICIONAMIENTO DE REACTOR Y SECCIÓN PREFABRICADA DEL SISTEMA DE CONDENSACIÓN

3.2.1 Reactor de trabajo

Un tanque estacionario para contener gas LP de 100 L de capacidad en desuso fue habilitado como reactor de trabajo. El tanque es de una geometría convencional cilíndrica comercial completamente sellado, con estructuras de soportes integradas y con 4 conexiones de salida de fabricación de origen (2 anteriores de 3/8 y 1/2, 1 lateral de 1/2 y 1 posterior de 1/2). El tanque fue adquirido en un centro de reciclaje urbano, el cual estaba almacenado a granel, ver Figura 17. Ya en la institución sede del proyecto, se asignó un área de resguardo temporal, ver Figura 18.

3.2.2 Sección prefabricada del sistema de condensación

La sección denominada porta-condensador comprende el área de la estructura de soporte destinada para la instalación (trabajo a futuro) del sistema de condensación propuesto.

Por el alcance del proyecto, no se presentan especificaciones técnicas del sistema de condensación contemplado. Únicamente se presentan diseños conceptuales de la propuesta.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

La sección prefabricada del condensador fue obtenida en un trabajo previo reportado por Sánchez-Lezama, ver Figura 19.⁴⁰



Figura 17. Tanque de recycle empleado para el reactor: vista en el centro de reciclaje de adquisición.



Figura 18. Tanque de recycle empleado para el reactor: vista en área de resguardo previo a trabajos de manufactura.



Figura 19. Porta-condensador, sección de la estructura de soporte manufacturado por Sánchez-Lezama.⁴⁰

3.3 MANUFACTURA DEL EQUIPO PIROLIZADO

La manufactura del equipo pirolizado se llevó a cabo empleando máquinas de manufactura CNC especializadas y ejecutando operaciones manuales usando herramientas convencionales de corte, cizallado, perforación, desbaste, entre otros.

Para la manufactura del equipo, se emplearon máquinas como:

- Cortadora de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400, ver Figura 20.
- Torno CNC DMTG CKE 6150Z, ver Figura 21.
- Máquina soldadora de Micro alambre marca LINCOLN ELECTRIC.

Con base a los diseños mecánicos, empleando la maquinaria y herramientas de manufactura necesarias, se fabricó el equipo pirolizado donde (i) el reactor puede ser desmontable y cuenta con capacidad de inclinación para acciones de descarga, (ii) el porta-reactor se compone de una base fija a la que se acopla una base móvil; donde la parte móvil posee un eje de giro que le permite realizar un movimiento de tipo columpio; así mismo en esta estructura se integra una arquitectura refractaria con dimensiones adecuadas para alojar el reactor y coadyuvar a la preservación del calor de trabajo en el reactor y (iii) el porta-reactor y porta-condensador se integraron en una

unidad, es decir, la base obtenida por Sánchez-Lezama⁴⁰ se empleó de guía para establecer las dimensiones del resto del equipo pirolizado generado en este trabajo.

3.4 LISTADO DE MATERIALES, CUANTIFICACIÓN Y PRESUPUESTACIÓN

El material empleado para la manufactura del reactor, porta-reactor y el porta-condensador se presentan en la Tabla 2. Los materiales empleados fueron de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada, de acero al carbón comercial u otros. Los insumos se obtuvieron de centros especializados de distribución de materiales en acero y otros.

Adicionalmente en la Tabla 2, y a manera de referencia, se describe la cuantificación y presupuestación de los materiales empleando en el equipo pirolizado propuesto (precios aproximados, con IVA incluido y en moneda nacional). Ningún estudio de rentabilidad es realizado. Tampoco se considera el cálculo de los costos por mano de obra e impuestos aplicables.



Figura 20. Máquina de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400 (fuente: Martínez-Casillas).³³

3.5 APLICACIÓN AMEF Y QFD

Las herramientas de calidad en el diseño QFD y AMEF fueron aplicadas de acuerdo a las metodologías reportadas por Dale³⁵ y Evans & Lindsay³⁸ y AIAG³⁹, respectivamente.

3.5.1 Metodología empleada para elaborar el AMEF del equipo pirolizado

1. Selección del grupo de trabajo: el grupo de trabajo estará compuesto por personas las cuales poseen una aplica experiencia y conocimiento en el producto Y/o proceso objeto del AMEF ya que el objetivo principal será detectar los fallos en la manufactura de un reactor pirolítico.

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

2. Establecer el tipo de AMEF a realizar, su objetivo y límites: se establece un AMEF de diseño rápido con el objetivo de los fallos de diseño en la manufactura del equipo pirolizado. Como trabajo futuro, se sugiere realizar un análisis global o efectuar una subdivisión de cada proceso para definir varios AMEF.
3. Aclarar las prestaciones o funciones, del producto o del proceso analizado: con base en el diseño del AMEF establecido, se identifican los modos de fallo potenciales.
4. Determinar los modos de fallo: de cada función definida se identifican todos los posibles modos de fallo.
5. Determinar los efectos potenciales de fallo: identificar todas posibles consecuencias que puedan ocurrir durante la manufactura del equipo.
6. Determinar las causas potenciales de fallo para cada modo de fallo: identificar todas las posibles causas de fallo tanto directas como indirectas.
7. Identificar sistemas de control actuales: buscar los posibles controles de fallo que puedan servir para prevenirlos, tanto directamente como indirectamente.
8. Identificar los índices de evaluación de cada modo de fallo: índice de gravedad (G), índice de ocurrencia (O) e índice de detección (D). Para lo anterior, en las Tablas 3, 4 y 5 se especifican las rubricas de evaluación consideradas en este trabajo.
9. Calcular, para cada modo de fallo, los números de prioridad de riesgo (NPR): observar cuales son las áreas en las que se requiere una mejora relevante.



Figura 21. Torno CNC DMTG CKE 6150Z. (fuente: Martínez-Casillas).³³

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

Tabla 2. Cuantificación y presupuestación del equipo pirolizado.

SECCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	MONTO	OBSERVACIONES
Reactor	Recipiente cilíndrico (reciclado)	1 pza.	\$2,700.00	
	Taponos Hembra medidas 1/2	2 pzas.	\$60.00	
	Taponos Hembra medidas 3/8	1 pza.	\$30.00	
	Tomillos con tuerca med. 3/8 x 2"	10 pzas.	\$70.00	
	Placa lisa de acero 1/4 diámetro 0.485 m	1 pza.	\$443.74	Costo de lámina de 2.78 m ² = \$6,853.32 0.18 m ² de lámina empleada
Porta-reactor	Perfil PTR 2 x 2 cal. 14	13.6 m	\$1,841.66	Tramo de 6 m costo unitario de \$850.00
	Lamina antiderrapante cal 10 med. 0.64 x 0.7 m	1 pza.	\$348.09	Costo de lámina de 2.78 m ² = \$2,160.03 0.448 m ² de lámina empleada
	Eje con barreno 1 1/2	2 pzas.	\$50.00	Costo unitario \$25.00
	Chumacera de pared 2T UCFL205-16 1"	2 pzas.	\$464.58	Costo unitario \$232.29 En el monto se incluye el costo de mortero Didotec F-40 empleado (30 kg, \$1800.00)
	Placa acero 4140 1/2 med. 00.9 x 0.09 m	2 pzas.	\$52.47	Costo de lámina de 1.83 m ² = \$5,927.59 0.0081 m ² de lámina empleada
	Ladrillo refractario M-25 kg/cm ² med 9 x 4 1/2 x 2 1/2 "	40 pzas.	\$5,178.00	Costo unitario del ladrillo \$84.45 En el monto se incluye el costo de mortero Didotec F-40 empleado (30 kg, \$1800.00)
	Malacate con manivela 300 kg	1 pza.	\$600.00	Sin cable
	Resistencia eléctrica parrilla 9" acero inoxidable 220V 2500 W	1 pza.	\$1,604.00	En el costo se incluyen 5 m de cable térmico (\$204.00)
Porta-condensador	Perfil PTR 2 x 2 cal. 14	11 m	\$1,558.33	
	Lamina negra cal. 14 med. 0.255 x 0.21 m	2 pza.	\$44.58	Costo de lámina de 2.78 m ² = \$1,125.08 0.107 m ² de lámina empleada
	Lamina negra med. 0.37 x 0.235 m	1 pza.	\$33.33	0.08 m ² de lámina empleada
	Lamina negra med. 0.25 x 0.88 m	1 pza.	\$89.00	0.22 m ² de lámina empleada
TOTAL			\$15,167.78	IVA incluido

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

Tabla 3. Rubrica de evaluación de criterios de gravedad para AMEF.

CLASIFICACIÓN	CRITERIOS DE GRAVEDAD
10, 9 Muy alto	Origina insatisfacción de las especificaciones, se tendrá que realizar nuevamente la pieza o retrabajo.
8, 7 Alto	Causa retrabajo para cumplir las especificaciones.
6, 5 Moderado	Ocasiona un ligero retrabajo, sin embargo, entra dentro de las especificaciones.
4, 3 Bajo	No requiere ninguna acción inmediata ya que no tendría relevancia.
2, 1 Muy bajo	No requiere ninguna acción/retrabajo, cumple con las especificaciones requeridas.

