



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MEXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Departamento de Ingenierías

REPORTE FINAL PARA ACREDITAR LA RESIDENCIA PROFESIONAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:
ARMANDO TOVAR VITAL

CARRERA:
INGENIERÍA INDUSTRIAL

***[PUESTA EN MARCHA DE UN REACTOR PIROLÍTICO AUTOMATIZADO DE
BAJO VOLUMEN: ANÁLISIS DEL USO DE UN PROCESO SIMPLE DE
REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA]***

Laboratorio de Conversión de la Energía
Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



ING. ALEJANDRO PUGA VARGAS
Asesor externo

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
Asesor interno

Junio de 2021

AGRADECIMIENTOS

A mi casa de estudio el Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga por brindarme los conocimientos y la oportunidad para desarrollar el proyecto de residencias profesionales.

Agradecer a mis profesores que a lo largo de la carrera me brindaron los conocimientos y tener su disposición cuando se necesitaba.

A todos mis compañeros, amigos y a mi familia por brindarme el apoyo necesario cuando más se necesitaba.

Por ultimo agradecer, al Dr. José Alonso Dena Aguilar y al Ing. Alejandro Puga Vargas por sus ayudas, enseñanzas, asesorías y dedicación durante el desarrollo del mismo.

Muchas gracias a todos(as)

RESUMEN

“PUESTA EN MARCHA DE UN REACTOR PIROLÍTICO AUTOMATIZADO DE BAJO VOLUMEN: ANÁLISIS DEL USO DE UN PROCESO SIMPLE DE REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA”

Por: **ARMANDO TOVAR VITAL**

El Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga es una institución de educación superior que se localiza en el Municipio de Pabellón de Arteaga al norte del Estado de Aguascalientes y es perteneciente al Tecnológico Nacional de México (TecNM). Actualmente cuenta con una oferta educativa de 5 programas de Licenciatura y 1 programa de Posgrado con una matrícula superior a los 1500 estudiantes.

Dentro de sus instalaciones se encuentra el laboratorio de Conversión de la Energía adscrito al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica donde se desarrollan proyectos de posgrado, investigación e innovación relativos a la línea de generación y aplicación del conocimiento “conversión de la energía”. Uno de estos proyectos se refiere a la obtención de combustible bruto (en estado líquido) empleando un reactor pirolítico hecho a la medida de bajo volumen y plásticos o polímeros de desecho como el poliestireno de empaque. Se estudia la producción de combustible bruto a partir de desechos como un recurso alternativo energético no convencional.

La función del reactor pirolítico es degradar la materia prima con la acción de la temperatura hasta obtener trazas de pirolisis como son sólidos carbonizados, gases pirolíticos o residuos tipo tinta. Sin embargo, el lograr combustible bruto líquido requiere de un sistema de condensación adecuado para poder condensar los gases pirolíticos y cambiar su estado físico. Debido a lo anterior, se requiere de un sistema de condensación que realice la función de cambiar los gases pirolíticos por combustible líquido para que pueda ser empleado en procesos futuros de refinación y estudio de su capacidad sustentable.

En este trabajo se aplicaron técnicas y metodologías de la Ingeniería Industrial para estudiar la capacidad de diseñar y construir un sistema de condensación mediante

el concepto de refrigeración termoeléctrica usando celdas Peltier, las cuales funcionan bajo el principio de refrigeración termoeléctrica (llamada también termorefrigeración electrónica). Se emplea un sistema de intercambiador de calor tubular previamente construido en otro trabajo y adaptado a un equipo de circulación forzada con depósitos proveedores del líquido refrigerante (para este estudio se emplea agua). El sistema completo opera bajo el principio de paso de un líquido por el sistema tubular, el cual está insertado en una placa de aluminio que está en contacto con la cara fría de la celda Peltier. Se propone que la cara fría de la celda Peltier transmita el frío hacia la placa de aluminio, la cual a su vez la transmite al tubo intercambiador y finalmente el frío llega al líquido refrigerante. El sistema de intercambiador consta de una sección de cobre rolada y lineal con dimensiones para todo el equipo.

La propuesta de solución consistió en estudiar la capacidad de enfriamiento del sistema de condensación existente para definir una propuesta de estudio. Para lo anterior se pone en operación la cama de celdas Peltier diseñada, el reactor pirolítico automatizado existente y un sistema de monitoreo sensado habilitado para este estudio. El plan de trabajo antes mencionado permite analizar si el sistema es viable o es necesario aplicar reingeniería para lograr mejores resultados a futuro.

Esta fuera de alcance del proyecto declarar los detalles del sistema embebido de automatización empleado en el reactor y en el condensador debido a que son parte de demás trabajos de investigación.

Para monitorear el funcionamiento del sistema se monitoreo las temperaturas alcanzadas por la cama de celdas Peltier con una cámara termográfica y las temperaturas alcanzadas en el depósito principal mediante sensores. Ningún estudio de transferencia de calor es realizado en este trabajo.

Bajo este panorama, se logró establecer la capacidad de operación del sistema planteado y una propuesta de mejora al equipo para trabajos futuros de investigación. El desarrollo del presente estudio sienta las bases de mejora del proyecto original existente.

Dirigido por:

Ing. Alejandro Puga Vargas

Dr. José Alonso Dena Aguilar

ÍNDICE

	Pág.
I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción de la empresa u organización y del puesto o área de trabajo del residente.....	2
1.3 Problema(s) a resolver.....	5
1.4 Justificación.....	6
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
II. MARCO TEÓRICO	8
2.1 PIROLISIS	8
2.1.1 Clasificación de pirolisis	8
2.2 REACTOR PIROLITICO	10
2.2.1 Influencia en la temperatura de la pirolisis de plásticos.....	12
2.2.2 Influencia de la velocidad de calentamiento.....	12
2.2.3 Influencia del tiempo de residencia.....	13
2.3 PLÁSTICOS DE UN SOLO USO O DE DESECHO.....	13
2.4 PRODUCTOS DE LA PIROLISIS.....	15
2.5 CONDENSACIÓN DE GASES.....	17
2.6 EQUIPOS DE CONDENSACIÓN DE GASES.....	18
2.7 REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA Y CELDAS PELTIER.....	19
2.8 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES FISICOQUÍMICOS..	22
2.8.1 Importancia de la automatización en los procesos industriales.	22
2.9 DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y MODELOS ESTADÍSTICOS.....	23
2.9.1 Modelos estadísticos.....	24
2.10 MÉTODOS PERT Y CPM.....	25
2.10.1 PERT.....	25
2.10.2 CPM.....	26

	Pág.
III. DESARROLLO	27
3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	27
3.1.1 Celdas peltier de estudio.....	27
3.1.2 Reactor pirolitico automatizado.....	27
3.1.3 Sistema de condensación.....	29
3.1.4 Estudio del comportamiento de las celdas peltier bajo diferentes condiciones.....	31
3.1.4.1 Pruebas al vacío.....	31
3.1.4.2 Pruebas con disipador.....	32
3.1.4.3 Pruebas con disipador y ventilador.....	32
3.1.4.4 Pruebas con bloque de agua fría y disipador.....	33
3.1.5 Bloque de agua en estructura del soporte.....	34
3.1.6 Materia prima empleada para pruebas con sistema completo.....	34
3.2 Cronograma de actividades.....	35
 IV. RESULTADOS	 36
4.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS PELTIER.	36
4.1.1 Pruebas de celda peltier al vacío.....	36
4.1.2 Pruebas de celda peltier con disipador.....	37
4.1.3 Pruebas de celda peltier con disipador y ventilador.....	39
4.1.4 Pruebas con bloque de agua fría y disipador.....	41
4.1.5 Graficas comparativas de pruebas con celdas peltier en las diversas configuraciones.....	42
4.2 EFICIENCIA DE BLOQUE DE AGUA ARA LA PLACA PRINCIPAL.....	43
4.3 PRUEBAS DE PRIROLISIS.....	45
4.3.1 Primera prueba sin celdas Peltier.....	46
4.3.2 Segunda prueba con celdas Peltier.....	48
4.3.3 Tercera prueba con celdas Peltier.....	49
4.4 LECTURAS DE SENSADO DE TEMPERATURAS.....	51

	Pág.
4.5 ANÁLISIS PERT Y CPM.....	53
V. CONCLUSIONES.....	56
VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS.....	58
VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	59
Anexo 1. Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional.....	62
Anexo 2. Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de pirolisis en función a los productos obtenidos en cada uno de ellos.....	10
Tabla 2. Actividades para el análisis pert/cpm.....	53

LISTA DE GRAFICAS

	Pág
Grafica 1. Temperaturas alcanzadas en la cara caliente de la celda con configuración diferente.....	43
Grafica 2. Temperaturas alcanzadas en la cara fría de la celda con configuración diferente.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.....	4
Figura 2. Esquema de pirolisis.....	8
Figura 3. Ejemplo reactor discontinuo	11
Figura 4. Ejemplo reactor de lecho fluidizado.....	11
Figura 5. Reactor tipo spounted bed.....	12
Figura 6. Plásticos de un solo uso.....	14
Figura 7. Poliestireno.....	15
Figura 8. Residuos de pirolisis.....	16
Figura 9. Gas coque.....	17
Figura 10. Sistema de condensación de gases.....	18
Figura 11. Esquema de funcionamiento de caldera de condensación.....	19
Figura 12. Principio de funcionamiento de la refrigeración termoeléctrica.....	20
Figura 13. Celda Peltier.....	20
Figura 14. Funcionamiento de la celda Peltier.....	21
Figura 15. Modulo convencional de una celda Peltier	21

	Pág.
Figura 16. Diagrama Pert.....	25
Figura 17. Estructura de diagrama Pert.....	25
Figura 18. Ruta crítica de un sistema Pert.....	26
Figura 19. Reactor pirolítico automatizado de prueba.....	28
Figura 20. Tapa de reactor con el empaque de hule hecho a la medida.....	28
Figura 21. Anclas de sujeción con reingeniería para los tornillos de sujeción.....	29
Figura 22. Sellado de juntas de diversos elementos del reactor.....	29
Figura 23. Sistema completo de condensación.....	30
Figura 24. Sistema completo de condensación en su estructura de soporte.....	30
Figura 25. Placa de aluminio con la tubería de cobre que recibirá el enfriamiento.	31
Figura 26. Prueba al vacío.....	31
Figura 27. Pruebas con disipador.....	32
Figura 28. Pruebas con disipador y ventilador.....	33
Figura 29. Pruebas con bloque de agua.....	34
Figura 30. Bloque de agua en estructura de soporte: vista sup (izq) y lateral (der)	34

	Pág.
Figura 31. Materia prima de PS.....	35
Figura 32. Cronograma de actividades general.....	35
Figura 33. Pruebas al vacío: temperaturas alcanzadas en la cara caliente.....	38
Figura 34. Pruebas al vacío: temperaturas alcanzadas en la cara fría.....	36
Figura 35. Pruebas con disipador sobre la cara fría: lecturas sobre la cara caliente.....	37
Figura 36. Pruebas con disipador sobre la cara caliente: lecturas sobre la cara fría.....	39
Figura 37. Pruebas con disipador sobre la cara fría y ventilador: lecturas sobre la cara caliente.....	40
Figura 38. Pruebas con disipador sobre la cara caliente y ventilador: lecturas sobre la cara fría.....	41
Figura 39. Pruebas con disipador sobre la cara caliente y bloque de agua: lecturas sobre cara fría.....	42
Figura 40. Temperatura de placa en posición de primera celda peltier.....	44
Figura 41. Temperatura de placa en posición de segunda celda peltier.....	44
Figura 42. Temperatura de placa en posición de tercera celda peltier.....	45
Figura 43. Equipo completo original (Reactor más condensador).....	46

	Pág.
Figura 44. Primera prueba sin celdas Peltier.....	47
Figura 45. Residencia de gas generado por el poliestireno.....	47
Figura 46. Poliestireno cristalizado.....	48
Figura 47. Segunda prueba con celdas peltier.....	49
Figura 48. Poliestireno cristalizado de la segunda prueba.....	49
Figura 49. Prueba con enfriamiento en el cilindro y en los disipadores de las celdas peltier.....	50
Figura 50. Poliestireno cristalizado de la tercera prueba.....	50
Figura 51. Registro de temperaturas por el sensor 1.....	51
Figura 52. Registro de temperaturas por el sensor 2.....	52
Figura 53. Registro de temperaturas por el sensor 3.....	52
Figura 54. Diagrama Pert.....	54
Figura 55. Diagrama de Gant.....	55

I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 Introducción

El INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA es una institución de educación superior ubicada en el Municipio de Pabellón de Arteaga del Estado de Aguascalientes y como parte de sus objetivos se encuentra el desarrollo de proyectos de innovación e investigación a través de residencias profesionales que den soluciones a problemas de la industria, de ciencia aplicada o de desarrollo tecnológico. Su laboratorio de Conversión de la Energía inicio operaciones en enero de 2019 dentro del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica que se oferta en el plantel y donde se promueven proyectos de posgrado, investigación e innovación acordes a la línea de investigación de conversión de la energía. Esta línea de investigación se enfoca al estudio de procesos de conversión de la energía y energías renovables mediante el diseño e integración de dispositivos, sistemas programables y procesos orientados para la generación, almacenamiento y uso eficiente de la energía.

Uno de estos proyectos se refiere a la obtención de combustible bruto (en estado líquido) empleando un reactor pirolítico previamente construido.

La función de la pirolisis es degradar la materia prima, con la acción de la temperatura, hasta obtener trazas de pirolisis como son sólidos carbonizados, gases pirolíticos y/o residuos tipo tinta. Sin embargo, el lograr combustible bruto requiere de un sistema de condensación adecuado para poder condensar los gases pirolíticos y cambiar su estado físico.

Los gases de pirolisis, 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.

Debido a lo anterior, se requiere de un sistema de condensación que realice la función de cambiar los gases pirolíticos por combustible líquido para que pueda ser empleado en procesos futuros de refinación y uso.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo es estudiar la capacidad de enfriamiento de un sistema de condensación existente y validar su eficacia para poder definir una nueva propuesta de diseño.

En particular, se pone en operación una cama de celdas Peltier ya construida en trabajos anteriores, se utiliza un reactor pirolítico automatizado existente y se habilita un sistema de monitoreo de sensado para este estudio. En el caso del reactor pirolítico automatizado, este ya se encuentra construido, pero nunca se ha puesto en funcionamiento por no contar con el sistema de condensación adjunto. El presente estudio permite conocer la capacidad de operación del reactor. En el caso del sistema de condensación, se encuentra ya un equipo construido, pero nunca se ha puesto en funcionamiento para validar su diseño y construcción. El presente trabajo permite detectar las áreas de mejora del sistema. Para el sistema de sensado, se habilita un set de sensores de temperatura a un sistema embebido previamente construido. El monitoreo de las lecturas se logra por medio de un lenguaje programable para microcontroladores Arduino. En todos los casos anteriores no se describe a detalle los sistemas embebidos empleados por estar fuera de alcance del proyecto y ser trabajo parte de otros estudios ajenos al presente.

