



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Departamento de Ingeniería Industrial

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

PRESENTA:
JAVIER AQUINO LÓPEZ

CARRERA:
INGENIERÍA INDUSTRIAL

***[ANÁLISIS DE DATOS APLICADO A UN PROCESO DE PIRÓLISIS DE
PLÁSTICOS ESTABLECIDO BAJO UNA METODOLOGÍA DOE]***

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



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
Asesor externo

MML. ALEJANDRO PUGA VARGAS
Asesor interno

Diciembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis maestros y compañeros que me apoyaron en cada uno de los semestres y actividades que lleve a cabo durante mi formación como Ing. Industrial. Sé que este logro no hubiera sido posible sin su ayuda, orientación y aliento. Quiero agradecerles por todo lo que han hecho por mí, por creer en mí y por acompañarme en este camino en especial al profesor Alejandro Puga Vargas que fue quien me acompañó en el último año de mi carrera me apoyo y lleno de conocimiento además de su paciencia y profesionalismo.

Quisiera agradecer al Dr. José Alonso Dena Aguilar por la oportunidad que me brindo para la realización de mis residencias y el apoyo que me dio durante mi estadía en su proyecto.

Agradezco a mis padres que han sido mi inspiración y mi motivación para seguir adelante, para superar los obstáculos y para alcanzar mis metas. Gracias por compartir conmigo un poco de su tiempo, su cariño incondicional y sus consejos. Gracias por estar siempre a mi lado, por apoyarme y por celebrar conmigo mis triunfos. Los quiero mucho y les estoy eternamente agradecido. Espero poder retribuirles todo lo que me han dado y hacerlos sentir orgullosos de mí. Ustedes son parte de mi éxito y de mi felicidad.

Quisiera agradecer a una gran persona que tuve la dicha de conocer hace ya varios años y siempre me apoyo y aconsejo para seguir adelante y no rendirme en el camino aun cuando todo parecía complicado, muchas gracias Luis Armando Rodríguez Zapata por tu tiempo y apoyo incondicional.

RESUMEN

“ANÁLISIS DE DATOS APLICADO A UN PROCESO DE PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS ESTABLECIDO BAJO UNA METODOLOGÍA DOE”

Por: **JAVIER AQUINO LÓPEZ**

En este estudio se aplica la metodología de análisis de datos a través de una investigación cuantitativa mediante la puesta en operación de un reactor de pirólisis de plásticos prefabricado para –a través de un experimento de un solo factor– determinar la capacidad de producción del reactor pirolítico bajo un arreglo ortogonal L4(2³) donde se desea comparar cuatro condiciones de operación (corridas).

En particular se aplica un diseño completamente al azar y análisis de varianza. Para el arreglo ortogonal se considero como variables de operación (factores) la cantidad de materia prima (kg), la modalidad de operación (abierta o cerrada) y el tiempo de pirólisis (h); todos ellos con 2 niveles. Bajo las condiciones de operación establecidas se determino que la capacidad del proceso permite una relación peso (kg):volumen (L) de 1:0.8, esto es, por cada kilogramo de plástico pirolizado se obtienen 800 mL de combustible liquido bruto (sin refinar) donde el resto de material se pierde por fugas o son restos no recolectados.

Del análisis de datos por DCA y ANOVA de los resultados experimentales obtenidos, se determina que las corridas 1 y 3, SI generan diferencias y SI son significativamente diferentes.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