Tabla 4. Rubrica de evaluación de criterios de ocurrencia para AMEF.

CLASIFICACIÓN	CRITERIOS DE OCURRENCIA
1 Poca probabilidad	Seria irrazonable esperar que se produjera un fallo.
2, 3 Baja probabilidad	Ocasionalmente podría producirse un fallo.
4, 5, 6 Moderada probabilidad	Se presentan fallos esporádicos.
7, 8 Alta probabilidad	Los fallos se presentan con frecuencia.
9, 10 Muy alta probabilidad	Se produce un fallo con total seguridad.

Tabla 5. Rubrica de evaluación de criterios de detección para AMEF.

CLASIFICACIÓN	CRITERIOS DE DETECCIÓN
1 Poca probabilidad	Total fiabilidad de los procesos.
2, 3 Baja probabilidad	Baja probabilidad de que el defecto logre ocurrir, ya que de ser así se detectaría en el proceso de manufactura.
4, 5, 6 Moderada probabilidad	EL producto defectuoso se presenta esporádicamente.
7, 8 Alta probabilidad	El producto defectuoso ocurre, esto debido a la falta de estandarización de procesos.
9, 10 Muy alta probabilidad	Este está latente y no se detectaría durante la manufactura, sino hasta la inspección final.

3.5.2 Metodología empleada para elaborar el QFD del equipo pirolizado

En entrevista con el cliente (MICRO REFINERÍA ECOLÓGICA S. DE R. L. DE C. V.) se determinaron los requerimientos del cliente:

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

1. Lista de los QUE's

Para la manufactura del equipo pirolizado se busca los siguiente aspectos:

- Que tenga movilidad para una descarga de residuos facil.
- Que tenga un precio accesible de manufactura.
- Que tenga facil manipulacion para la carga de materia prima, descarga de residuos, puesta en operación del equipo.
- Que tenga rendimiento térmico para optimizar el calor generado por el sistema de calentamiento propuesto.
- Que tenga alta cantidad de carbonizacion de la materia prima y por ende recuperacion de alta cantidad de combustible líquido recuperado a partir de la condensacion de los gases piroliticos.
- Que tenga gran capacidad de operación donde las cargas sean a un 90% de capacidad del equipo.
- Que tenga eficiencia con un porcentaje de conversion de residuos a combustible líquido por arriba del 60%.
- Que tenga versatilidad en materia prima para poder operar con diversos tipos de residuos plasticos.
- Que tenga facil mantenimiento para alargar el tiempo de vida util del sistema.
- Que tenga funcionamiento seguro donde no represente riesgo alguno para el operador como las instalaciones por ser un equipo sujeto a presion.

2. Listado de los COMO's

Establecido los QUE's especificados por el cliente, se definen los requisitos técnicos necesarios para cumplimiento de los mismos, siendo:

- Diseño: de facil manipulacion y mantenimiento.
- Automatizacion: con controles de tiempos de operación y registro de variables de operación.
- Tecnologia: capacidad de modificarse para poder operarse en modo semicontinuo o continuo.
- Tamaño y forma del horno: capacidad de escalamiento a nivel industrial.
- Eficiencia del sistema: de facil recuperacion de productos liquidos.
- Material del reactor: emplear materiales mas economicos pero de resistencia comprobada acorde al proceso.
- Metodo de limpieza del reactor: de facil manipulacion para optimizar los tiempos de oepracion.
- Temperatura: sin perdidas de calor por transferencia al ambiente.
- Rendimiento: rendimientos de coversion de materia prima a combustible liquido por encima del 60%.
- Tamaño de materia prima: capacidad de operación con diferente tamaño de particula.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑOS CAD 3D

De las Figuras 22 a la 30 se presentan diversas vistas de los diseños mecánicos del equipo pirolizado. Por derechos de propiedad intelectual y patentado, los diseños se presentan en vistas isométricas sin dimensionado. En la Figura 31, se muestra el concepto del equipo con un sistema de condensación de bajo volumen elaborado por el propio autor en un trabajo previo.⁴¹

En el Anexo 1, se muestran los dibujos técnicos del sistema con algunas cotas (expresadas en mm) generales de referencia, las cuales son de dominio público.

Los diseños permitieron validar las dimensiones de los tipos de materiales requeridos y el funcionamiento del equipo.

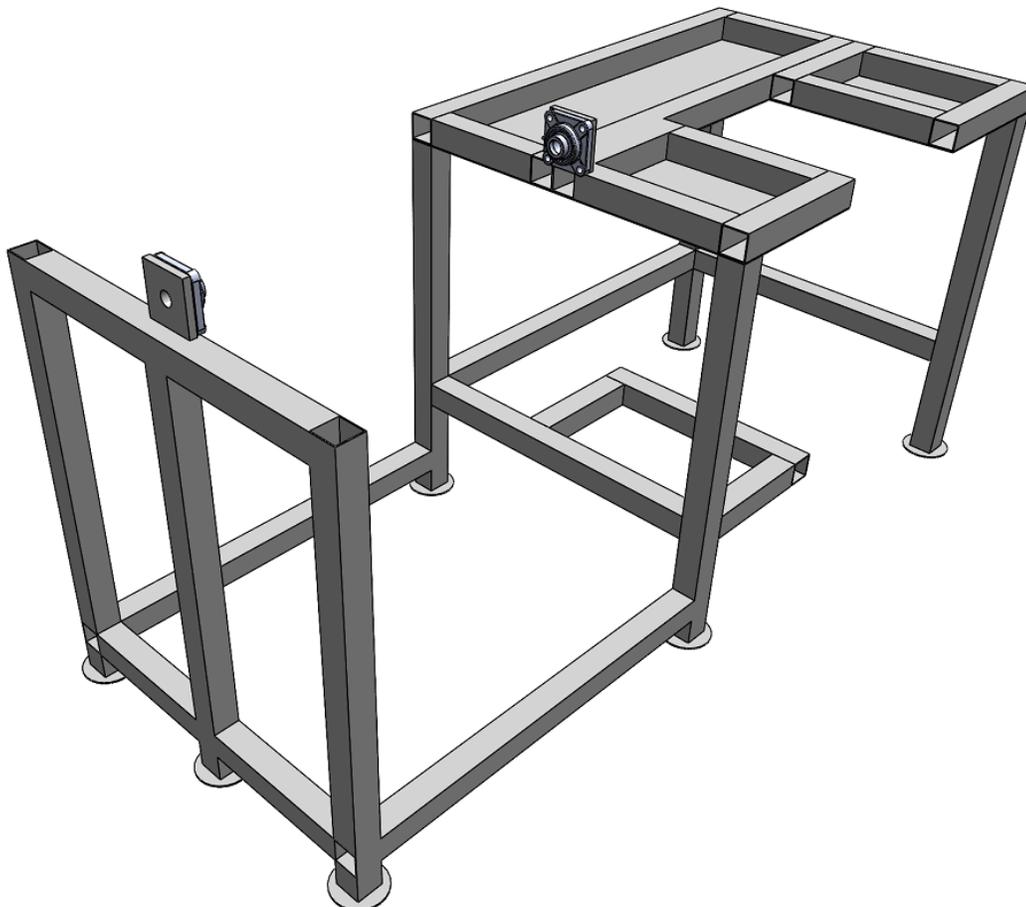


Figura 22. Vista de la estructura de soporte principal con el porta-condensador integrado, pero sin el porta-reactor.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

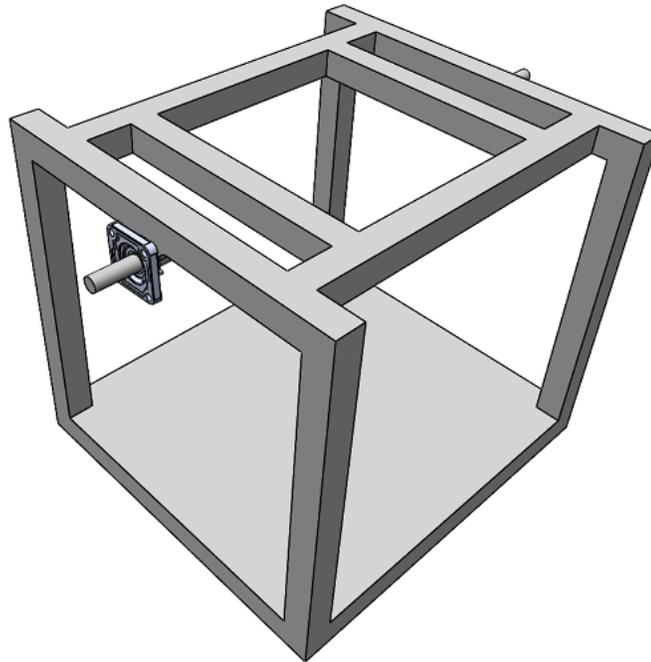


Figura 23. Vista de la estructura de soporte del porta-reactor.