La presente propuesta de puesta en marcha del sistema completo permitió detectar las áreas de mejora pertinentes para establecer propuestas de eficiencia del proceso pirolítico integral.

1.2 Descripción de la empresa y del puesto o área de trabajo del residente

El ramo económico de la institución es la educación, específicamente la educación superior, así como el desarrollo de proyectos de innovación e investigación con la industria (desarrollo tecnológico) o académicos (ciencia aplicada).

Sus políticas de misión, visión, objetivos (retos) y valores de la institución son:

Misión

Brindar un servicio de educación superior de calidad comprometido con la generación, difusión y conservación del conocimiento científico, tecnológico y

humanista, a través de programas educativos que permitan un desarrollo sustentable, conservando los principios universales en beneficio de la humanidad.

Visión

Ser una institución de educación superior reconocida a nivel nacional e internacional, líder en la formación integral de profesionistas de calidad y excelencia, que promueve el desarrollo armónico del entorno.

Objetivos de la empresa

Asegurar la calidad de todos los procesos académicos, entre los que se encuentran:

- El diseño de especialidades
- Asesoría de residencias profesionales
- Desarrollo de proyectos de innovación
- Servicios de educación continua
- Investigación educativa
- Acreditaciones de planes de estudio

Valores

A fin de guiar y orientar las acciones cotidianas de todo su personal, la institución define los siguientes valores institucionales:

- Compromiso. - lograr propósitos comunes mediante el trabajo responsable y en equipo, mejorando permanentemente el ser, hacer y tener mediante la participación activa y el liderazgo compartido.
- Responsabilidad. - decidir y actuar conforme al análisis previo de las consecuencias inmediatas o mediatas de las acciones.
- Respeto. - actitud personal y colectiva hacia la conservación, mejoramiento y protección de las diversas formas de vida, además de la aceptación de la diversidad propia de lo humano.

- Cooperación. - facilitar condiciones que allanen el trabajo de los demás, y capacitar a toda la gente para propiciar su desarrollo personal y profesional dentro y fuera de la institución.
- Honestidad. - liderazgo que toma decisiones con base en una información completa, retroalimentando directamente con resultados e impacto mutuo, dando transparencia a cada una de las acciones personales e institucionales.
- Equidad. - crear un ambiente que permita establecer un sistema de reconocimiento al esfuerzo individual y de grupo en la institución.

En la Figura 1 se presenta el organigrama de la institución, así como el área de trabajo del residente. Las funciones del residente son propias del proyecto de residencia y se enfocan a la puesta en marcha de un reactor pirolítico con sistema de condensación habilitado con un sistema de refrigeración termoeléctrica a base de celdas Peltier.



Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.

1.3 Problema(s) a resolver

Los gases pirolíticos contienen un gradiente de temperatura muy grande que, según el proceso de pirolisis, requieren de un sistema de condensación para lograr cambiar su estado físico de gas a líquido. En algunos casos las temperaturas los hacen incondensables. Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1.- Puesta en operación de un reactor pirolítico automatizado.

- Realizar pruebas de pirolisis con el reactor en funcionamiento para generar gases pirolíticos que permitan validar la capacidad de enfriamiento de la cama de celdas Peltier propuestas.

2. – Análisis de funcionamiento de un sistema de condensación por celdas Peltier

- Realizar el monitoreo de las temperaturas alcanzadas por las celdas Peltier.
- Realizar el monitoreo de temperatura del agua refrigerante.
- Definir una metodología para aumentar el rendimiento de enfriamiento de las celdas Peltier.
- Adicionalmente, detectar áreas de mejora del proceso.

3. – Propuesta de mejora del sistema integral

- Establecer trabajo a futuro para mejorar el sistema completo de reactor más condensador.

Poner en operación el sistema integral completo permitirá detectar la viabilidad de operación del equipo bajo la metodología propuesta o en su caso establecer trabajo a futuro para optimizar el equipo.

1.4 Justificación

ECOCE (asociación civil ambiental sin fines de lucro) indica que en México se tiran alrededor de 20,000 millones de botellas de plástico al año. En la actualidad, y, en particular, en México se generan alrededor de 722,000 toneladas anuales de botellas de plástico elaboradas con Tereftalato de Polietileno (PET) y aunque en México se logra recuperar el 58% del PET de desecho, aun se requiere establecer demás mecanismos de aprovechamiento de recuperación o de recicle de estos materiales, como por ejemplo, la exploración de nuevas tecnologías que permitan incrementar el porcentaje de recuperación de PET y que consecuentemente sean un medio de obtención de otros productos de alto valor agregado como lo puede ser la recuperación de hidrocarburos en forma de combustible (p. ej. diésel o queroseno).

La pirolisis es una reacción química donde se descompone químicamente la materia causada a través de la acción de calentamiento a altas temperaturas ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta degradarla y obtener un producto solido (p. ej. material carbonizado) o productos gaseosos (llamados gases pirolíticos) como el hidrogeno, metano, dióxido de carbono o hidrocarburos. Aunque también se obtienen residuos tipo tinta (residuos externos).

Un reactor pirolítico es un equipo que permite llevar a cabo una reacción de pirolisis de materia. Generalmente un reactor pirolítico comprende de: una cámara pirolítica prevista de un tambor externo y un tambor interno, un sistema de calentamiento, un sistema de alimentación, un puerto de salida de gases de pirolisis, un sistema de condensación de gases y colector de combustible y residuos.

Dentro de este contexto, un reactor de pirolisis batch prefabricado de 20 L de capacidad se tiene ya disponible para realizar un proceso de pirolisis de manera automatizada. Sin embargo, no se ha puesto en marcha para validar su capacidad de operación en conjunto con un sistema de condensación que permita estudiar la viabilidad del uso de un arreglo de enfriamiento termoeléctrico por medio de celdas Peltier.

Se propone poner en marcha el reactor con el sistema de condensación de celdas Peltier empleando plásticos de desecho (poliestireno expandido) para generar combustible bruto. Lo anterior permitirá establecer la capacidad de operación del proceso habilitado en el presente trabajo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Construir un sistema simple de refrigeración termoeléctrica mediante celdas Peltier para habilitar un equipo de condensación de gases de pirolisis.

1.5.2 Objetivos específicos

- Estudiar el método de refrigeración termoeléctrica por celdas Peltier mediante una revisión exhaustiva de la literatura para identificar su funcionamiento idóneo.
- Identificar las condiciones de operación de una celda Peltier mediante revisión de la literatura para una metodología de funcionamiento.
- Llevar a cabo un proceso de pirolisis de plásticos de desecho mediante el sistema Peltier construido para validar su funcionamiento.
- Aplicar técnicas estadísticas mediante el análisis del proceso para estimar el comportamiento del proceso.
- Realizar una propuesta del proceso mediante la detección de mejoras para establecer trabajos futuros de investigación.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 PIROLISIS¹

La pirolisis es un proceso termoquímico que al calentar la materia orgánica a una temperatura moderadamente alta (350-650°C) en ausencia del oxígeno llegando a convertir esta materia en un combustible. La pirolisis es un tratamiento que se puede aplicar a cualquier producto a base de carbono ya que el material está expuesto a altas temperaturas sin la presencia del oxígeno, ver Figura 2.

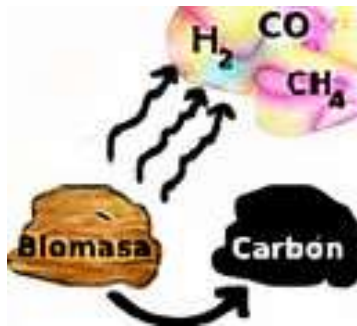


Figura 2. Esquema de pirolisis.

La pirolisis es un proceso complicado, ya que pueden influir múltiples factores en el proceso como, por ejemplo:

- La composición de la materia prima
- La tecnología utilizada
- La velocidad de calentamiento
- El tiempo de residencia
- La velocidad de enfriamiento
- La temperatura del proceso

2.1.1 Clasificación de pirolisis

Al solicitar energía térmica para este proceso, la pirolisis se puede dividir en dos categorías:

1. Indirecta o sistemas alotérmicos: La energía suele ser el propio gas o el carbón generado, y se transmite a través de la conducción y radiación de la parte del reactor

2. Directa o sistemas autotérmicos: La energía necesaria la proporciona la combustión de parte de la carga

Desde un punto de vista operativo la pirolisis se puede dividir en:

1. **Pirolisis convencional:** Se puede realizar a temperaturas bajas y medias, el proceso de baja temperatura puede alcanzar hasta 550°C y se utiliza para producir alquitrán; mientras que el proceso de temperatura media se realiza entre los 550°C a 800°C para producir metano e hidrocarburos. Se utilizan equipos rotatorios o incluso horno de parrilla.
2. **Pirolisis rápida:** En este proceso, se calienta rápidamente la materia a una alta temperatura (650°C) en ausencia de oxígeno, se utiliza sobre todo para la producción de aceites.
3. **Pirolisis instantánea:** Cuando la temperatura del proceso es más alta (1000°C) y el tiempo de residencia es más corto.

En la Tabla 1 se muestran los tipos de pirolisis en función a los productos obtenidos de interés en cada uno de ellos.

Tabla 1. Tipos de pirolisis en función a los productos obtenidos en cada uno de ellos.

Proceso	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Bio-char
Convencional	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
Vacío	2 – 30 s	Media	400	Bioaceites
Hidropirólisis	< 10 s	Rápida	< 500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 s	Rápida	>700	Químicos

2.2 REACTOR PIROLÍTICO²

El tipo de reactor utilizado en el proceso de pirolisis es muy importante porque en muchos casos se determinan las variables que se pueden utilizar y por lo tanto la distribución del producto obtenido. En el internet hay muchos documentos que hablan sobre la pirolisis que describen diferentes tipos de reactores, entre los tipos más utilizados se pueden destacar los siguientes:

a) Reactor discontinuo. La característica básica de un reactor discontinuo es calentar la muestra depositada inicialmente en el reactor hasta alcanzar la temperatura deseada, ver Figura 3. Este tipo de reactor se ha utilizado en muchos trabajos para degradar diferentes tipos de materiales, incluido el polietileno.

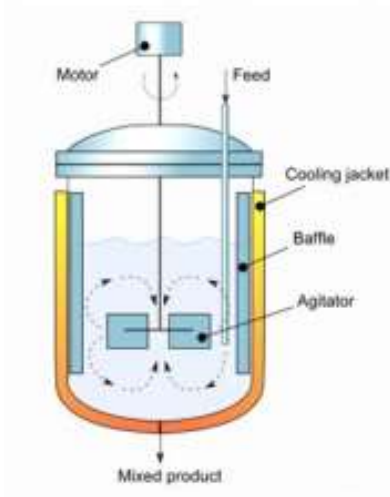


Figura 3. Ejemplo Reactor discontinuo.

b) Reactor de lecho fluidizado. Debido a sus buenas características de transferencia de calor, los reactores de lecho fluidizado se utilizan ampliamente en los procesos de degradación de polímeros, ver Figura 4. También se puede enfatizar la versatilidad de estos equipos para procesar mezclas de plásticos.

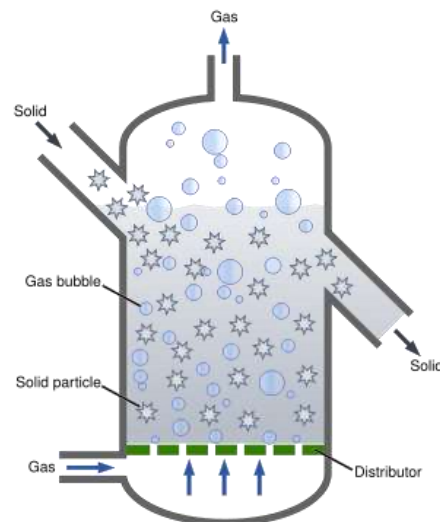


Figura 4. Ejemplo Reactor de lecho fluidizado.

c) Reactor tipo Spouted bed: Este reactor está diseñado para reducir las limitaciones de los reactores de lecho fluidizado. Este reactor cilíndrico con fondo de cónico tiene una alta capacidad de transferencia de calor y capacidad de transferencia de material,

debido a que el contacto del gas-sólido ocurre en contracorriente entre las dos fases. En la Figura 5 se presenta un reactor de este tipo.

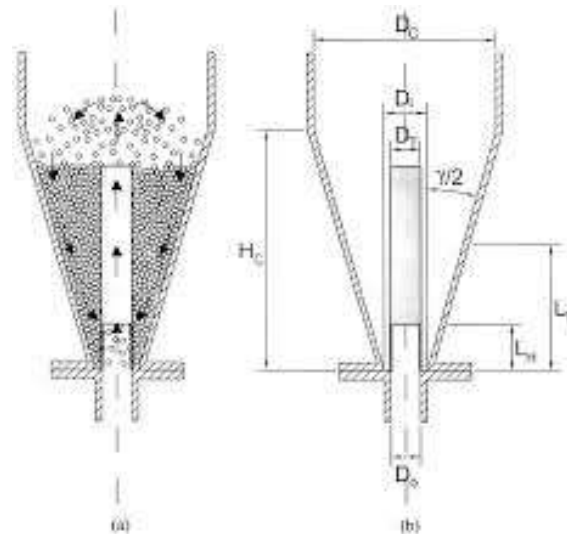


Figura 5. Reactor Tipo spouted bed.

2.2.1 Influencia en la temperatura de la pirolisis de plásticos³

La temperatura es una de las variables más importantes en el proceso de pirolisis. El aumento de temperatura facilita la reacción de los productos de pirolisis, se puede distinguir tres rangos de temperatura de pirolisis, lo que resulta en distribuciones de productos significativamente diferentes:

- Entre 330 y 450°C, el rendimiento de fracciones líquidas es alto, mientras que la formación de compuestos gaseosos es mucho menor.
- A temperaturas superiores a 500°C, el grado de agrietamiento de los plásticos pirolizados es mayor y, por tanto, el rendimiento de fracciones de gas es mayor.
- A partir de los 700°C, los componentes sólidos comienzan a tener un gran peso, incluso si se establece una relación proporcional directa entre las propiedades del gas y los componentes sólidos.