MML. Alejandro Puga Vargas

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..... | 1 |
| 1.3 Problema(s) a resolver..... | 3 |
| 1.4 Justificación..... | 4 |
| 1.5 Objetivos..... | 4 |
| 1.5.1 Objetivo general..... | 4 |
| 1.5.2 Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.6 Alcances y limitaciones..... | 6 |
| II. MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 Procedimiento de pirólisis..... | 6 |
| 2.2 Reactor pirolítico componentes y funcionamiento..... | 7 |
| 2.3 Pirólisis de plásticos..... | 8 |
| 2.4 Arreglos ortogonales taguchi..... | 11 |
| 2.5 Diseño completamente al azar (DCA) y análisis de varianza (ANOVA).. | 12 |
| III. DESARROLLO | 13 |
| 3.1 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas..... | 13 |
| 3.1.1 Condiciones de operación de estudio..... | 13 |
| 3.1.2 DCA y ANOVA de estudio..... | 15 |
| 3.2 Cronograma de actividades..... | 15 |
| V. RESULTADOS | 16 |
| 4.1 Resultados del arreglo ortogonal..... | 16 |
| 4.2 Resultados del DCA y ANOVA..... | 22 |
| V. CONCLUSIONES | 26 |

| | Pág. |
|--|------|
| VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS..... | 27 |
| VII. FUENTES DE INFORMACIÓN..... | 28 |
| Anexo 1. Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional..... | 29 |
| Anexo 2. Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional..... | 30 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Serie de arreglos para experimentos con factores a 2 niveles..... | 11 |
| Tabla 2. Arreglo L4(2 ³)..... | 11 |
| Tabla 3. Factores y niveles experimentales empleados en el arreglo L4(2 ³) de estudio..... | 13 |
| Tabla 4. Resultados promedio de las pruebas de extrusión realizadas..... | 16 |
| Tabla 5. Tabla ANOVA para el DCA de los g/min extruidos..... | 23 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia..... | 3 |
| Figura 2. Proceso básico de pirólisis..... | 7 |
| Figura 3. Componentes básicos de un reactor pirolítico..... | 8 |
| Figura 4. Diagrama del proceso de pirólisis..... | 9 |
| Figura 5. Proceso de pirólisis de plásticos..... | 10 |
| Figura 6. Variabilidad en el método DCA..... | 12 |
| Figura 7. Reactor de pirólisis de estudio..... | 14 |
| Figura 8. Materia prima de estudio..... | 15 |
| Figura 9. Cronograma de actividades general..... | 15 |
| Figura 10. Carga de materia prima..... | 16 |
| Figura 11. Materia prima en el reactor..... | 17 |
| Figura 12. Cierre de reactor para iniciar prueba..... | 17 |
| Figura 13. Aislamiento de sistema de calentamiento: inicio de prueba..... | 18 |
| Figura 14. Comprobación física de obtención de gases de pirólisis..... | 18 |

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 15. Comprobación física de combustible líquido bruto obtenido directamente de la condensación en el 1er recipiente: corrida 3..... | 19 |
| Figura 16. Comprobación física de residuos carbonizados obtenidos directamente de la pirólisis de la corrida 1..... | 19 |
| Figura 17. Aspecto de los residuos carbonizados recolectados de la pirólisis de la corrida 1..... | 20 |
| Figura 18. Combustible líquido bruto (sin refinar) obtenido de la corrida 3..... | 20 |
| Figura 19. Subsanado de cama refractaria..... | 21 |
| Figura 20. Subsanado de resistencias eléctricas..... | 22 |
| Figura 21. Formulas ANOVA para el DCA de estudio..... | 23 |
| Figura 22. Prueba de medias de Tukey del presente estudio..... | 25 |

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, desarrollo tecnológico, investigación e innovación acordes a la línea de investigación de conversión de la energía. Esta línea de investigación se enfoca a procesos de conversión de la energía y energías renovables mediante el diseño e integración de procesos orientados para la generación, almacenamiento y uso eficiente de la energía.

Uno de estos proyectos se refiere al desarrollo de un reactor de pirólisis de plásticos.

En este trabajo se aplica la metodología de análisis de datos a través de una investigación cuantitativa de un experimento de un solo factor bajo un arreglo ortogonal $L4(2^3)$ y un diseño completamente al azar y análisis de varianza para definir la capacidad de producción del reactor de pirólisis.

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 al desarrollo del proyecto.