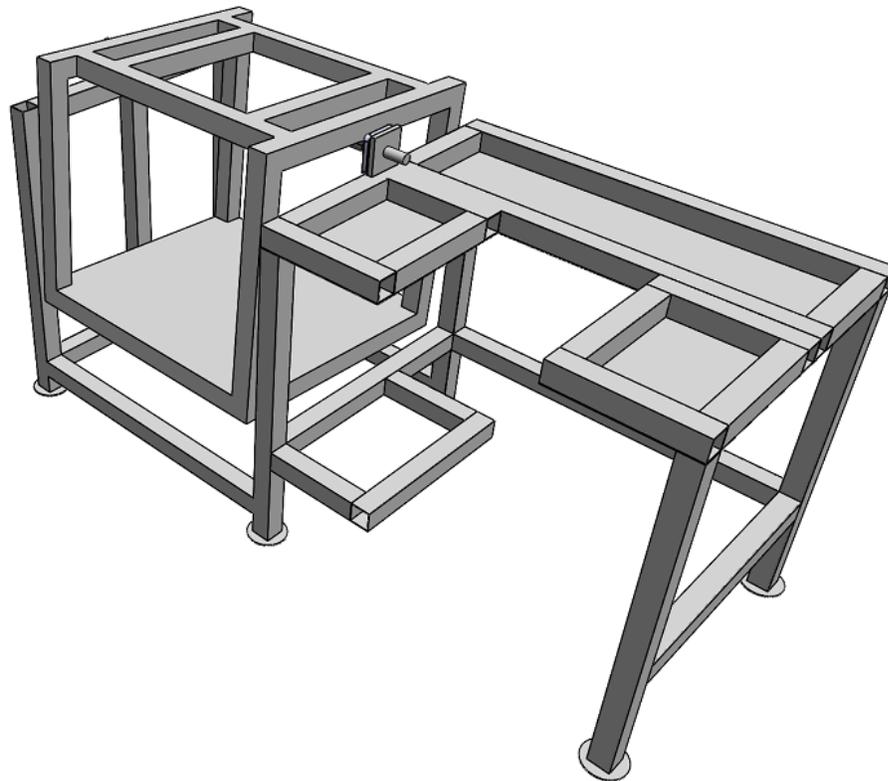


Figura 24. Vista de la estructura de soporte completa con el porta-reactor y porta-condensador integrados.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

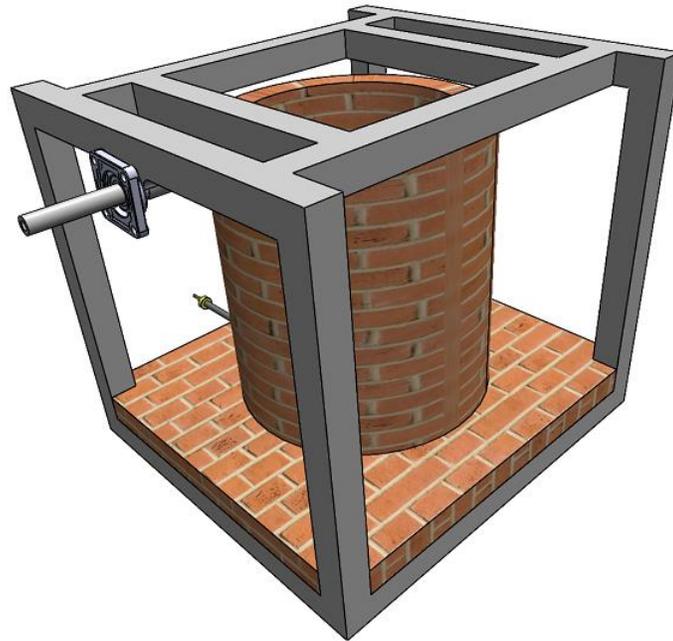


Figura 25. Vista del porta-reactor con la cama refractaria.

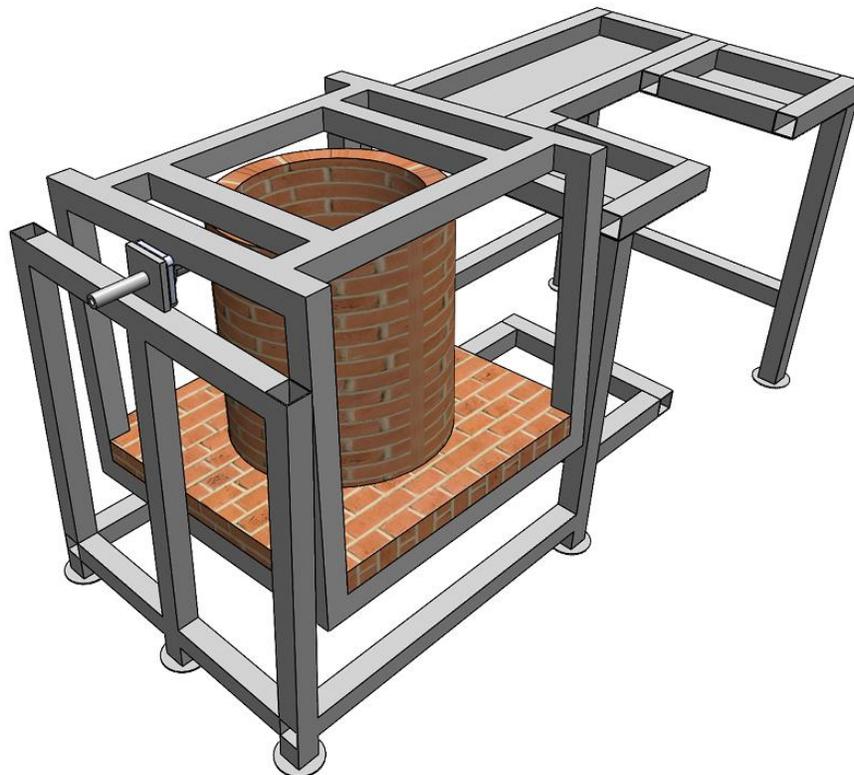


Figura 26. Vista completa de la estructura con el porta-reactor, porta-condensador y revestimiento refractario.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

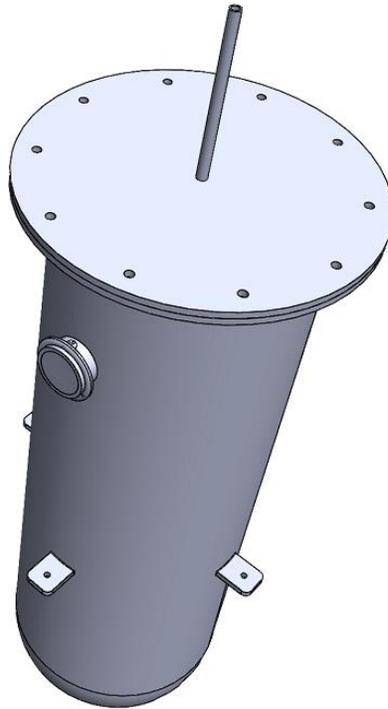


Figura 27. Diagrama del reactor de estudio propuesto con tapa de cierre hermético.

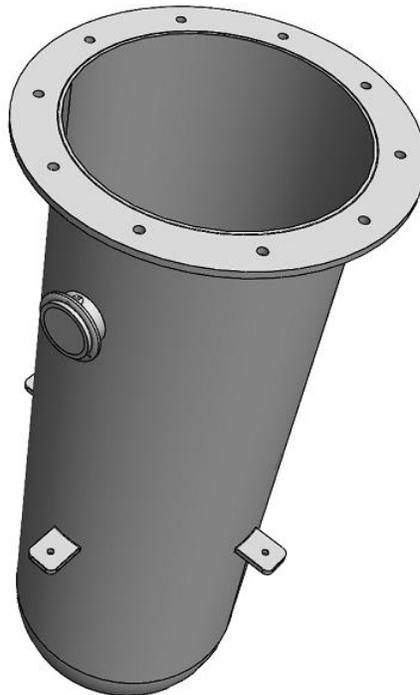


Figura 28. Diagrama del reactor de estudio propuesto sin la tapa de cierre hermético.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