2.2.2 Influencia de la velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento es un factor muy importante en la distribución del producto obtenido. Según la velocidad de calentamiento utilizada, se puede distinguir dos procesos externos: pirolisis lenta y pirolisis rápida. En la pirolisis lenta, la velocidad

de calentamiento es de aproximadamente una unidad o decenas de °C/min. En la pirolisis flash, se utiliza una velocidad de calentamiento superior a 250°C/seg para facilitar la formación de productos líquidos y gaseosos.

2.2.3 Influencia del tiempo de residencia

El tiempo es un factor muy importante ya que puede influir bastante en el proceso de pirolisis dando diferentes resultados si lo manejamos con diferentes tiempos de exposición. Durante este tiempo, pueden ocurrir reacciones, cambiando así la distribución de los productos obtenidos en la primera etapa de descomposición del polímero.

2.3 PLÁSTICOS DE UN SOLO USO O DE DESECHO⁴

Simplemente por la practicidad que estos productos generan el fácil acceso a estos y con un bajo costo. El plástico es un gran negocio, pero también una gran amenaza para nuestro medio ambiente se produce alrededor de 300 millones de toneladas cada año. Los envases plásticos representan casi la mitad de todos los residuos plásticos a nivel mundial, y muchos de ellos son desechados después de haber sido utilizado tan solo unos pocos minutos. Muchos de los plásticos puede que sean de un solo uso, pero esto no significa que sean fáciles de eliminar. Cuando son desechados en vertederos o en el medio ambiente, pueden tardar hasta mil años en descomponerse. Las bolsas de plástico de un solo uso se utilizan para llevar productos y generalmente son suministradas a los clientes en los puntos de venta. Las bolsas de compra más comunes están hechas de un tipo de plástico llamado polietileno, una resina sintética resistente, ligera y flexible, que se produce a partir de la polimerización del etileno.

Los productos más populares que creamos se observan en la Figura 6.



Figura 6. Plásticos de un solo uso.

Desde los primeros registros hasta el 2015, se obtuvo un registro de la eliminación de los residuos plásticos que fue el 9% fue reciclado, 12% Incinerado y el 79% termino en el basurero o en el medio ambiente. De hecho, la durabilidad que hace tan útil al plástico es también lo que lo hace tan peligroso para el ambiente y su material que le toma varios años en degradarse que al desbaratarse termina en la cadena alimenticia. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de plástico de desecho.



Figura 7. *Poliestireno.*

2.4 PRODUCTOS DE LA PIROLISIS

La pirólisis es la degradación térmica de sustancias en ausencia de oxígeno, por lo que estas sustancias se descomponen por el calor generado. Las características de este proceso son:

- El único oxígeno presente es el contenido en el residuo a tratar
- Las temperaturas de trabajo están alrededor de los 300°C y 800°C

Como resultado de este proceso se obtienen:

- a) Gas: Sus componentes básicos son CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono), H₂ (hidrógeno), CH₄ (metano) y compuestos más volátiles, así como compuestos ya presentes en los residuos. El gas es muy similar al gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación, pero hay más alquitrán, cera, etc.
- b) Residuo líquido: Consiste esencialmente en hidrocarburos de cadena larga, como alquitrán, aceite, fenol, cera que se forma cuando se condensa a temperatura ambiente.
- c) Residuo sólido: Son sustancias no quemadas que no se han transformado o provenientes de reacciones de la condensación molecular que contienen una

gran cantidad de carbono, metales pesados y otros componentes inertes en los residuos.⁵



Figura 8. Residuos de pirólisis con aspecto carbón tipo cenizas.

La pirólisis es una tecnología que puede diversificar sus usos, desde la obtención de productos básicos para la industria hasta la producción de combustibles:⁶

- i) Gas coque: cuanto mayor es la temperatura a la que se produce la carbonización, más hidrógeno contiene el gas de carbón. El gas se utiliza como combustible y, en el caso de un alto contenido de hidrógeno, se puede utilizar en el proceso de hidrotratamiento. Antes de su uso, el gas debe tratarse previamente para eliminar el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno, el agua y una cierta cantidad de hidrocarburos. En la Figura 9 se muestra carbón de coque como materia de combustible.
- ii) Alquitrán de hulla: El alquitrán se destila inicialmente para obtener brea con un punto de ablandamiento adecuado y producir una serie de fracciones ligeras.
- iii) Aceite ligero: Compuesto por hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos insaturados y con una cantidad de compuestos paranínicos
- iv) Aceite de Naftaleno: Compuesto más abundante en el alquitrán de hulla.
- v) Aceite de creosota: Contiene Naftalenos y ácidos y bases de elevado peso molecular.
- vi) Aceite ligero de antraceno: Con un contenido de hasta un 8% de ácidos de un alto punto de ebullición y bases aromáticas.
- vii) Aceite pesado de antraceno: Conocido como brea y, por lo tanto, son muy importantes porque representan más de la mitad del alquitrán de petróleo crudo.

Su aplicación es para la producción de combustibles mediante una mezcla con creosota de bajo contenido de azufre.

- viii) Coque: utilizado como materia prima para la producción de acero en un alto horno. Es un carbón poroso y muy reactivo.



Figura 9. Coque en su estado natural.

2.5 CONDENSACIÓN DE GASES⁷

La condensación es el cambio de estado gaseoso (vapor) a líquido. Este cambio de estado produce una cierta cantidad de energía llamada calor latente. Para que ocurra la condensación el gas tiene que tener una pérdida de calor (enfriar) hasta alcanzar su punto de rocío, que puede variar según la presión a la que se encuentre. La temperatura de la superficie donde se condensa el gas debe ser menor a la temperatura de saturación del gas. En la Figura 10 se muestra el interior de un equipo de condensación industrial.

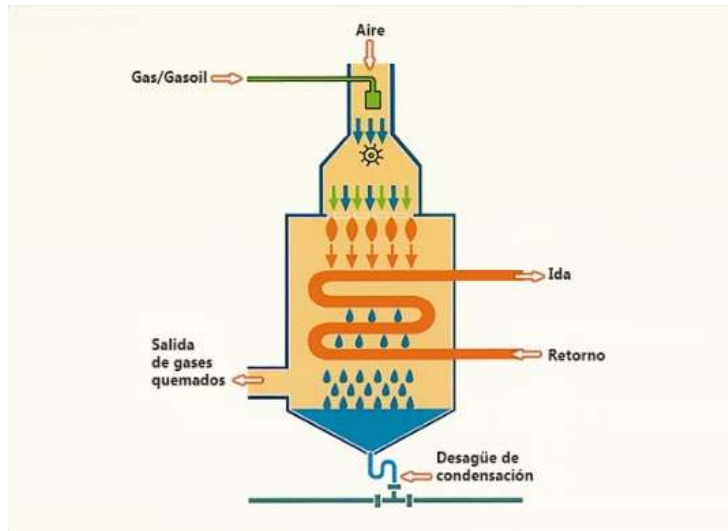


Figura 10. Sistema de condensación de gases.

Por lo tanto, el gas libera el calor retenido y lo deposita en la superficie en forma de pequeñas gotas. Por eso podemos sentir más calor cuando estamos en un ambiente húmedo. El calor latente en los gases se libera en la condensación de vapor del agua generando durante el proceso de combustión y se trasfiere al agua generado durante el proceso de combustión es trasferido al agua de la caldera. El proceso de condensación ocurre cuando el gas tiene la perdida de calor hasta el punto de rocío, pero esto también se puede llegar a conseguir variando la presión. En la naturaleza podemos observar el proceso de condensación de varias formas. El proceso ocurre cuando las temperaturas de la atmosfera baja y lo podemos observar en el rocío de cada mañana.

2.6 EQUIPOS DE CONDENSACIÓN DE GASES⁸

Las calderas de condensación son sistemas similares a las tradicionales calderas de gas, excepto que su construcción permite la recuperación parcial o total del calor asociado al vapor del agua contenido en el gas de combustión.

La caldera de condensación utiliza parte del calor latente generado por el gas de combustión para provocar condensación en el área de la cámara de combustión

En la Figura 11 podemos observar un esquema de funcionamiento de una caldera de condensación y sus componentes:

- 1.- Entrada de gas
- 2.- Entrada de aire

- 3.- Salida de gases
- 4.- Retorno desde emisores
- 5.- Ida a emisores
- 6.- Agua condensada

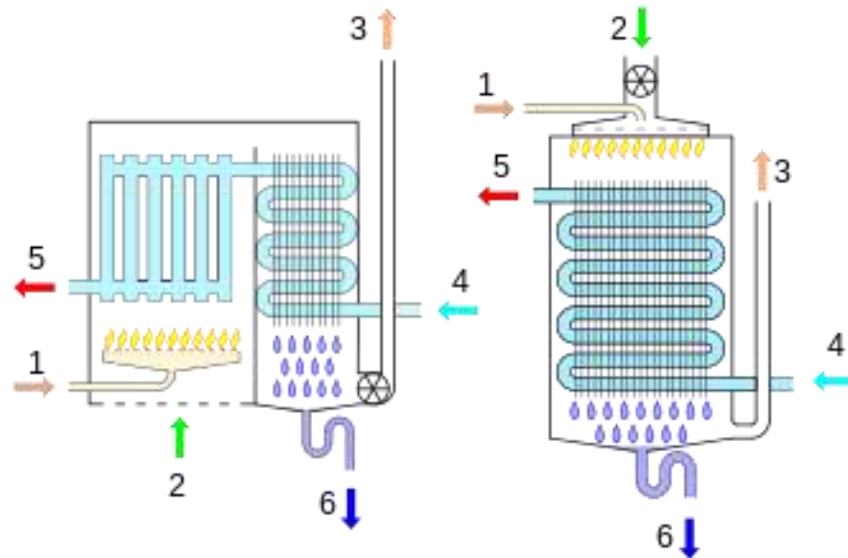


Figura 11. Esquema de funcionamiento de caldera de condensación.

2.7 REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA Y CELDAS PELTIER

La refrigeración termoeléctrica utiliza el efecto Peltier para crear un flujo térmico a través de la unión de dos materiales diferentes, como metales o semiconductores tipo P y N. Un refrigerador o calentador Peltier o una bomba de calor termoeléctrica es una bomba de calor activa en estado sólido que transfiere calor de un lado del dispositivo a otro oponiéndose al gradiente de temperatura, consumiendo para ello energía eléctrica. Un instrumento de este tipo también es conocido como dispositivo Peltier, diodo Peltier, bomba de calor Peltier, refrigerador de estado sólido o refrigerador termoeléctrico. Ya que el calentamiento se puede conseguir de manera más fácil y económica por otros muchos métodos, los dispositivos Peltier se usan principalmente para refrigeración. En cualquier caso, cuando se debe usar un único dispositivo tanto para enfriar como para calentar, puede ser aconsejable el uso de un dispositivo Peltier. Simplemente conectándolo con una fuente de tensión continua causa el enfriamiento de una de las partes, mientras que la otra se calienta. La efectividad de la bomba para

mover el calor lejos del lado frío es totalmente dependiente de la cantidad de corriente proporcionada y de cómo se extraiga el calor de la otra parte, para lo que se pueden usar disipadores, ver Figura 12.

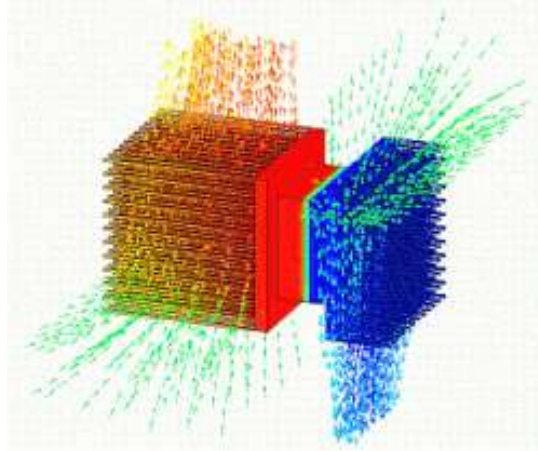


Figura 12. Principio de funcionamiento de la refrigeración termoeléctrica.

La celda Peltier es un componente electrónico que nos permite refrigerar por debajo de la temperatura ambiente. Para poder identificar la cara que dará la refrigeración a nuestro componente están marcadas con el código de la celda Peltier (cable rojo +, cable negro -), pero estas celdas no tienen polaridad solo si se llega a conectar al revés las caras actuarán de manera contraria. En la Figura 13 se muestra el aspecto de una celda de Peltier.⁹



Figura 13. Celda Peltier.

Para entender el funcionamiento de las placas Peltier, se utiliza dos placas cerámicas que están separadas por pilares de dos tipos de semiconductores los cuales son del tipo P y tipo N, ver Figura 14. Cuando hay una circulación de aire entre ambas

capas, una de ellas se enfriará mientras la segunda capa absorberá el calor perdido de la primera placa.

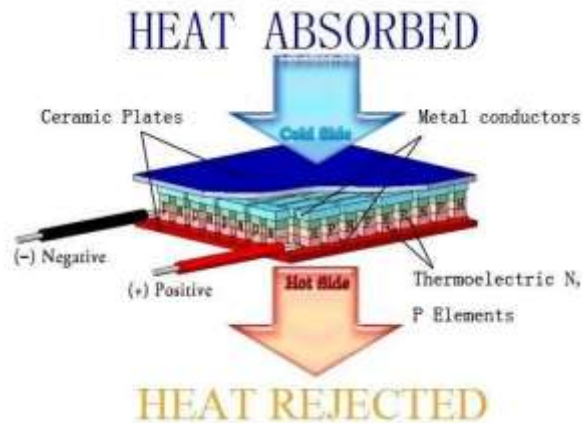


Figura 14. Funcionamiento de celda Peltier.

Un módulo convencional de una celda Peltier con sus complementos se observa en la Figura 15. El sistema consta de ventiladores, disipadores y la celda Peltier. El aire frío sale por el disipador y ventilador pequeños, los cuales están en contacto de la cara fría de la celda. Los ventiladores y disipadores grandes están en contacto con la cara caliente y se encargan de dispersar el calor generado.¹⁰



Figura 15. Módulo convencional de una celda Peltier.

2.8 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES FISICOQUÍMICOS¹¹

La automatización es un elemento clave de toda la industria. Dado que la automatización puede intervenir en cualquier tipo de fábrica puede contribuir al aumento de productividad y así reducir el riesgo al operador. Para una industria tan exigente, la automatización es un buen aliado.

En comparación con los procesos manuales, la automatización también permite la implementación de soluciones innovadoras. Nos referimos a la implantación de nueva tecnología y sistemas de control, como softwares o centros de comunicación en todas las líneas de producción.