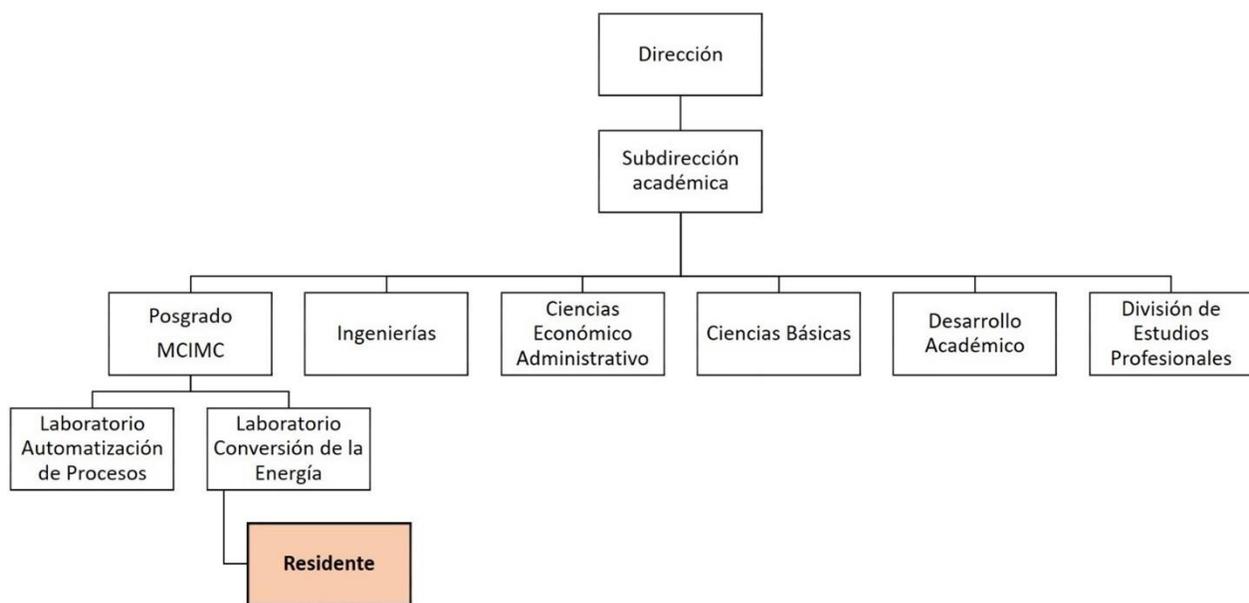


Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.

1.3 Problema(s) a resolver

Dentro del Laboratorio de Conversión de la Energía se llevan a cabo proyectos de desarrollo tecnológico consistentes en la pirólisis de plásticos de reciclaje empleando un

reactor pirolítico de plásticos. Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1. Conocer la capacidad de pirólisis del reactor pirolítico prefabricado.
2. Aplicar técnicas de análisis estadístico y diseño de experimentos para determinar los factores que impactan el proceso de pirólisis realizado en el reactor pirolítico de estudio.

Lo anterior permitirá contar con una metodología base para probar demás condiciones de operación y tener una base de datos robusta de las capacidades de producción del reactor de pirólisis (trabajo futuro).

1.4 Justificación

El aprovechamiento de los plásticos de desechos permite coadyuvar al problema de disposición final de estos contaminantes donde por ejemplo en México se producen cada año 9 mil millones de botellas de PET (SEMARNAT, 2018) y solo el 58% se ha logrado recuperar para reciclaje. Dentro de este contexto, el reciclaje de plásticos de desecho por pirólisis es una alternativa de solución.

Se cuenta con un reactor de pirólisis por lo que se deben realizar pruebas de puesta en operación del reactor para determinar las condiciones de operación más idóneas del proceso establecido bajo una metodología DOE.