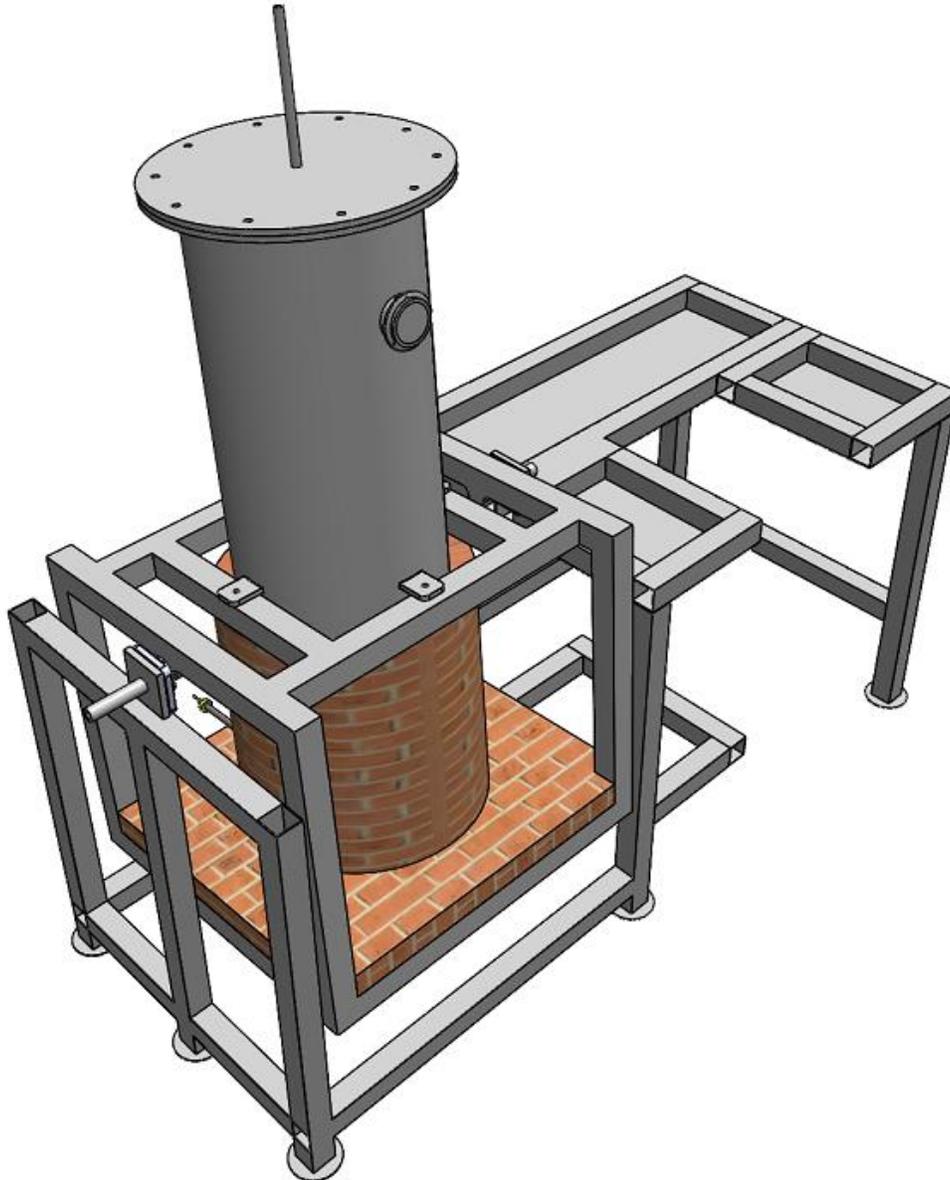


Figura 29. Vista completa del equipo pirolizado: escala de grises.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

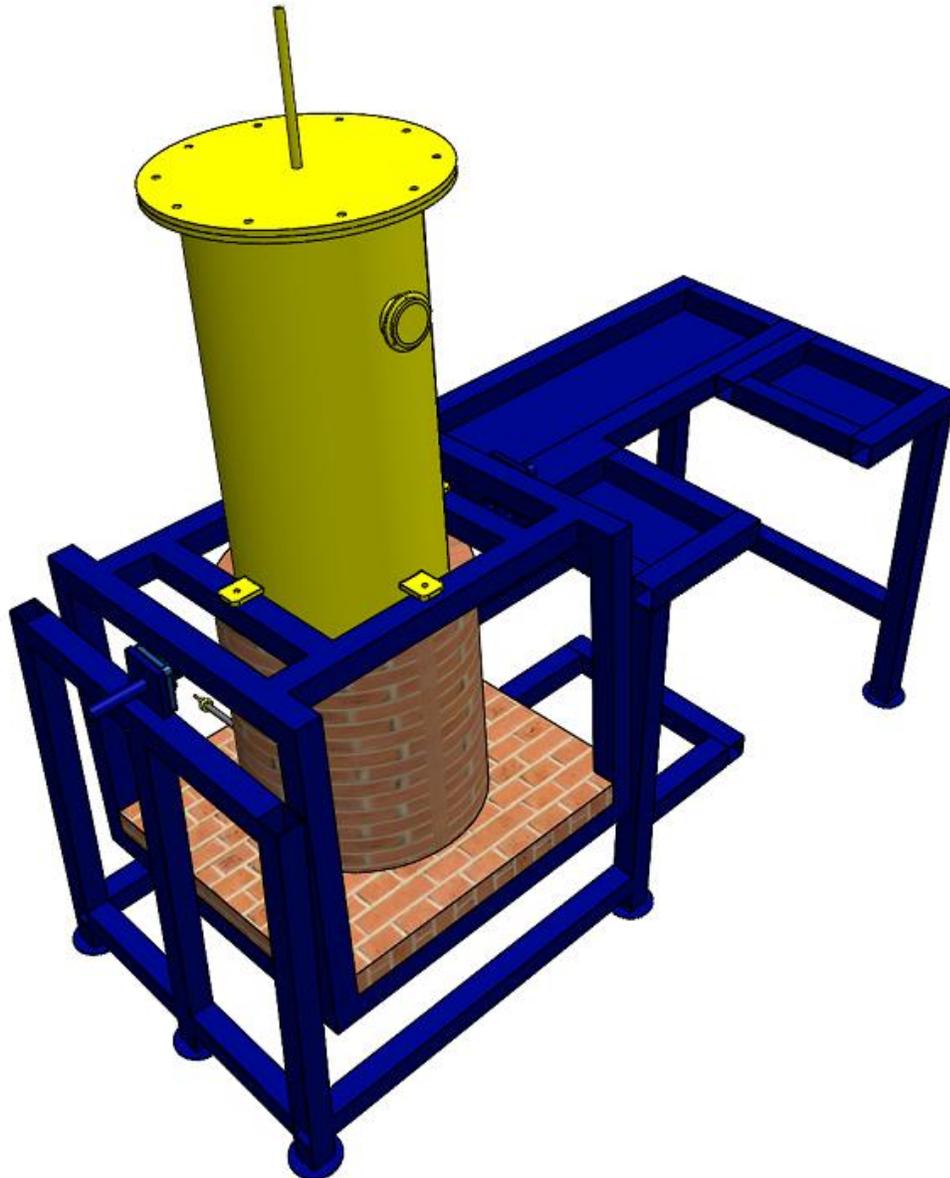


Figura 30. Vista completa del equipo pirolizado: acabado final.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

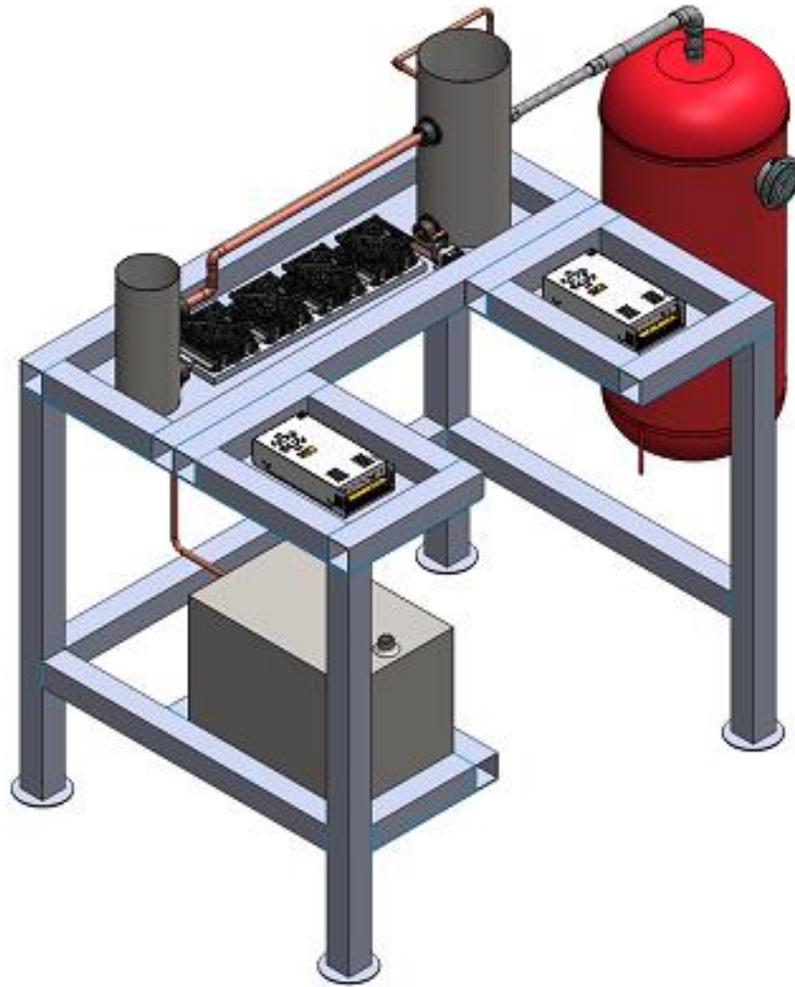


Figura 31. Concepto de un sistema de condensación comunicado con el reactor pirolítico.⁴¹

4.2 MANUFACTURA DEL EQUIPO PIROLIZADO

Aplicando las diversas técnicas de manufactura seleccionadas, se logró la construcción del equipo pirolizado. La validación del equipo se estableció en el comportamiento mecánico del equipo bajo lo siguiente:

- a. Capacidad de poder otorgar grados de inclinación al porta-reactor.
- b. Libre de desprendimiento de la arquitectura refractaria.
- c. Libre rotación de los ejes de giro.
- d. Estabilidad de la estructura de soporte.
- e. Ensamble libre del reactor en la cama móvil refractaria.
- f. Funcionamiento de la resistencia eléctrica.