2.8.1 Importancia de la automatización en los procesos industriales

a) Aumento de la productividad: Uno de los beneficios más importantes que destaca la importancia de la automatización industrial es aumentar la productividad. La tecnología de automatización aplicada a la máquina puede aumentar su productividad y eficiencia.

b) Reducción de costos: los sistemas de automatización industrial pueden reducir los costos de los equipos y proporcionar un rápido retorno de la inversión al mejorar la productividad y la eficiencia.

c) Mejora de la calidad: las máquinas automatizadas pueden proporcionar resultados consistentes y repetibles. Cuando los fabricantes utilizan la automatización industrial, eliminan los problemas de control de calidad causados por errores humanos, aclarando así la importancia de la automatización industrial.

d) Ventaja competitiva: para sobrevivir en la economía global actual, las empresas deben tener la capacidad de mejorar la competitividad. Además, la automatización industrial les permite seguir el ritmo de los tiempos e incluso superar a sus competidores.

2.9 DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y MODELOS ESTADÍSTICOS¹²

El diseño de experimentos es un modelo estadístico que tienen como finalidad el conocer si determinados factores tienen una influencia en una variable de interés y si existe una influencia de algún factor.

El propósito de este modelo es estudiar si un determinado método llega a producir una mejora en el proceso o no. Para lograr este objetivo debemos de aplicar el tratamiento y no aplicarlo.

Ejemplos donde se utiliza el diseño de experimentos:

- En cuanto a rendimiento de una maquina (unidades producidas al día) queremos estudiar la influencia de los trabajadores que operan la máquina y la marca de la máquina.
- Queremos estudiar el impacto de un tipo de batería y la marca en cuestión de duración de la batería.

El uso del modelo de diseño experimental se basa en el experimento y el análisis de los resultados obtenidos en el experimento. En varios casos se pueden utilizar estos métodos a partir de datos históricos o disponibles, aunque también puede aprender de los datos recopilados.

Al realizar análisis estadísticos sobre datos históricos, se producen diferentes errores. Los errores más comunes son los siguientes:

1) Inconsistencia de datos: Los procesos siempre cambian con el tiempo estos mismos cambios producen en el personal (cambios de personal, motivación, aprendizaje del personal del proceso)

2) Variables con fuerte correlación: En este proceso pueden ocurrir que dos variables estén altamente correlacionadas y estas variables pueden causar confusión. Por ejemplo, si solo conoce los datos de una sola variable (por ejemplo, de X1 en lugar de X2), esto le llevará a pensar que la variable que influye es X1, cuando en realidad la variable que influye es X2.

3) El rango de variables de control es limitado: generalmente ocurre cuando se utilizan datos recolectados cuando el proceso está funcionando en condiciones normales, sin experimentar (condiciones cambiantes de operación) para observar el comportamiento del proceso bajo nuevas condiciones.

2.9.1 Modelos estadísticos

Un modelo estadístico es una ecuación matemática que reproduce los fenómenos que observamos de la forma más exacta posible. El modelo es diferente cada vez que se modifica la información.

Los modelos de regresión lineal predicen objetivos continuos basados en la relación lineal entre el objetivo y una o más variables predictoras.

La regresión logística es una técnica estadística que se utiliza para clasificar registros según los valores de los campos de entrada.

Los nodos PCA / Factor proporcionan técnicas efectivas de reducción de datos para reducir la complejidad de los datos. Busca combinaciones lineales de campos de entrada que funcionan mejor para capturar la varianza en todo el conjunto de campos.

El análisis discriminante hace supuestos más estrictos que la regresión logística, pero puede utilizarse como un valioso sustituto o complemento del análisis de regresión logística.

El modelo lineal generalizado amplía el modelo lineal general, por lo que la variable dependiente está relacionada linealmente con el factor y la covariable cambia a través de una función de enlace.

Aquí es cuando interviene el modelado estadístico y los analistas buscan el mejor modelo que se ajuste a los datos disponibles. El propósito del modelado estadístico es tomar en cuenta el diseño experimental establecido y uno o más objetivos a verificar, y formular expresiones matemáticas que representen el comportamiento investigativo.

2.10 MÉTODOS PERT Y CPM

El gráfico PERT también se llama PERT/CPM aunque este método es significativamente diferente del método de ruta crítica, ver Figura 16. El hecho es que los gráficos PERT y CPM son los métodos de gestión de proyectos más utilizados. Incluye ayudar a la planificación y el control mediante la identificación de diversa información útil para el director del proyecto.

2.10.1 PERT¹³

El método PERT es una técnica que permite controlar la dirección del proyecto. Consiste en una representación gráfica de la red de tareas.

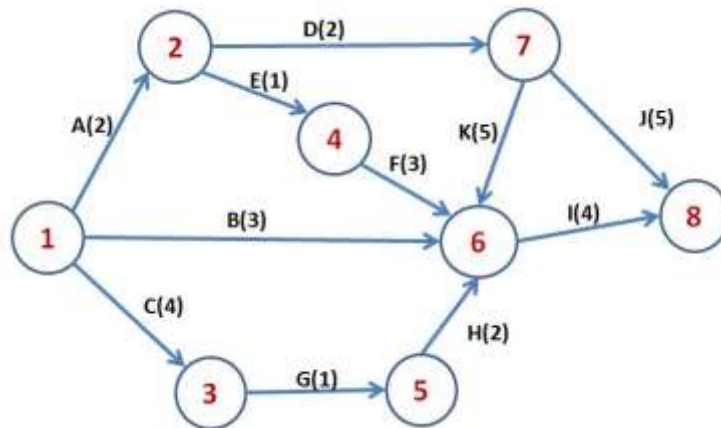


Figura 16. Diagrama Pert.

Cada tarea tiene un tiempo de inicio y final a excepción de las etapas iniciales y final, cada etapa final es el comienzo de la siguiente tarea. Estas etapas suelen estar numeradas y representadas por círculos.

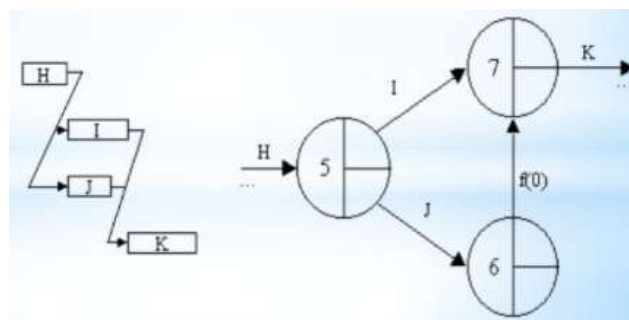


Figura 17. Estructura de diagrama pert.

2.10.2 CPM¹⁴

En el CPM se determina la duración del proyecto se entiende como una serie de actividades interrelacionadas, cada una de las cuales tiene una duración estimada.

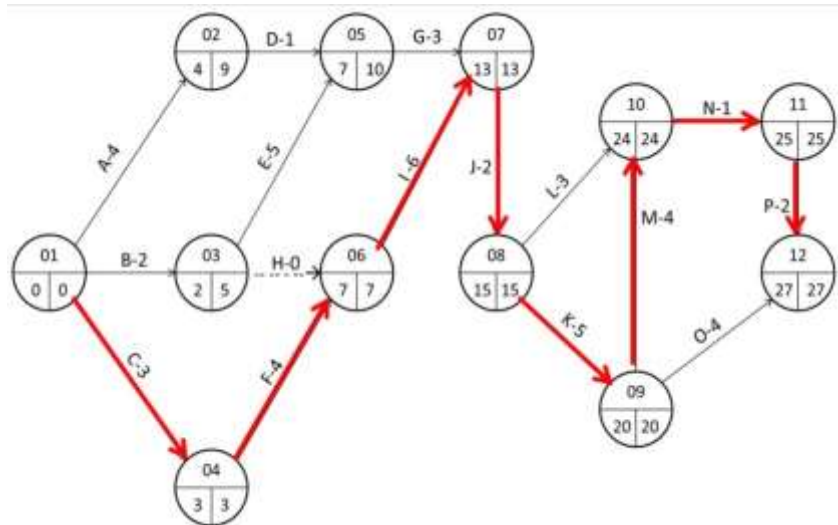


Figura 18. Ruta crítica del sistema.

III. DESARROLLO

3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

A continuación, se describe la metodología empleada en el desarrollo del presente proyecto.

3.1.1 Celdas Peltier de estudio

Para las pruebas desarrolladas en el presente trabajo se emplearon los siguientes tipos de celdas Peltier:

Celda tipo A: TEC1-12706, 12V, 6.4A, 75W, 40 x 40 x 3.6 mm.

Celda tipo B: TEC1-12715, 0-15.4V, 0-15A, 165W, 40 x 40 x 3.6 mm.

3.1.2 Reactor pirolítico automatizado

Se empleó un reactor automatizado existente de trabajos previos. Sin embargo, al realizar una primera prueba de operación al vacío se detectaron fugas por lo que se utilizó un sellador para altas temperaturas en las juntas de los sensores existentes y en la tapa protectora de la resistencia eléctrica. También se utilizó un empaque de hule hecho a la medida fabricado de secciones de una llanta de motocicleta convencional y se colocaron anclas en los tornillos de sujeción para mayor seguridad de su operación.

De la Figura 19 a la 22 se muestra el reactor pirolítico empleado y las mejoras realizada en este trabajo.

Por el alcance del proyecto no se describe a detalle el reactor empleado.



Figura 19. Reactor pirolítico automatizado de prueba.



Figura 20. Tapa de reactor con el empaque de hule hecho a la medida.



Figura 21. Anclas de sujeción con reingeniería para los tornillos de sujeción.



Figura 22. Sellado de juntas de diversos elementos del reactor.

3.1.3 Sistema de condensación

Se empleó un equipo de condensación automatizado existente de trabajos previos. Sin embargo, en el presente trabajo se realizaron acciones de reingeniería al equipo para una mejor respuesta de operación.

El equipo original consta de 2 depósitos de lámina galvanizada, un sistema de tubería de circulación forzada para conectarlos y una placa de aluminio por donde se

inserta una tubería de cobre que recibirá el frío logrado por las celdas Peltier. De la Figura 23 a la 25 se muestra el sistema condensador empleado.

Por el alcance del proyecto no se describe a detalle el sistema de condensación empleado.



Figura 23. Sistema completo de condensación.



Figura 24. Sistema completo de condensación en su estructura de soporte.



Figura 25. Placa de aluminio con la tubería de cobre que recibirá el enfriamiento.

3.1.4 Estudio del comportamiento de las celdas Peltier bajo diferentes condiciones

Para la comprensión del funcionamiento de las celdas Peltier se realizaron pruebas de comportamiento bajo diferentes condiciones. Las pruebas permitieron comprender cuales condiciones son las más adecuadas para alcanzar las temperaturas más bajas en la cara fría de las celdas.

3.1.4.1 Pruebas al vacío

Se emplearon celdas tipo A como se observa en la Figura 26.

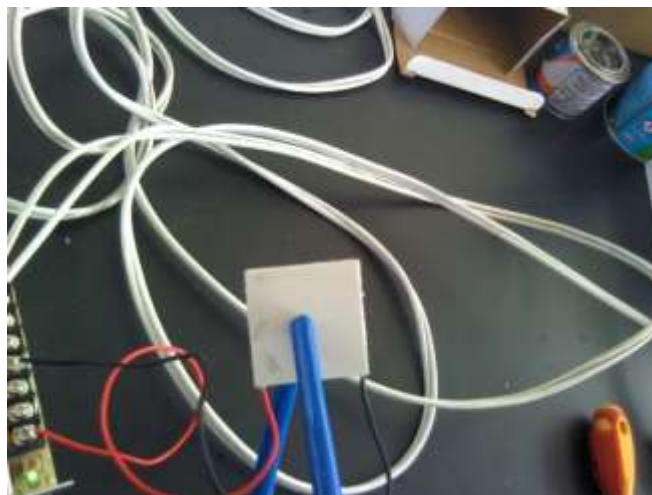


Figura 26. Prueba al vacío.

Se realizaron pruebas por tiempos exactos de 1 minuto debido a que no se recomienda que una celda Peltier esté en funcionamiento de esta manera por tiempos mayores a los 60 s. Se comprueba lo señalado por el fabricante de que las celdas necesitan de una fuente para la disipación del calor para así no estar dañando la celda. Se tomaron las temperaturas de las 4 esquinas de las 2 caras de la celda. Las temperaturas se registraron por medio de una cámara térmica.

3.1.4.2 Pruebas con disipador

Se emplearon celdas tipo A (1 celda-lecturas en las 4 esquinas) y disipadores de aluminio tipo aleta de diferentes dimensiones. Se utilizó pasta térmica tipo grasa de silicón disipadora de calor para facilitar la transferencia de calor entre la celda y el disipador. Las pruebas se realizaron por tiempos de 1 minuto.

En la Figura 27 se muestra el arreglo empleado para la prueba con disipador.

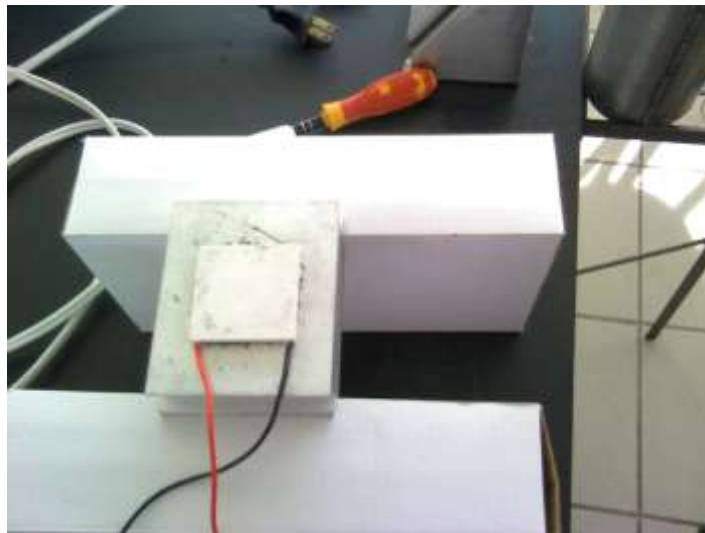


Figura 27. Pruebas con disipador.

3.1.4.3 Pruebas con disipador y ventilador

Se emplearon celdas tipo A (1 celda-lecturas en las 4 esquinas), disipadores de aluminio tipo aleta de diferentes dimensiones y ventiladores de 12V, 79x79x25 mm, 2500 rpm. Se utilizó pasta térmica tipo grasa de silicón disipadora de calor para facilitar la transferencia de calor entre la celda y el disipador. El ventilador se coloca en contacto con el disipador. Las pruebas se realizaron por tiempos de 1 minuto.