Para lo anterior, se debe establecer un análisis de datos que permita caracterizar la funcionalidad del reactor de trabajo

El alcance del proyecto es definir un conjunto variables de operación cuantitativas, poner el reactor pirolítico en funcionamiento bajo estos parámetros y un determinado diseño de experimentos y analizar estadísticamente los datos del proceso.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Aplicar un análisis de datos a un proceso de pirólisis de plásticos mediante técnicas estadísticas para determinar las condiciones de operación más idóneas del proceso establecido bajo una metodología DOE.

1.5.2 Objetivos específicos

- Comprender el proceso de pirólisis del reactor pirolítico de trabajo mediante una revisión exhaustiva de la literatura para elegir condiciones de operación (factores y niveles) y la variable de respuesta idónea.
- Definir un diseño experimental acorde al proceso de pirólisis de estudio mediante la aplicación de la metodología DOE para establecer la matriz experimental.
- Realiza el plan de experimentación definido por la metodología DOE mediante la puesta en operación del reactor pirolítico de trabajo para aplicar técnicas estadísticas a los resultados obtenidos.
- Aplica técnicas estadísticas a los resultados obtenidos mediante gráficas de dispersión, de control o estadística descriptiva para el análisis de datos del proceso.

1.6 Alcances y limitaciones

- Proyecto de investigación a nivel laboratorio.
- Esta fuera de alcance la optimización de la experimentación del diseño de experimentos establecido.
- Ninguna actividad de reingeniería para optimizar el diseño experimental fue realizada.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 PROCEDIMIENTO DE PIRÓLISIS

La pirólisis es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. Los residuos líquidos y gaseosos pueden aprovecharse mediante combustión a través de un ciclo de vapor para la producción de energía eléctrica. El residuo sólido puede utilizarse como combustible en instalaciones industriales, como, por ejemplo, en plantas cementeras. Las características básicas de dicho proceso son las siguientes [1]:

- El único oxígeno presente es el contenido en el residuo a tratar.
- Las temperaturas de trabajo son inferiores a las de la gasificación, oscilando entre 300°C y 800°C.
- Como resultado del proceso se obtiene:
 1. Gas, cuyos componentes básicos son CO, CO₂, H₂, CH₄ y compuestos más volátiles procedentes del cracking de las moléculas orgánicas, conjuntamente con los ya existentes en los residuos. Este gas es muy similar al gas de síntesis obtenido en la gasificación, pero hay una mayor presencia de alquitranes, ceras, etc. en detrimento de gases, debido a que la pirólisis trabaja a temperaturas inferiores a la gasificación.
 2. Residuo líquido, compuesto básicamente por hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles, ceras formados al condensar a temperatura ambiente.
 3. Residuo sólido, compuesto por todos aquellos materiales no combustibles, los cuales o bien no han sido transformados o proceden de una condensación molecular con un alto contenido en carbón, metales pesados y otros componentes inertes de los residuos.

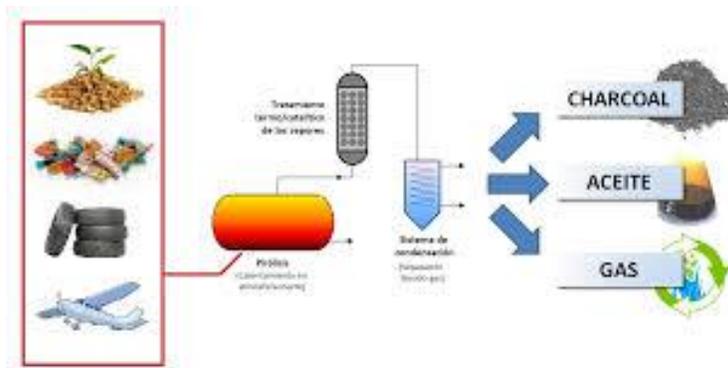


Figura 2. Proceso básico de pirólisis [2].