De las Figuras 32 a la 40, se presentan algunas evidencias del desarrollo de manufactura del equipo. De las Figuras 41 a la 45, se muestran evidencias del equipo concluido con su acabado final.



Figura 32. Inicio de trabajos de acondicionamiento de reactor.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 33. Construcción de porta-reactor.



Figura 34. Operación de cortadora de plasma para construcción de tapa.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 35. Operación de torneado de ejes de giro del porta-reactor.

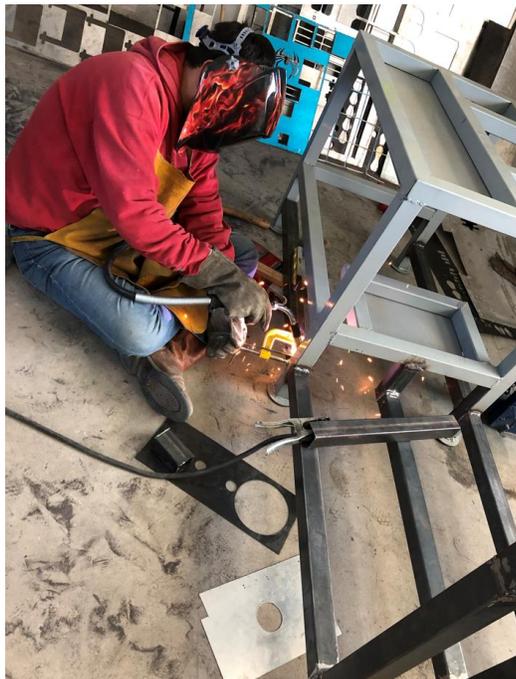


Figura 36. Unión de porta-reactor con porta-condensador.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 37. Porta-reactor y porta-condensador integrados (antes del acabado final).



Figura 38. Montaje de cama refractaria: aislante cerámico inferior.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 39. Montaje de cama refractaria: ladrillo refractario.



Figura 40. Trabajos de acabado final.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 41. Equipo pirolizado concluido: vista 1, inclinación perpendicular.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 42. Equipo pirolizado concluido: vista 2, inclinación perpendicular.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 43. Equipo pirolizado concluido: vista 3.



Figura 44. Equipo pirolizado concluido: vista 4.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 45. Equipo pirolizado concluido: vista 5.



Figura 46. Equipo pirolizado concluido: vista 6.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 47. Equipo pirolizado concluido: vista 1, inclinación 45°.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 48. Equipo pirolizado concluido: vista 2, inclinación 45°.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil



Figura 49. Acercamiento zona de hospedaje de resistencia eléctrica.



Figura 50. Acercamiento eje de giro del porta-reactor.

4.3 ANÁLISIS AMEF Y QFD

4.3.1 Resultados AMEF

En la Tabla 6, se presenta la plantilla AMEF del diseño del equipo pirolizado. Mediante esta herramienta se evaluó el proceso de manufactura y se identificó dónde y cómo puede fallar.

Tabla 6. Análisis AMEF del diseño de equipo pirolizado.

PROCESO / PROCEDIMIENTO / ACTIVIDAD	MODO DE FALLA POTENCIAL	EFEECTO POTENCIAL	⊖	CAUSAS POTENCIALES	○	⊕	NPR
Rediseño de la mesa	Soldadura defectuosa	Retrabajo	8	Mala capacitación del personal	3	8	192
	Mediciones erróneas	Perdida de material	10	Mal uso de las herramientas de medición	1	3	30
	Material mal cortado	Retrabajo y posiblemente perdida de material	10	Mal uso de la herramienta Y/o mal nivelación del material, lo que provoca un mal corte	4	9	360
	Falta de soldadura	Los soportes no quedan fijos correctamente	10	Presión del gas no adecuada, velocidad de aplicación de la soldadura es demasiado rápido	2	8	160
	Mal nivelación de las extensiones	Retrabajo e incumplimiento con los requerimientos establecidos	6	Mala capacitación del personal	7	3	126
	Mala aplicación de la pintura	Retrabajo	4	Malos hábitos de higiene en maquinaria	2	3	24
Rediseño de reactor	Corte	Se realiza retrabajo para rectificar los cortes	5	Falta de herramienta especializada para corte recto (uniforme)	6	8	240
	Mala aplicación de la pintura	Retrabajo	5	Malos hábitos de higiene en maquinaria	2	3	30
	Instalación de soportes	Incumplimiento de los requerimientos y rechazo	6	Diseños erróneos	3	3	54
	Instalación de aros en tapa y reactor	Falta de cumplimiento en los requerimientos. Mala adherencia de la soldadura lo que provocaría fugas	10	Mal manejo de la soldadura y regulación del gas	6	10	600
Soporte para chumaceras	Corte de placas	Mal configuración de la máquina, lo que genera desecho de material	5	Colocación erróneamente de los parámetros de corte. Falta de presión de aire por parte del compresor.	3	2	30

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

	Instalación de placas de soporte	Nivelación inadecuada lo que provoca retrabajo	5	Mal uso de las herramientas de nivelación. Espacio de trabajo reducido. Tipo de material no sea el adecuado	8	3	120
	Instalación de nervios	Mala sujeción con la mesa y soporte	4	La soldadura no se aplica correctamente o el nervio no cumple con los requerimientos	4	3	48
Instalación de chumaceras	Mal Sujeción de tornillos	La chumacera será inestable lo que provocaría daños en los ejes	7	Falta de un torquimetro para verificar la instalación	1	3	21
	Tornillos no adecuados	La chumacera podría desprenderse de su lugar	6	Estudio de soporte de tensión	5	7	210
Manufactura de base para horno móvil	Mal corte del material	El material no es recto lo que provoca una mala nivelación	10	Mal uso de las herramientas de corte	9	5	450
	Mal nivelación	La base no queda centrada en su lugar ya que no podría moverse	8	Mal uso de las herramientas de nivelación.	8	4	256
	Mal aplicación de soldadura	Desprendimiento de algún segmento de la base	10	Mala regulación de gas, y aplicación de la soldadura demasiado rápido	7	4	280
Diseño de ejes	Falta de experiencia	Rechazo de pieza por incumplimiento de requisitos establecidos	6	Falta de capacitación en el uso de software de diseño	2	3	36
	Malas mediciones	Retrabajo	5	Mal uso de las herramientas	8	5	200
Maquinado de ejes	Falta de experiencia en el manejo del torno	Mal estado de la pieza lo que provoco retrabajo	8	Falta de capacitación en el manejo de la maquinaria	2	2	32
	Mal estado de la maquinaria	Riesgo para el operario y posiblemente mal terminado de la pieza	10	Malos hábitos de higiene y seguridad	9	10	900
	Mal Posicionamiento del cero pieza	Las dimensiones de las piezas son erróneas	4	Falta de capacitación en el uso de punzón	8	9	288
Instalación de ejes	Mala aplicación de la soldadura	Fracturación de la pieza	6	Falta de capacitación en el uso de la soldadura, mal regulación de el gas, aplicación de la soldadura demasiado rápido o demasiado lento	7	3	126
	Malas mediciones	No se centra bien la base y las dimensiones de la pieza son erróneas lo que genera perdida de la misma y retrabajo	7	Mal uso de las herramientas	7	5	245

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

	Nivelación no apropiada	Mal rotación de los mismos	7	Mal uso de las herramientas	7	5	245
Instalación de base para horno móvil	Malas mediciones	La base no tendrá un movimiento fluido	6	Mal uso de las herramientas	6	5	180
	Mala nivelación	Mal sujeción de los ejes con la base	6	Mal uso de las herramientas	8	4	192
Construcción de horno	Mal preparación del pega pisó	La adherencia no es la adecuada y los ladrillos podrían desprenderse	10	Falta de capacitación Incumplimiento de los requerimientos del proveedor	1	3	30
	El ladrillo defectuoso	Mal adherencia del ladrillo	3	Falta de conocimiento por parte del operador	1	2	6
	Mal colocación del ladrillo	El horno podría presentar un mal funcionamiento	3	Falta de capacitación	9	3	81

A partir de la información anterior y una vez obtenidos los valores de los números de prioridad de riesgo (NPR), se realiza un análisis y se detectaron 3 modos de fallas prioritarios, los cuales representan los principales focos de riesgo potenciales en el proceso de producción, ver Tabla 7.