En la Figura 28 se muestra el arreglo empleado para la prueba con disipador y ventilador: celda + disipador + ventilador.

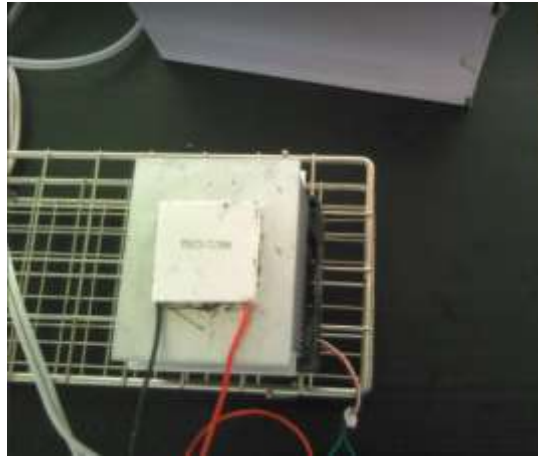


Figura 28. Pruebas con disipador y ventilador.

Conforme todos los resultados anteriores, se realizó una revisión de la literatura de manera exhaustiva y se localizó que se recomienda emplear en el lado caliente de la celda un disipador o un bloque de agua para refrigerarla, donde es más efectivo hacerlo con un bloque de agua (y su correspondiente circuito de refrigeración líquida) que con un disipador por aire. Por tanto, se probó el uso de un bloque de agua para lograr temperaturas en la cara fría por debajo de los 0 °C.

3.1.4.4 Pruebas con bloque de agua fría y disipador

En la Figura 29 se muestra el arreglo de bloque de agua empleado. Para sustituir el circuito constante de refrigeración líquida se utilizó bloques de hielo. Se emplearon celdas tipo A con la cara caliente en contacto con el disipador. Se utilizó pasta térmica sobre la cara caliente. El nivel del agua cubrió la mitad de la altura del disipador.



Figura 29. Pruebas con bloque de agua.

3.1.5 Bloque de agua en estructura de soporte

Conforme los resultados obtenidos con el bloque de agua, se realizó en este estudio, una reingeniería en la estructura de soporte del equipo condensador para habilitar un bloque de agua a la misma. En la Figura 30 se muestra el recipiente de bloque de agua creado.

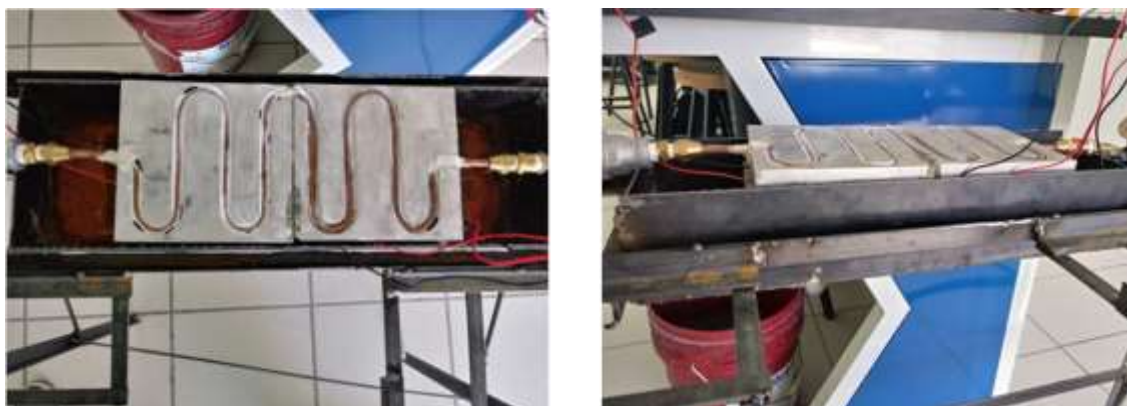


Figura 30. Bloque de agua en estructura de soporte: vista superior (izq.) y lateral (der.).

3.1.6 Materia prima empleada para pruebas con sistema completo

Se empleó poliestireno (PS) expandido de desecho. El volumen empleado de PS correspondía a un peso de 270-290 g aproximadamente y llenaba toda la cámara de pirolisis del reactor. En la Figura 31 se muestra un aspecto de la materia de PS

empleado. Para facilidad de uso, el PS se sometía a una reducción de tamaño de partícula manual.

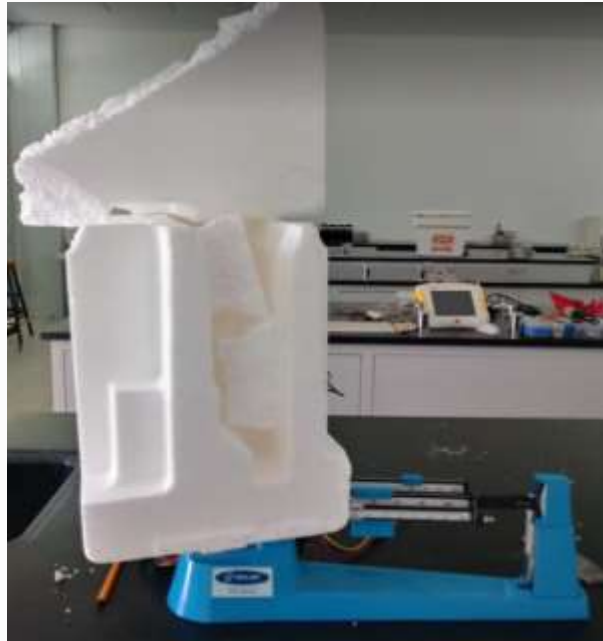


Figura 31. Materia prima de PS.

3.2 Cronograma de actividades

Actividades	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31
Revisión bibliográfica										
Determinación de variables de operación										
Pruebas de pirolisis de plásticos de desecho										
Modelación de proceso de pirolisis										
Análisis estadístico										
Propuesta de escalamiento										
Asesorías										
Evaluación y seguimiento de asesorías										
Evaluación de reporte										
Informe semestral										
Elaboración reporte técnico (productos entregables)										

Figura 32. Cronograma de actividades general

IV. RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS PELTIER

4.1.1 Pruebas de celda Peltier al vacío

En la Figura 33 se aprecian diferentes temperaturas logradas en la cara caliente de la celda en sus 4 esquinas. En la Figura 34 se muestran las de la cara fría.

En la cara caliente se alcanzan temperaturas entre 140-150 °C. En la cara fría se logran temperaturas de hasta 95 °C. Conforme lo anterior, se evidencia la necesidad de emplear disipadores o ventiladores como lo señala el fabricante.

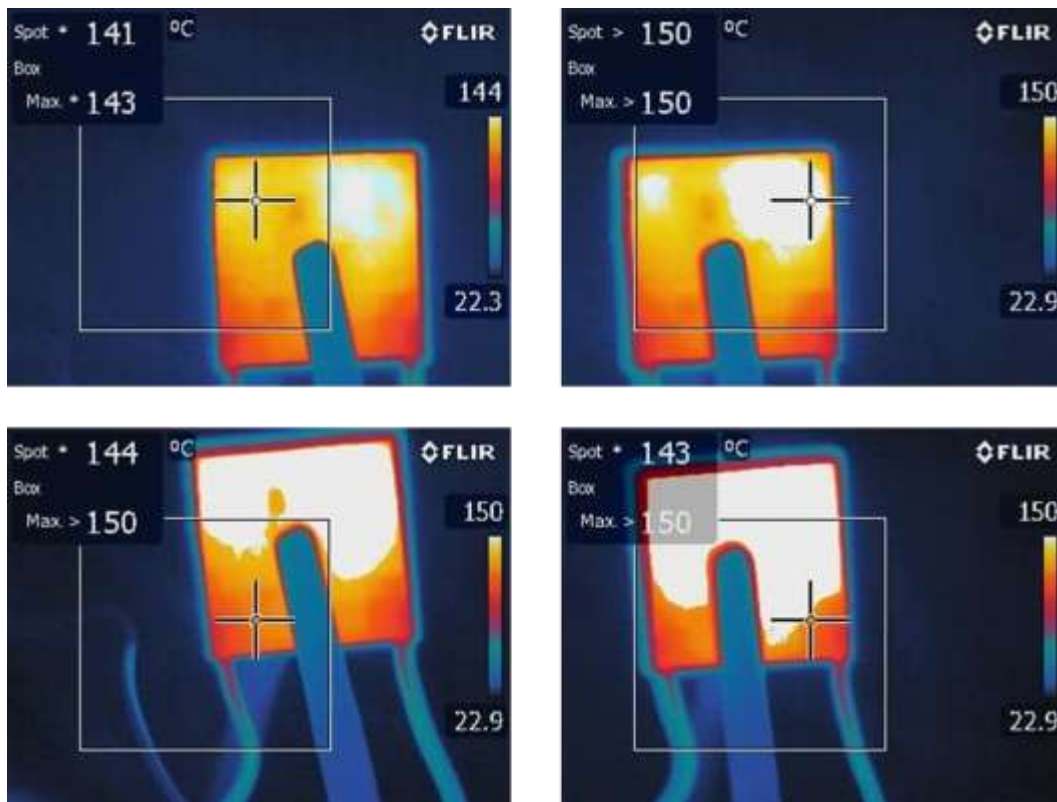


Figura 33. Pruebas al vacío: temperaturas alcanzadas en la cara caliente.

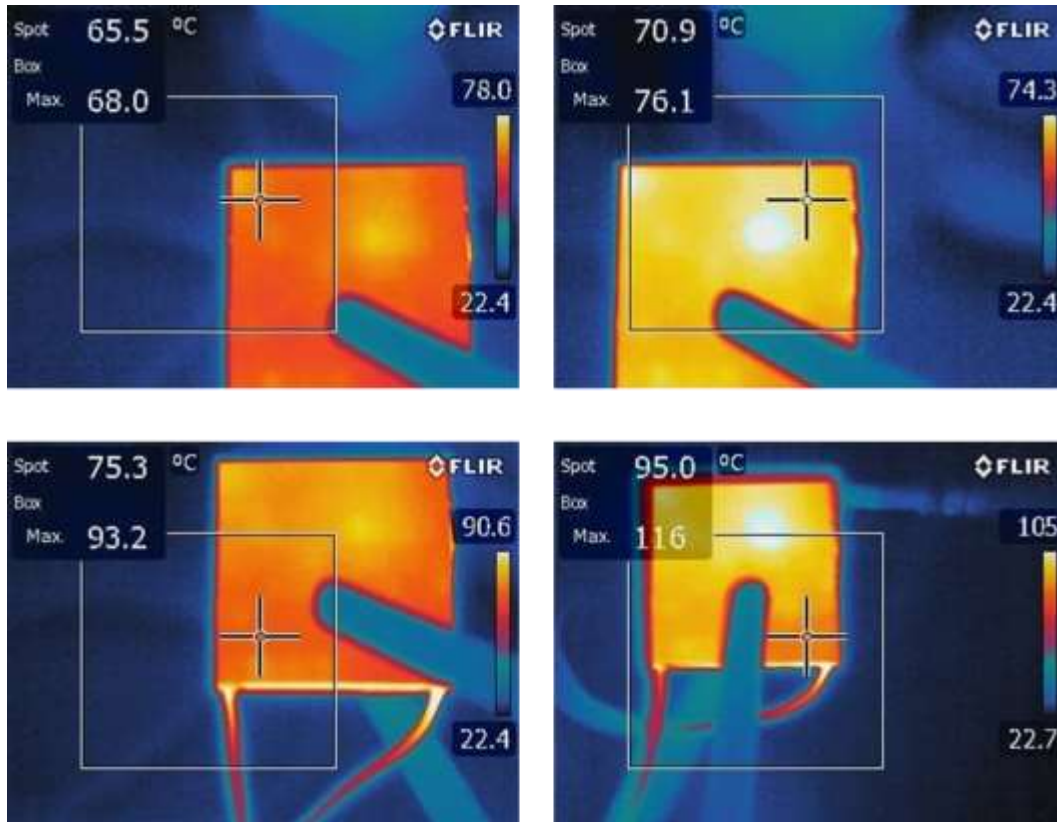


Figura 34. Pruebas al vacío: temperaturas alcanzadas en la cara fría.

4.1.2 Pruebas de celda Peltier con disipador

En la Figura 35 se muestran los resultados obtenidos con la cara fría en contacto con el disipador. Las lecturas corresponden a la cara caliente. Se observan que se obtienen temperaturas entre 135-145 °C, que, si bien son menores a los 150 °C al vacío, sigue siendo necesario también el uso de un disipador o ventilación sobre la cara caliente.

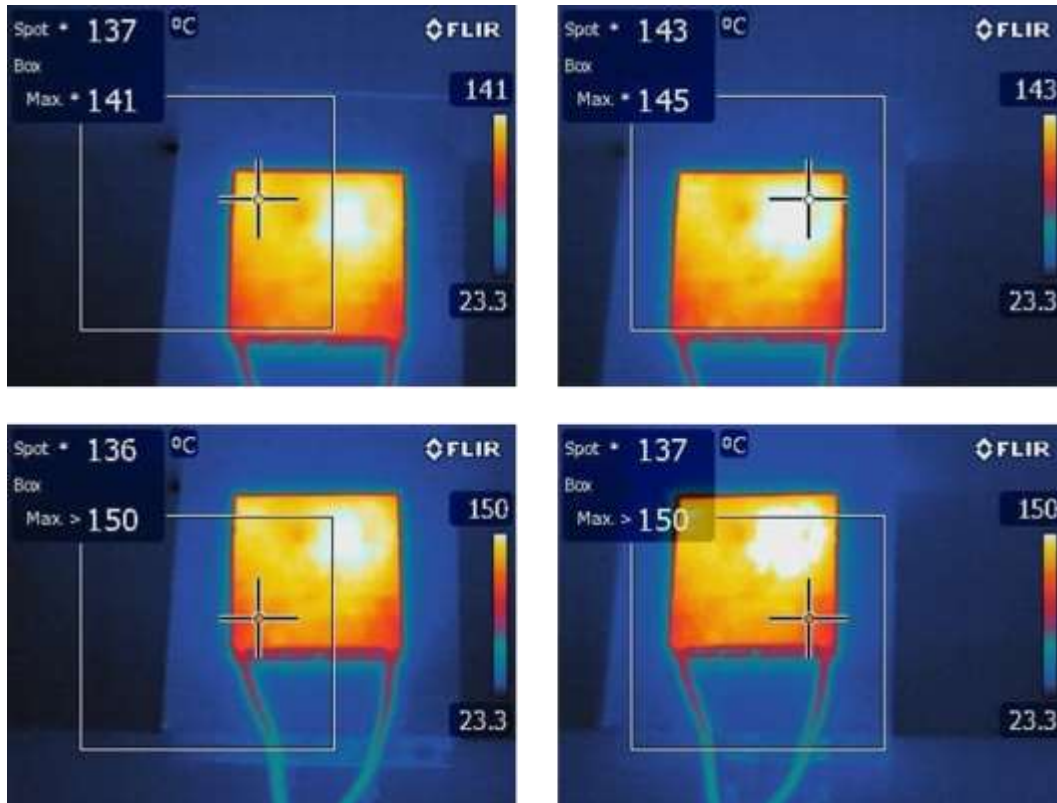


Figura 35. Pruebas con disipador sobre la cara fría: lecturas sobre la cara caliente.

En la Figura 36 se muestran los resultados obtenidos con la cara caliente en contacto con el disipador. Las lecturas corresponden a la cara fría. Se observan que se obtienen temperaturas entre 35-55 °C, la cuales no son temperaturas por debajo de los 0°C que indica el fabricante. Por tanto, sigue siendo necesario también el uso de un disipador o ventilación sobre la cara fría.

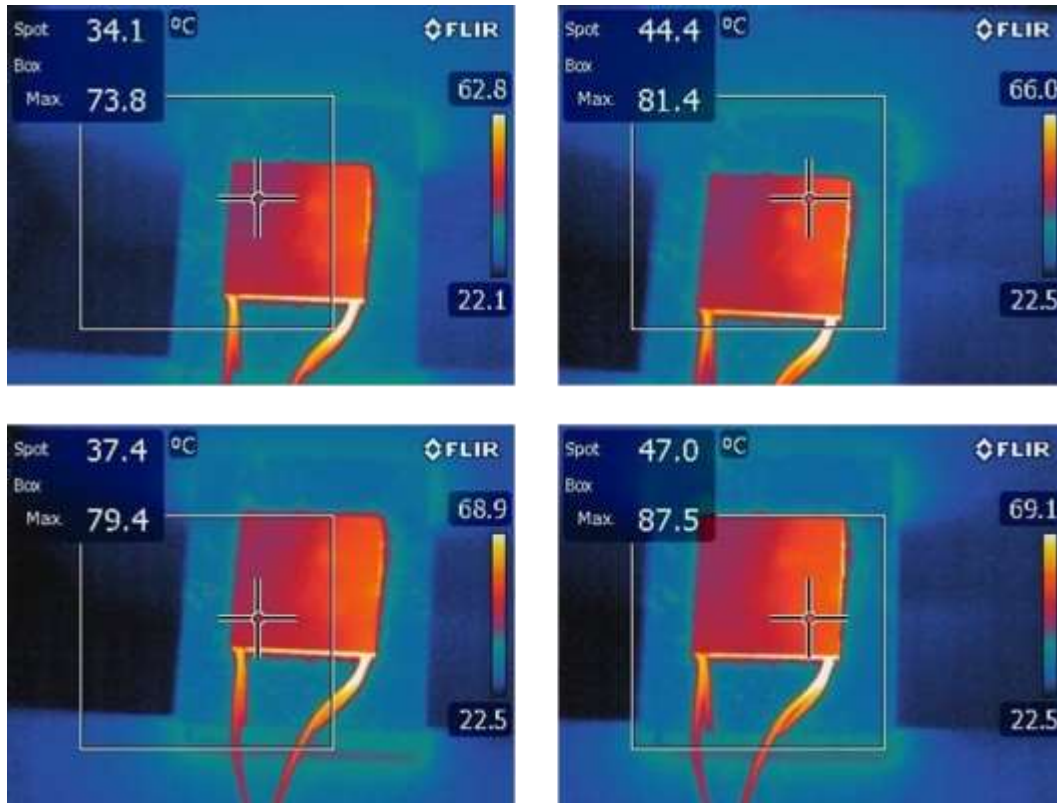


Figura 36. Pruebas con disipador sobre la cara caliente: lecturas sobre la cara fría.

4.1.3 Pruebas de celda Peltier con disipador y ventilador

En la Figura 37 se muestran los resultados obtenidos con la cara fría en contacto con el disipador y empleando el ventilador. Las lecturas corresponden a la cara caliente. Se observan que se obtienen temperaturas entre 135-145 °C. Por tanto, sigue siendo necesario también el uso de un disipador o ventilación sobre la cara caliente de manera simultánea para disminuir temperaturas de operación.

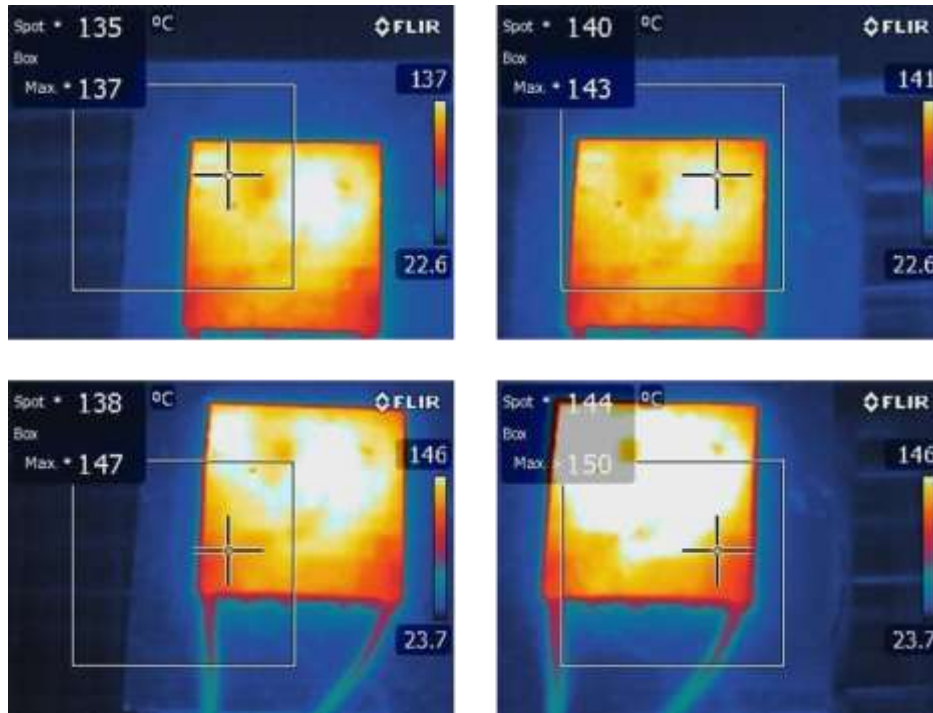


Figura 37. Pruebas con disipador sobre la cara fría y ventilador: lecturas sobre la cara caliente.

En la Figura 38 se muestran los resultados obtenidos con la cara caliente en contacto con el disipador y empleando el ventilador. Las lecturas corresponden a la cara fría. Se observan que se obtienen temperaturas entre 32-37 °C. Por tanto, sigue siendo necesario también el uso de un disipador o ventilación sobre la cara fría de manera simultánea para disminuir temperaturas de operación.

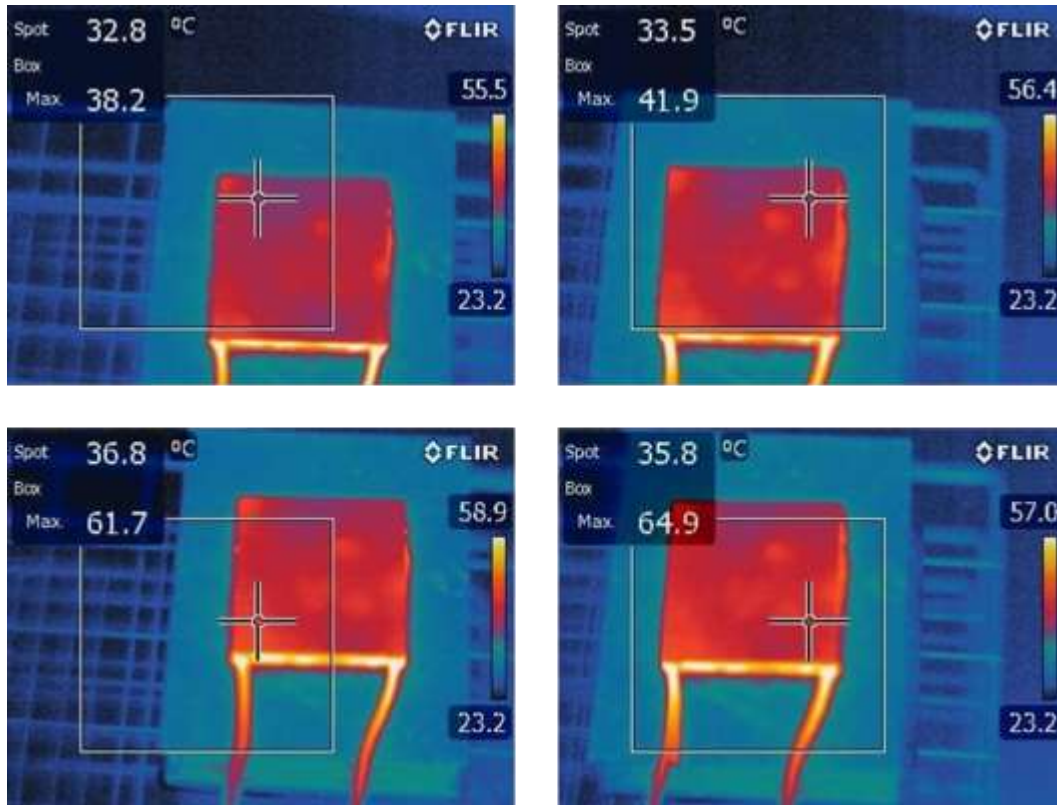


Figura 38. Pruebas con disipador sobre la cara caliente y ventilador: lecturas sobre la cara fría.

4.1.4 Pruebas con bloque de agua fría y disipador

En la Figura 39 se muestran los resultados obtenidos con la cara caliente en contacto con el disipador sumergido en el bloque de agua. Las lecturas corresponden a la cara fría. Se observan que se obtienen temperaturas entre -5 y -20 °C. En este caso, el uso del bloque de agua permite alcanzar las temperaturas señaladas por el fabricante.

Sin embargo, la durabilidad del hielo empleado es corta por lo que se sugiere un dispositivo de refrigeración constante.

Para este trabajo y por el alcance del mismo, no se contempla ningún sistema de refrigeración constante.

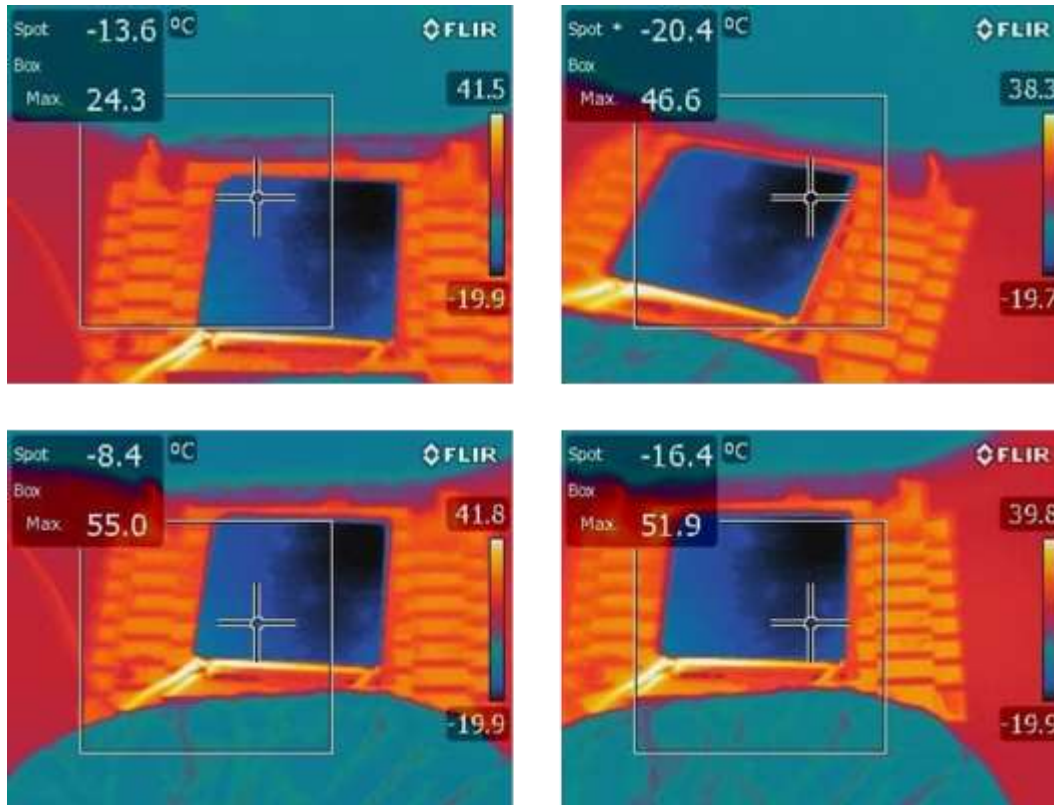
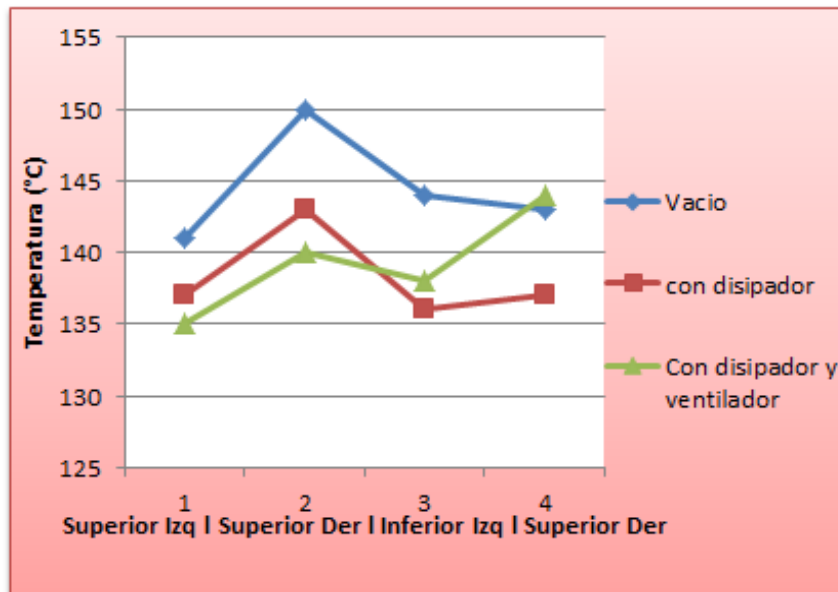