Se sugiere que estos 3 modos de falla son causados principalmente por el mal uso de las herramientas de trabajo, lo que genera una mala calidad del producto y un retrabajo excesivo por parte de los operadores, en particular: (1) en el proceso de rediseño del equipo pirolizado se obtuvo un NPR de 600, se atribuye este indicador a que el operador desconoce las propiedades físico-técnicas precisas de la materia prima empleada; conocer la composición del material podría permitir configurar adecuadamente la máquina de soldadura; adicional a lo anterior, la escases y/o mala calidad de los gases de protección utilizados durante las operaciones de soldadura contribuyeron a este indicador de riesgo, (2) en el proceso de la manufactura del porta-reactor (que incluye la cama refractaria móvil y el reactor de trabajo) se obtuvo un NPR de 450, aunque este es un valor no muy significativo en comparación a los otros dos indicadores, se considera por la relación que guarda este fallo ya que se sugiere que este indicador también es atribuido a la operación deficiente de las herramientas durante las operaciones de manufactura y (3) en el proceso de maquinado de los ejes se obtuvo el NPR más alto, siendo este de 900, donde se atribuye este modo de falla a una falta de mantenimiento del torno CNC (manguera de refrigerante con fugas lo que provoca un calentamiento excesivo en el cortador) generando un mal maquinado y hasta daños en los cortadores empleados.

En concreto, los principales focos de riesgo se atribuyen a la falta de competencias del operador en el conocimiento de las propiedades de los materiales y el manejo de herramientas de operación manual, principalmente de soldadura. A manera de propuesta se sugieren las siguientes acciones para reducir o eliminar estos tres principales focos de riesgo:

- Realizar una investigación bibliográfica exhaustiva sobre las propiedades de los materiales para identificar el mejor método o técnica de soldadura a emplear.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

- Recibir capacitación en el manejo de las herramientas de manufactura de operación manual para realizar las mejores prácticas de fabricación (evitar daño a las herramientas y/o alarga la vida útil de los insumos). Aunado a lo anterior, incluir conceptos de seguridad e higiene industrial.
- Recibir capacitación especializada sobre técnicas de mantenimiento a equipo de manufactura avanzada CNC para coadyuvar a disminuir las deficiencias de maquinado por fallas de operación en este tipo de maquinaria.

Tabla 7. Resumen del análisis AMEF: 3 principales fallos detectados.

PROCESO / PROCEDIMIENTO / ACTIVIDAD	MODO DE FALLA POTENCIAL	EFEECTO POTENCIAL	U	CAUSAS POTENCIALES	O	D	NPR
Maquinado de los ejes	Mal estado de la maquinaria	Riesgo para el operario y posiblemente mal terminado de la pieza	10	Malos hábitos de higiene y seguridad	9	10	900
Rediseño del reactor	Instalación de aros en tapa y reactor	Falta de cumplimiento en los requerimientos. Mala adherencia de la soldadura lo que provocaría fugas	10	Mal manejo de la soldadura y regulación del gas	6	10	600
Manufactura para base de horno móvil	Mal corte del material	El material no es recto lo que provoca una mala nivelación	10	Mal uso de las herramientas de corte	9	5	450

4.3.2 Resultados QFD

El análisis QFD sobre el diseño del equipo pirolizado se presenta en la Tabla 8 y en la Figura 51.

Los resultados sugieren que son 3 los factores de relevancia que solicita el cliente: (1) eficiencia del sistema con un buen funcionamiento operativo, (2) buen rendimiento de conversión y (3) buen diseño de tamaño y volumen.

Para solventar estos 3 factores se debería de invertir tiempo y dinero para acercarlos a los requerimientos ideales del cliente.

Tabla 8. Tabla de resultados del QFD aplicado.

Requerimientos (QUE's)	Valor	COMO's									
		Diseño	Automatización	Tecnología	Tamaño y forma del horno	Eficiencia del sistema	Material del reactor	Método de limpieza del reactor	Temperatura	Rendimiento	Tamaño de materia prima
Movilidad de descarga	5	9			3		1	1			9
Precio accesible	4	1	3	3	3	9	3			3	3
Fácil manipulación	7	9	1	1	9		3				3
Rendimiento térmico	8	3		3	9	9	9	1	9	9	3
Cantidad de carbonización y cantidad de líquido recuperado	10	1		3	3	9	3	1	3	9	
Capacidad de operación	8	3				3	1			3	9
Eficiencia de conversión	8	3	1	3	3	9	9	1	9	9	1
Versatilidad en materia prima	7	1				9	3	3	3	1	
Fácil mantenimiento	5	9			3	3	3	9	3	1	3
Funcionamiento seguro	9	9	3	3	3	9	3	3	9	9	
Calculo abs		327	54	124	258	453	283	124	291	363	197
Importancia relativa %		13%	2%	5%	10%	18%	11%	5%	12%	15%	8%

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

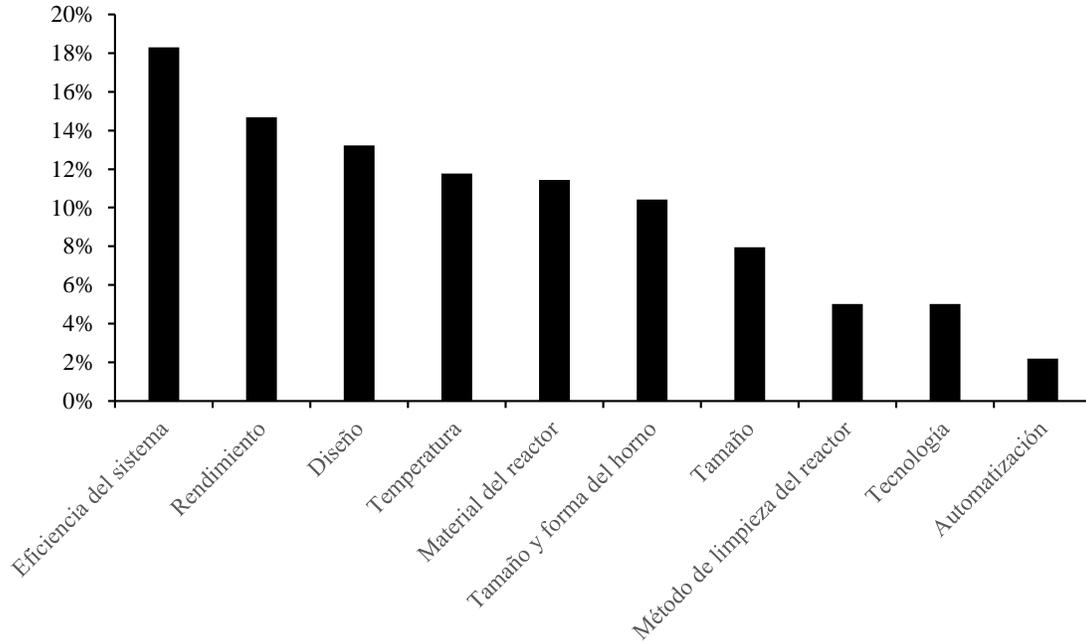


Figura 51. Grafica de COMO's vs importancia relativa (%).

V. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista operativo y de manufactura, se logró el diseño y la construcción del equipo pirolizado. Diversas actividades de manufactura fueron ejecutadas para lograr el diseño y construcción de un equipo pirolizado consistente de un reactor de 100 L de capacidad y una estructura de soporte de 2 secciones (porta-reactor y porta-condensador) con cama refractaria móvil y sistema de calentamiento. Las operaciones de manufactura consistieron en (1) elaborar los diseños mecánicos 3D del equipo para su posterior fabricación empleando materiales de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada y (2) la construcción del prototipo empleando maquinaria CNC y herramientas de operación manual.

El costo de producción del equipo se estima en \$15,167.78 (IVA incluido, moneda nacional) sin considerar los costos de mano de obra, impuestos aplicables y depreciaciones.

La estructura de soporte cuenta con una arquitectura refractaria y un sistema de calentamiento integrado, así como ejes de giro que permiten otorgar ángulos de inclinación al reactor para las operaciones de descarga.

Asimismo, se aplicaron técnicas de calidad del proceso para evaluación del equipo pirolizado.

El análisis AMEF indica que los principales focos de riesgo se atribuyen a la falta de competencias del operador para el manejo de herramientas manuales de manufactura, así como también al desconocimiento de las propiedades de los materiales de construcción seleccionados. En general, la actividad de soldadura fue la que más contribuyó a los fallos detectados. Se sugiere solventar estos factores por medio de capacitación al operador (trabajo a futuro).