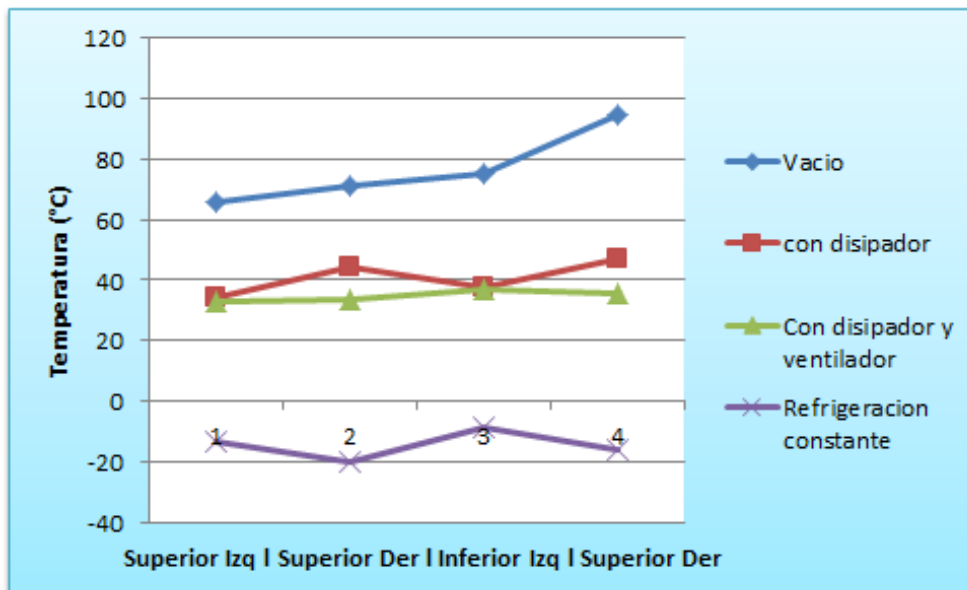
Figura 39. Pruebas con disipador sobre la cara caliente y bloque de agua: lecturas sobre la cara fría.

4.1.5 Graficas comparativas de pruebas con celdas Peltier en las diversas configuraciones

En las gráficas 1 y 2 se presentan los resultados de mediciones obtenidas en las diversas configuraciones construidas. Las mediciones representan las lecturas de temperatura obtenidas en cada esquina de cada cara caliente y fría monitoreada con la cámara térmica. El uso del bloque de agua con hielo permitió llegar a las temperaturas más frías deseadas.



Grafica 1. Temperaturas alcanzadas en la cara caliente de la celda con configuración diferente.



Grafica 2. Temperaturas alcanzadas en la cara fría de la celda con configuración diferente.

4.2 EFICIENCIA DEL BLOQUE DE AGUA PARA CON LA PLACA PRINCIPAL

De la Figura 40 a la 42 se muestra la temperatura inicial de la placa de aluminio con la tubería de cobre que recibirá el enfriamiento estando puesta en el bloque de agua.

Se aprecia que de una temperatura inicial de 21.8 °C (antes del bloque), se alcanzan temperaturas de 16.9 °C (ya con el bloque).

En la Figura 42 se observa un incremento de 4°C de la placa al poner en funcionamiento las celdas y sobre todo al derretimiento rápido del hielo empleado.

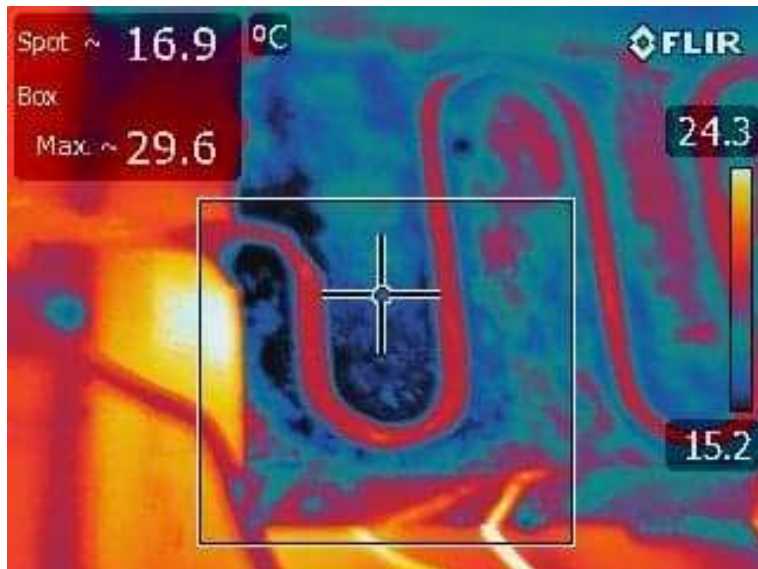


Figura 40. Lugar de la celda Peltier.

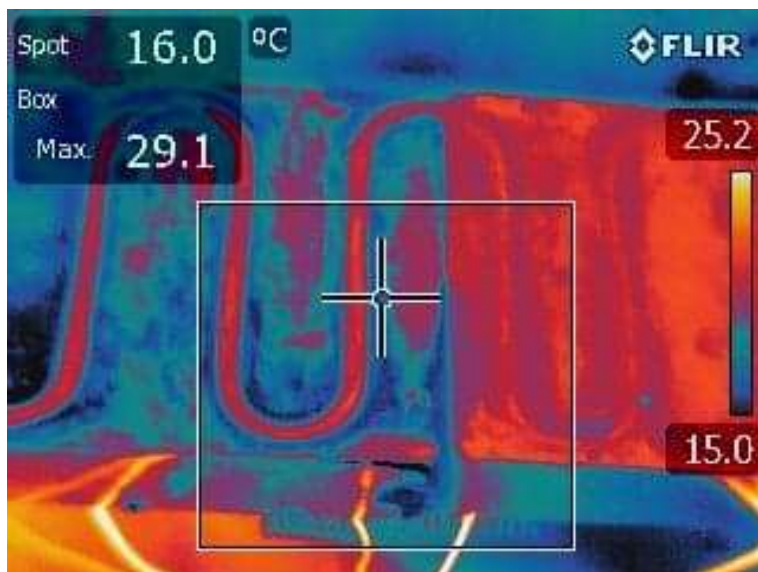


Figura 41. Lugar de la celda Peltier.



Figura 42. Lugar de la celda Peltier.

4.3 PRUEBAS DE PIROLISIS

En la Figura 43 se puede observar el aspecto original del sistema completo en su estructura de soporte.

Con la intervención del presente proyecto, se modificó el mismo realizando las siguientes adecuaciones para lograr la puesta en marcha del sistema:

- Configuración (arreglo) de celdas Peltier adecuada.
- Reingeniería al reactor pirolítico para contar con un sistema hermético y con cero fugas.
- Reingeniería al condensador para cambiar sensores, adaptar fuentes de alimentación a las celdas y a la bomba de circulación forzada y salidas de purga.



Figura 43. Equipo completo original (reactor más condensador).

Se realizaron 3 tipos de pruebas para poner a prueba el sistema.

4.3.1 Primera prueba sin celdas Peltier

En la primera prueba se establecieron estas condiciones de operación, ver Figura 44:

- Operación del equipo por 1 hora.
- Puesta de hielo directamente en el deposito principal del condensador (deposito que contiene el intercambiador de calor).
- Sin funcionamiento el módulo de celdas Peltier.
- 273 g de PS.



Figura 44. *Primera prueba sin celdas Peltier.*

De esta prueba no se obtuvieron los resultados esperados debido a que no ocurre la condensación del gas pirolítico generado por la pirolisis del PS. Así pues, se puede sugerir que el gas no paso a estado líquido por el tiempo de residencia del gas en el deposito más grande ya que el intercambiador solo cuenta con 5 vueltas, ver Figura 45. Por tanto, se establece otra prueba para validar lo anterior.



Figura 45. *Residencia de gas generado por el poliestireno.*

Por otro lado, en la Figura 46 se muestra el aspecto final del PS después de 1 hora de pirolisis. Se observa que adquiere una drástica reducción de tamaño y adopta un aspecto cristalino. Esto ocurre porque en la disolución de un sólido en caliente se genera una disolución saturada que al enfriarse se sobresatura y se llega a producir la cristalización.



Figura 46. Poliestireno cristalizado.

4.3.2 Segunda prueba con celdas Peltier

En la segunda prueba se establecieron estas condiciones de operación, ver Figura 47:

- Operación del equipo por 1 hora.
- Módulo de celdas Peltier en funcionamiento (se emplearon 3 celdas tipo A).
- Bloque de agua en funcionamiento con hielo.
- Deposito principal del condensador sin hielo.
- 273 g de PS.



Figura 47. Segunda prueba con celdas Peltier.

En esta prueba tampoco se obtuvieron los resultados esperados dando un poco más de credibilidad a la hipótesis planteada con anterioridad que es el tiempo de residencia. De igual forma en el reactor se obtuvo el PS cristalizado después de que este llegara a enfriarse por completo, ver Figura 48.



Figura 48. Poliestireno cristalizado de la segunda prueba.

4.3.3 Tercera prueba con celdas Peltier

En la tercera prueba se establecieron estas condiciones de operación, ver Figura 49:

- Operación del equipo por 1 hora.
- Módulo de celdas Peltier en funcionamiento (se emplearon 2 celdas tipo A y 1 celda tipo B).

- Bloque de agua en funcionamiento con hielo.
- Deposito principal del condensador con hielo.
- 273 g de PS.



Figura 49. Prueba con enfriamiento en el cilindro y en los disipadores de las celdas Peltier.

Nuevamente no se obtuvieron resultados positivos. Se considera que el tiempo de residencia no es el pertinente para lograr mejor condensación de los gases. También se obtuvo PS cristalizado, ver Figura 50.



Figura 50. Poliestireno cristalizado de la tercera prueba.

4.4 LECTURAS DE SENSADO DE TEMPERATURA

Empleando un sistema embebido simple se recabaron lecturas de temperatura vs tiempo usando sensores DS18B20 con una interfaz de Arduino. De las Figuras 51 a la 53 se presentan las lecturas obtenidas de cada sensor. En sensor 1 (S1) fue colocado en la parte inferior del depósito principal del intercambiador de calor (serpentín de cobre), el sensor 2 (S2) en la parte superior del depósito y el sensor 3 (S3) en la salida de combustibles líquidos. Se evidencia que el sistema de enfriamiento requiere mejoras para alcanzar temperaturas más frías.

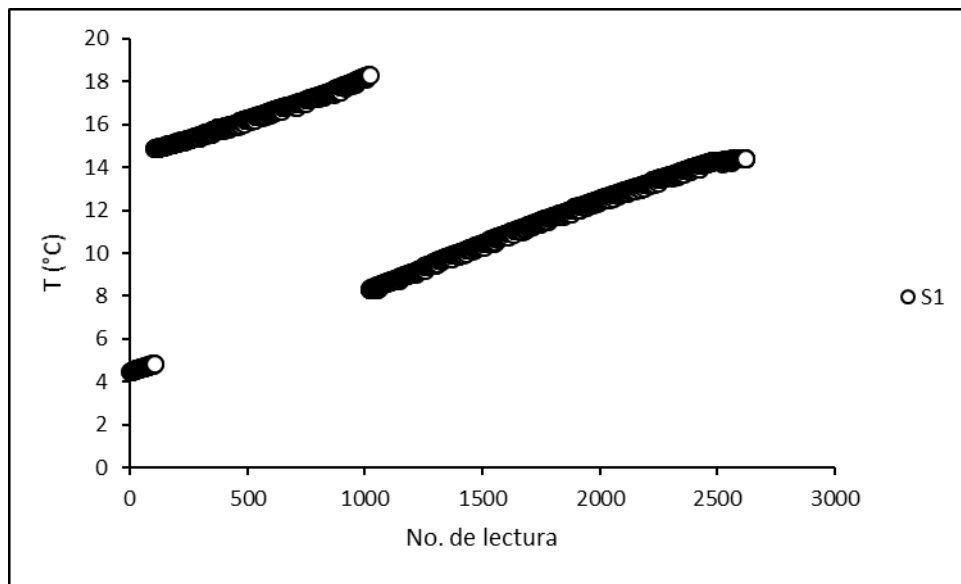


Figura 51. Registro de temperaturas por el sensor 1.

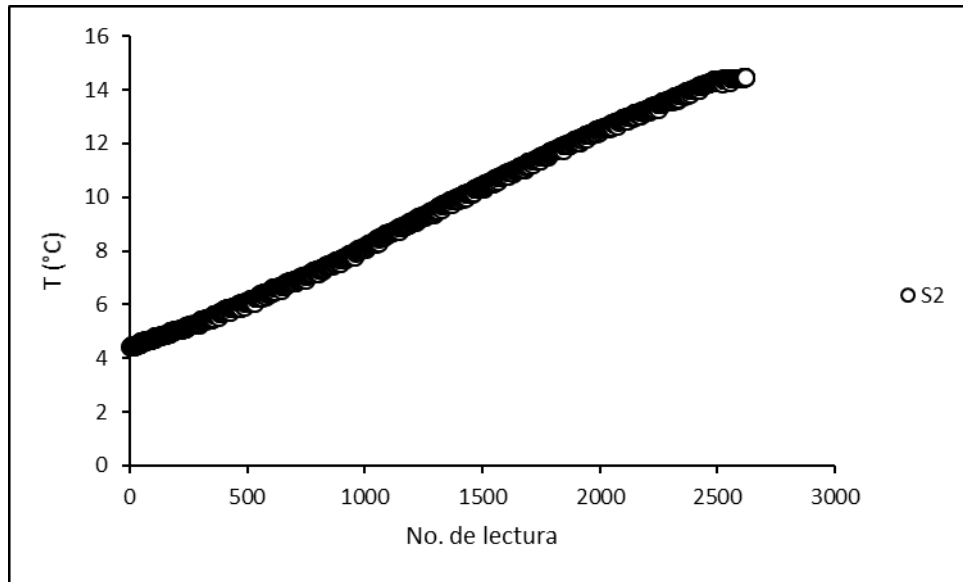


Figura 52. Registro de temperaturas por el sensor 2.