El estudio QFD sugiere que fueron 3 los factores de relevancia que solicita el cliente: la eficiencia del sistema con un buen funcionamiento, un buen rendimiento de conversión y un buen diseño de tamaño y volumen. Para solventarlos se sugiere realizar más inversiones de tiempo y dinero para lograr la satisfacción del cliente (trabajo a futuro).

Bajo los logros obtenidos, se puede indicar que se cumple con la hipótesis de diseñar y manufactura un equipo pirolizado debido a que las fallas de diseño y de producto son atribuibles al operador más que al equipo y si se cumplen con varios requerimientos del cliente.

Como trabajo a futuro, se considera solventar los análisis de diseño de calidad, así como aplicar un diseño experimental para validar la puesta en operación del sistema. De igual manera se sugiere elaborar un estudio de rentabilidad y de mercado que coadyuve a validar la capacidad del sistema de ser económicamente sustentable y/o amigable con el ambiente.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Vázquez-Morillas, A., Espinosa-Valdemar, R. Ma., Beltrán-Villavicencio, M. & Velasco-Pérez, M. (s. f.). El reciclaje de plásticos. Recuperado de http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf
- (2) Bolaños-Zea, J. J. G. (2019). *Reciclado de plástico PET* (Tesis de Licenciatura). Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú.
- (3) EcoPlas (jun 2019). *Economía Circular, una oportunidad para los plásticos*. Publicación No. 51, Publicaciones de EcoPlas: Argentina.
- (4) Méndez-Prieto, A. (1 ago 2020). *Reciclado químico: una alternativa de valor dentro de la economía circular de los plásticos*. Recuperado de <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-alternativa-de-valor-dentro-de-la-economia-circular-de-los-plasticos>.
- (5) Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T. & Espinosa, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 23(1), 53-59. DOI:10.17163/lgr.n23.2016.06
- (6) Beltrán-Barrera, A. G. & Rojas-Reyes, I. R. (2014). *Diseño y montaje de un reactor de pirólisis a escala laboratorio para el tratamiento de biomasa vegetal residual procedente de plazas de mercado de Bucaramanga* (Tesis de Licenciatura). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- (7) Afanasjeva, N., Castillo, Luis-C. & Sinisterra, J.-C. (2018). Biomasa lignocelulósica. Parte II: tendencias en la pirólisis de biomasa. *Journal of Science with Technological Applications*, 5, 4-22.
- (8) Conesa, J. A. & Montesinos, R. F. (2001). *Reactores Heterogéneos*. Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante.
- (9) Bermeo-Tene, G. A. & Córdova-Balcázar, B. E. (2014). *Diseño de un reactor de pirólisis de combustión lenta con una capacidad de 10 kg a escala laboratorio para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- (10) Guevara-García, C. G. & Pablo-Espinosa, M. A. (2016). *Diseño de un reactor de pirólisis experimental para pruebas de biomasa agroforestal* (Tesis de Licenciatura). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- (11) Hernández-Contreras, L. F. & Guerra-Miranda, J. D. (2020). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de carbón activado utilizando grano de caucho reciclado-GCR "un análisis experimental"* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

- (12) Obando, G. A. (2015). *Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS)* (Tesis de Maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- (13) Vargas-Espinoza, J. C. (2019). *Diseño de un reactor para pirólisis de biomasa residual: raquis de banano y tallo de rosas* (Tesis de Licenciatura). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- (14) Toaza-Iza, J. A. (2021). *Diseño de un reactor de pirólisis para la valoración energética de residuos prehospituarios* (Tesis de Licenciatura). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- (15) Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). Sistemas de tratamiento: tratamientos térmicos. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/VALORIZACION-ENERGETICA-TRATAMIENTOS-TERMICOS-Introduccion.aspx>
- (16) Romo-Millares, C. A. (2015). Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (RSU). *Tendencia tecnológica*, boletín IIE abril-junio, 73-79.
- (17) Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). Sistemas de tratamiento: tratamientos térmicos. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirolisis.aspx>
- (18) Eres Medio Ambiente. (s. f.). Pirólisis: Qué es, tipos y proceso pirolítico. Recuperado de <https://eresmedioambiente.com/pirolisis-que-es-tipos-y-proceso-pirolitico/>
- (19) CEUPE magazine. (s. f.). ¿Qué es la pirólisis?. Recuperado de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>
- (20) Baray-Guerrero, M. del-R., Porrás-Flores, D. A., Hoffmann-Esteves, H. E. & Manjarrez-Dominguez, C. B. (2019). Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirólisis lenta y a baja temperatura para la producción de combustibles. *Revista de Energías Renovables*, 3(9), 1-9.
- (21) Simbel, J. (s. f.) Gas Rico Gas Rico. Academia: resumen del trabajo de Lesme, P. R. Pirólisis de biomasa, experiencias y aplicaciones, CEEFE. Recuperado de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34168962/PirolisisBiomasa-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1649041443&Signature=SlyzREWrIH7DCuNCyeSf~CAV3EApm6R9c~TRAx4BF0JDyIPHZcw0~wTVrJE4kDr175ZIMA1QcqsWjiF5Z-JPcxGJpiGPIVcb05boYjQQ6xGfW82FSfUHppTNL-i~nyTbQofZNefsRQD89z~Fq7ICDMY9zp-b-Djl~DgwOJ1587NZ7zwVM~QiZdclk-TFZxuneSAcb-bg4JIA8T0xGSOaJ5vM1RbfjciHtyWYOD2q5vTJR27OaeGnCls2vuUt~kT14N1~G-qjmS7Za4TieFgszkfmA0dA4~ydtC3LPtNT6tR-S5kIjjePd~OGW3jV4tIZtEow3syIL3W~9vVW5daajw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- (22) Urien-Pinedo, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- (23) Zwebe, D. (2010). Comercialización de la tecnología de pirólisis. *PALMAS*, 31, 110-114.

- (24) Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista Química PUCP*, 26, 37-40.
- (25) Díaz-del C. R., F. (2012). *Lecturas de Ingeniería 21: conformado de materiales plásticos*. Universidad Nacional Autónoma de México, FES-Cuautitlán, p83.
- (26) ECODES. (s. f.). Contaminación por plásticos. Uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI. Recuperado de <https://ecodes.org/hacemos/cultura-para-la-sostenibilidad/salud-y-medioambiente/observatorio-de-salud-y-medio-ambiente/contaminacion-por-plasticos-uno-de-los-mayores-desafios-ambientales-del-siglo-xxi>
- (27) Conesa-Ferrer. (1996). *Estudio de la pirólisis de residuos de plásticos de polietileno y neumáticos usados*. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, Alicante, España.
- (28) Energía 12. (28 mar 2012). Obtención de Diésel a partir de residuos plásticos parte 1 y 2. Recuperado de <https://energia12.com/2012/03/28/obtencion-diesel-a-partir-de-residuos-plasticos/>
- (29) Corporación OIKOS. (2000). *Manual de reciclaje de plásticos*. Ecuador: Editorial Quito.
- (30) Scheirs, J. & Kaminsky, W. (2006). *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels*. Gran Bretaña: Editorial John Wiley & Sons, Ltd.
- (31) Lee, D. S., Sharabi, M., Jefferson-Loveday, R., Pickering, S. J., Poliakoff, M. & George, M. W. (2020). Scalable continuous vortex reactor for gram to kilo scale for UV and visible Photochemistry. *Organic Process Research & Development*, 24(2), 201-206. DOI: 10.1021/acs.oprd.9b00475.
- (32) Groover, M. P. (2014). *Introducción a los procesos de manufactura*. (traducción 1a Edición). Editorial: McGraw-Hill/Interamericana Editores S. A. de C. V.
- (33) Martínez-Casillas, F. J. (2021). Sistema de concentración solar: diseño, construcción y modelación de un colector solar cilíndrico parabólico previsto para movimiento de un solo eje. (Tesis de Licenciatura). Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
- (34) Barbosa-Moreno, A. Mar-Orozco, C. E. & Molar-Orozco, J. F. (2019). *Manufactura: conceptos y aplicaciones*. Grupo Editorial Patria. Recuperado de eLibro.net.
- (35) Dale, B. G. (1999, 2003). *Managing quality*. (4ta edición). Alemania: Editorial Blackwell Publishing, LTD.
- (36) Torcuato-Castillo, V. M. (s. f.). La casa de calidad. Recuperado de <https://mejoradela calidad-victorcuato.weebly.com/67-la-casa-de-la-calidad.html>
- (37) GEO tutoriales. (06 feb 2015). Que es la función de despliegue de la calidad (QFD) o casa de la calidad. Recuperado de <https://www.gestiondeoperaciones.net/gestion-de-calidad/que-es-la-funcion-de-despliegue-de-la-calidad-qfd-o-casa-de-la-calidad/>
- (38) Evans, J. R. & Lindsay, W. M. (2015). *Administración y control de la calidad*. (9na edición). México: Editorial Cengage Learning Editores, S. A. de C. V.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

- (39) Automotive Industry Action Group (AIAG). (2008). *Análisis de modos y efectos de fallas potenciales: manual de referencia*. (4ta edición, traducción). USA: Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.
- (40) Sánchez-Lezama, C. (jun 2021). Análisis del costo de reingeniería de manufactura de un prototipo de reactor pirolítico de baja escala. (Reporte de residencia). Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
- (41) Torres-López, D. (diciembre de 2021). *Estudio de la eficiencia de una propuesta de quemador eléctrico y condensador termoeléctrico para un prototipo de reactor pirolítico de plásticos*. (Reporte de Residencia Profesional). TecNM campus Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. p94.

ANEXO 1

Dibujos técnicos del equipo pirolizado

Medidas expresadas en mm.

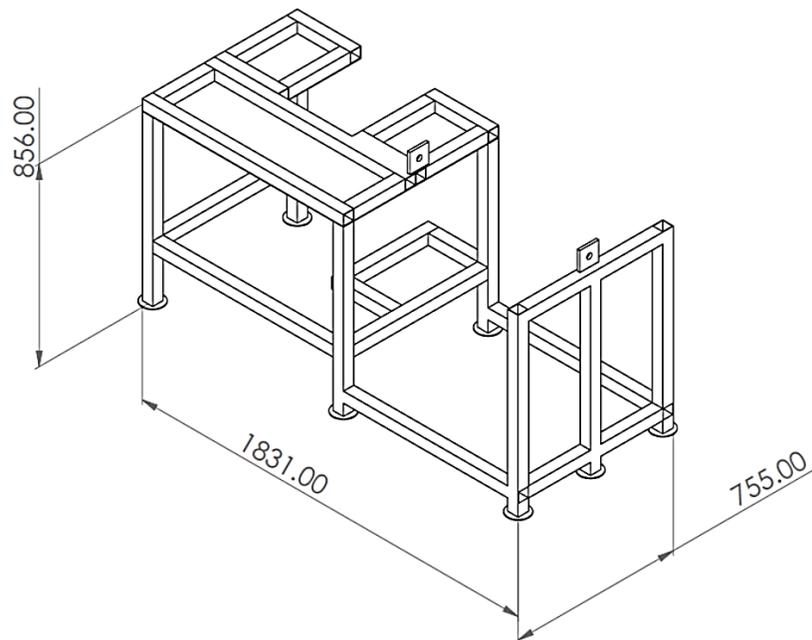


Figura 52. Estructura de soporte integrada (porta-condensador y porta-reactor) sin la cama móvil.

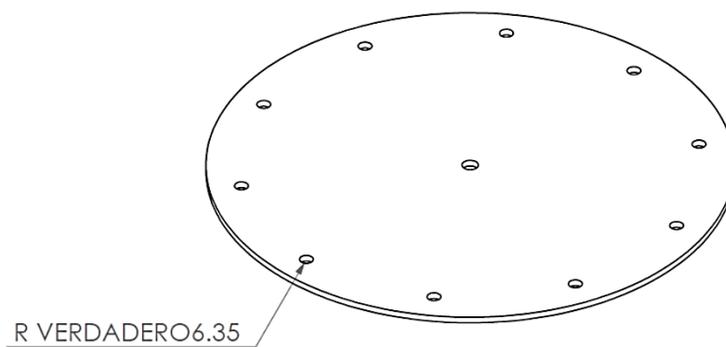


Figura 53. Tapa de reactor.

Ingeniería Industrial

Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil

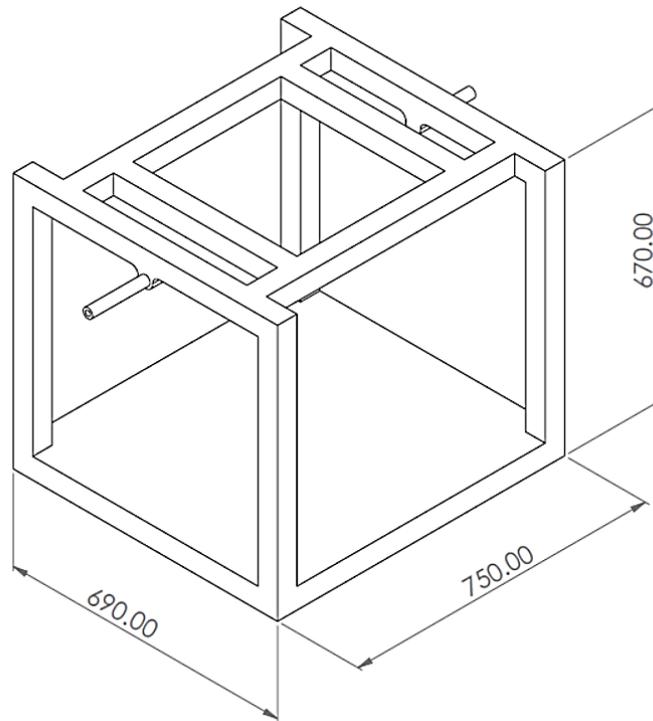


Figura 54. Cama móvil del porta-reactor.

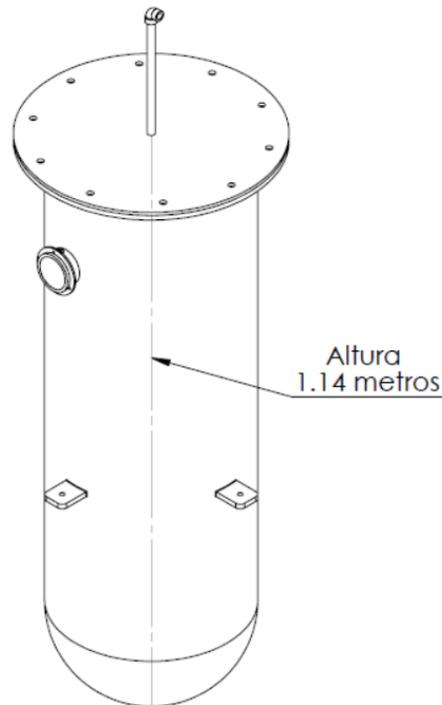


Figura 55. Reactor.

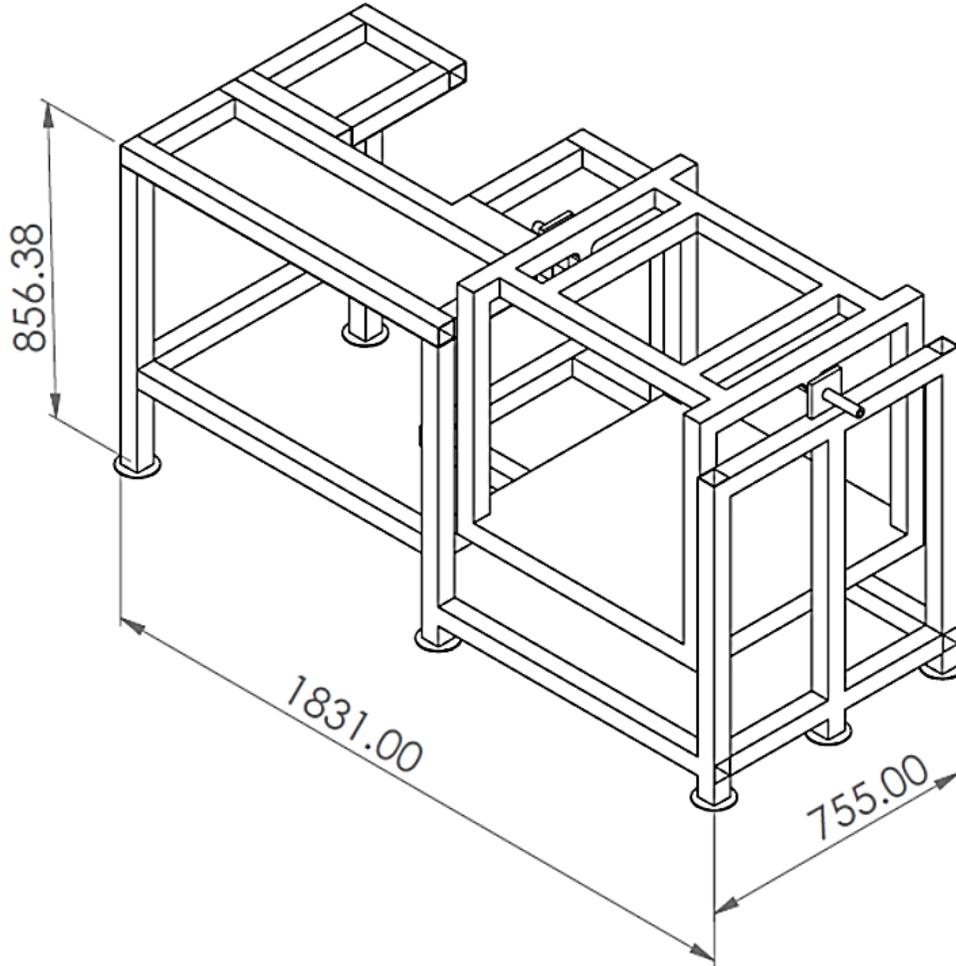


Figura 56. Estructura de soporte integrada (porta-reactor + porta-condensador).