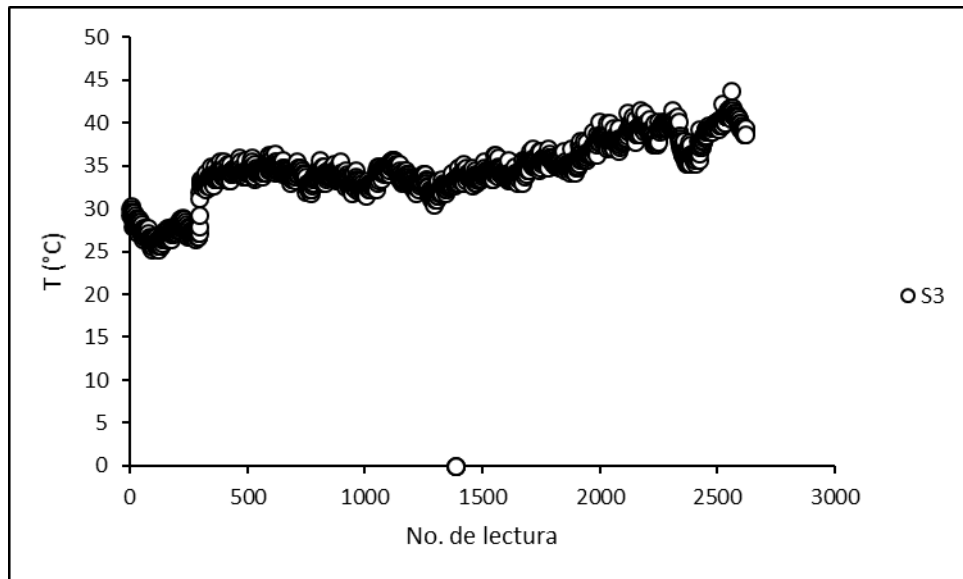


Figura 53. Registro de temperaturas por el sensor 3.

4.5 ANÁLISIS PERT Y CPM

En la Tabla 2 se muestra las actividades y los tiempos predeterminados para realizar cada actividad, los tiempos son representados en segundos.

Tabla 2. Actividades para el análisis pert/cpm

Nombre	Descripción de la actividad	Tiempo de actividad en segundos	Actividad predecesora
A	Selección De material	5	
B	Pesar el material	20	A
C	Depositar material triturado en el reactor	900	B
D	Depositar material triturado en el reactor	900	C
E	Tapar del reactor	3	D
F	Sellar el reactor	240	E
G	Tomar 3 fuentes de poder	9	
H	Tomar multicontacto	9	G
I	Conectar celdas peltier a fuente de poder	25	H
J	Conectar sensores de temperatura a Arduino	5	I
K	Conectar arduino a fuente de poder	3	J
L	Conectar bomba de agua a fuente de poder	7	K
M	Conectar fuentes de poder a multicontacto	5	L
N	Conectar usb del Arduino a laptop	5	M

O	Colocar hielos en bloque	25	
P	Agregar agua al bloque	6	O
Q	Agregar agua al sistema de condensación	16	P
R	Conectar el reactor a multicontacto	4	Q
S	Conectar a las fuentes de poder a multicontacto	5	R
T	Conectar a la corriente el milticontacto	5	S
U	Seleccionar la temperatura del reactor	10	T

En la Figura 54 podemos observar el diagrama pert que muestra las actividades y generando la ruta crítica con la línea roja.

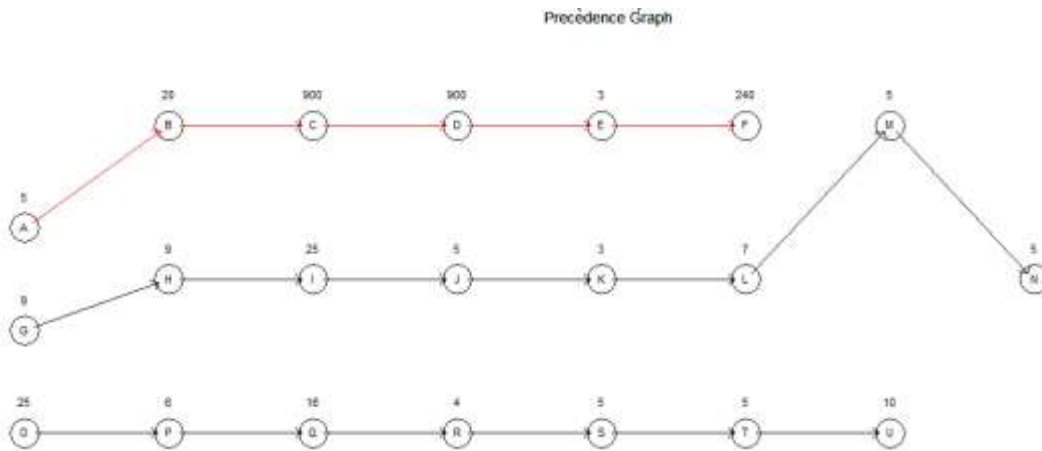


Figura 54. Diagrama Pert.

En el diagrama Gant de la Figura 55 podemos representar el tiempo que conlleva la instalación del sistema que requiere 2068 seg que es igual a 34.46 minutos.

- Las fechas tempranas de inicio y finalización (ES, EF).
- Las fechas tardías de inicio y finalización (LS, LF).

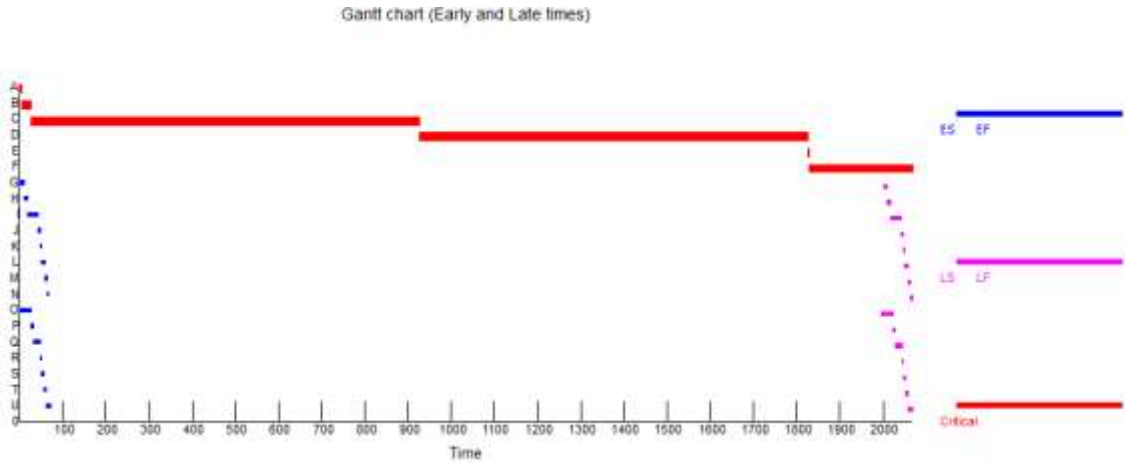


Figura 55. *Diagrama de Gant.*

V. CONCLUSIONES

La aplicación de las estrategias académicas seleccionadas en conjunto con las actividades relacionadas con el presente proyecto permitió alcanzar los objetivos planteados.

Se logró definir una metodología para lograr que el módulo de celdas Peltier pudiera registrar temperaturas bajo 0 °C, sin embargo, al aplicarlo dentro del sistema completo no se lograba una transferencia de calor adecuada. Lo anterior fue coherente con los registros (lecturas) obtenidos por medio de los sensores de temperatura empleados. Se logró poner en operación el reactor pirolítico con el sistema de condensación completo.

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten establecer demás trabajo futuro para poder establecer nuevos proyectos de investigación.

Se logró aplicar un análisis estadístico por diferentes metodologías que permiten validar que los resultados obtenidos son coherentes entre sí.

El proyecto de residencia me permitió validar los conceptos teóricos y prácticos aprendidos durante mi estadía como estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial en proyectos de investigación de ciencia aplicada que simulan situaciones reales dentro de los sectores económicos.

Para llevar a cabo este proyecto se pusieron en práctica los conocimientos y habilidades a lo largo de la carrera, diseño de procesos, investigación de operaciones, experimentación, análisis estadístico, entre otras materias importantes. También se aplicó la investigación y redacción, ya que, al ser un proyecto de esta índole, se necesitan las herramientas básicas para tener un proyecto de calidad, eficiente y eficaz a su vez.

En particular aprendí a adaptarme a trabajos por objetivos. Además de siempre buscar la solución más factible mediante la aplicación de un método analítico y científico para eliminar los problemas desde raíz.

Mi tiempo de residencia profesional interactuando con temas de ciencia aplicada, investigación e innovación tecnológica fue una de las mejores experiencias

profesionales que he vivido y donde aprendí lo importante que es llegar a establecer soluciones viables y resolver el problema raíz de la manera más factible.

VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS

1. Aplique metodologías de la Ingeniería Industrial con base en las necesidades del proyecto de investigación de estudio para incrementar sus diversos indicadores de operación.
2. Aplique métodos cuantitativos y cualitativos en el análisis e interpretación de datos e información para diseñar y construir la metodología de operación requerida.
3. Implementé métodos innovadores de solución de problemas de ciencia, los cuales pueden ser replicados a escala industrial.
4. Gestioné la generación del conocimiento específico para evidenciar la capacidad de acción de la Ingeniería Industrial, ejerciendo un liderazgo estratégico y un compromiso ético.
5. Coadyuve a cumplir los retos de la institución en torno al fomento de proyectos de investigación.
7. Utilice las nuevas tecnologías de información y comunicación de la institución, para el estado del arte del proyecto y contar con información actualizada para la mejora de los procesos de estudio y la operación del equipo del proyecto.
8. Promoví el desarrollo de la ciencia e investigación, con el fortalecimiento de las líneas de investigación de la institución.
9. Aplique métodos de investigación para desarrollar e innovar sistemas y/o procesos industriales.
10. Actúe como agente de cambio para facilitar la mejora continua en los procesos de aprendizaje de la carrera de Ingeniería Industrial de la institución.
11. Aplique métodos, técnicas y herramientas para la solución de problemas presentados durante la fase de ejecución del proyecto.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN

- (1) CEUPE. (2020). ¿Qué es la pirolisis?. Recuperado de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html#:~:text=Sistemas%20alot%C3%A9rmicos%20o%20indirectos%3A%20la,de%20parte%20de%20la%20carga>.
- (2) Morales, M. (2008). PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS - UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. noviembre 08, 2020, de Universidad Autónoma de Madrid Facultad de Ciencias Sección de Ingeniería Química Sitio web: https://documentop.com/22-pirolisis-de-plasticos-universidad-autonoma-de-madrid_5986938a1723ddb404628be2.html
- (3) Gil, J.. (diciembre, 2018). PLASTICOS DE UN SOLO USO. noviembre 08, 2020, de M. Sc. en Ciencia y Tecnología Ambiental Sitio web: <https://rebellion.org/docs/250056.pdf>
- (4) [5] esacademic.com. (s.f.). Refrigeración termoeléctrica. Recuperado de <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/995479>
- (5) Juan Diego de Usera. (noviembre 20, 2019.). Cómo funcionan las células Peltier para refrigerar componentes de PC. noviembre 08, 2020, de HardZone Sitio web: <https://hardzone.es/tutoriales/rendimiento/celulas-peltier-sistema-refrigeracion/>
- (6) Glismir Brito. (septiembre 17, 2019.). Automatización de los Procesos Industriales: una Decisión Acertada. noviembre 08, 2020., de MetalBoss Sitio web: <https://www.metalboss.com.mx/blog/automatizacion-de-los-procesos-industriales>
- (7) Ciencias estadísticas. (febrero 21, 2008.). Introducción al Diseño de Experimentos. noviembre 08, 2020., de Ciencias estadísticas Sitio web: http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/getafe/ciencias_estadisticas/diseno_experimentos/materialest/IntroDE.pdf
- (8) DIONELIS RUFINO. (abril 15, 2013.). Métodos PERT/CPM. noviembre 08, 2020., de Escuela de organización industrial Sitio web: <https://www.eoi.es/blogs/madeon/2013/04/15/metodos-pertcpm/>
- (9) Bello J.. (Abril 01, 2017.). Método pert cpm. noviembre 08, 2020., de SlideShare Sitio web: <https://es.slideshare.net/AndreaBello5/metodo-pert-cpm-74117737#:~:text=En%20otras%20palabras%2C%20para%20lograr,para%20controlar%20y%20monitorear%20el>

ANEXO 1

Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, **11/enero/2021**
No. de Oficio: SDA/MCIMC-003/2021
Asunto: Carta de aceptación de Residencias Profesionales

MA. MAGDALENA CUEVAS MARTÍNEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN
PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el **C. ARMANDO TOVAR VITAL**, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 161050480, ha sido aceptado para realizar en esta institución su proyecto de Residencia Profesional denominado **"Puesta en marcha de un reactor pirolítico automatizado de bajo volumen: análisis del uso de In proceso simple de refrigeración termoelectrónica"** durante el periodo de enero-junio 2021, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 10:00 a 17:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de los docentes Alejandro Puga Vargas (asesor externo) y José Alonso Dena Aguilar (asesor interno). El proyecto será realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía del área de Posgrado de nuestro plantel.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Duro Siempre Faltó"

EDGAR ZACARIÁS MORENO
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



ccp. Archivo

EZMjada



Carretera a la Estación de Ríocón Km 1, C.P.
20170
Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel: (465) 958-2482 y 958-2730, Ext. 201
e-mail: acad_pabteaga@tecnm.mx
tecnm.mx | pabellon.tecnm.mx



ANEXO 2

Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, 4/junio/2021
No. de Oficio: SDA/MC/IMC-025/2021
Asunto: Carta de conclusión de Residencias Profesionales

MA. MAGDALENA CUEVAS MARTÍNEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN
PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el **C. ARMANDO TOVAR VITAL**, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 161050480, concluyo satisfactoriamente en esta Institución su proyecto de Residencia Profesional denominado **"Puesta en marcha de un reactor pirolítico automatizado de bajo volumen: análisis del uso de un proceso simple de refrigeración termoeléctrica"** durante el periodo de enero-Junio 2021, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 10:00 a 17:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de los docentes Alejandro Puga Vargas (asesor externo) y José Alonso Dena Aguilar (asesor interno). El proyecto fue realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía del área de Posgrado de nuestro plantel.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excellencia en Educación Tecnológica
Thru Strategic Focus

EDGAR ZACARÍAS MORENO
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



ccp. Archivo

EZM/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km 1, C.P.
20670
Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. (465) 958-2462 y 958-2730, Ext. 300
e-mail: acad_parteaga@itcnm.mx
itcnm.mx | pabellon.itcnm.mx