La pirólisis se lleva a cabo habitualmente a temperaturas de entre 400 °C y 800 °C. A estas temperaturas los residuos se transforman en gases, líquidos y cenizas sólidas denominadas “coque” de pirólisis. Las proporciones relativas de los elementos producidos dependen de la composición de los residuos, de la temperatura y del tiempo que ésta se aplique. Una corta exposición a altas temperaturas recibe el nombre de pirólisis rápida, y maximiza el producto líquido. Si se aplican temperaturas más bajas durante períodos de tiempo más largos, predominarán las cenizas sólidas. El calor requerido para la pirólisis es generado por combustibles tradicionales (gas natural, petróleo, etc.), o mediante el uso de electricidad para crear plasmas de altas temperaturas. Otra de las no tan modernas técnicas de tratamiento pirolítico es la “gasificación”, definida como la transformación de una sustancia sólida o líquida en una mezcla gaseosa mediante oxidación parcial con aplicación de calor. La oxidación parcial se consigue normalmente restringiendo el nivel de oxígeno (o aire) en la cámara de postcombustión (pirólisis). El proceso se optimiza para generar la máxima cantidad de productos gaseosos de descomposición, normalmente monóxido de carbono, hidrógeno, metano, agua, nitrógeno y pequeñas cantidades de hidrocarburos superiores [3].

2.2 REACTOR PIROLÍTICO: COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO

La pirólisis del plástico es un procedimiento de destilación que permite transformar residuos plásticos en carburante. Los residuos son calentados a más de 400 °C en un depósito (reactor) donde se transforma en gas. Según las temperaturas de condensación (refrigeración) de este gas, se obtiene diferentes tipos de carburantes: (1) entre 390 y 170

°C, el gas condensado produce gasóleo (diésel), (2) entre 210 y 20 °C, el gas condensado produce gasolina y (3) por debajo de los 20 °C queda gas residual incondensable que pueda servir para alimentar el calor del procedimiento. Empleando polipropileno (PP) se obtiene gasolina y empleando polietileno de alta (PEAD) y baja densidad (PEBD) se obtiene diésel [4].

Un reactor de pirólisis es un recipiente donde se coloca el material y se calienta, la llama o fuente de calor no está en contacto con el material. A la cámara donde se introdujo el plástico se le retira el oxígeno para evitar reacciones de combustión o quema. Cuando el plástico alcanza su temperatura de evaporación, el gas fluye del recipiente hacia un condensador, en el cual se van recuperando por condensación los diferentes compuestos o combustibles que se pueden obtener y los cuales son recolectados ya en forma líquida. Si a estos últimos combustibles líquidos se someten a calentamientos con temperaturas mayores se pueden obtener mas gas combustible y líquidos como queroseno, gasolina o diésel [5].

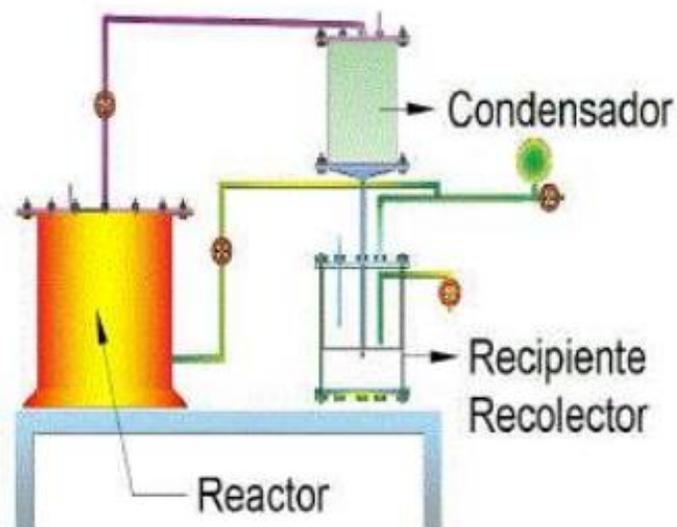


Figura 3. Componentes básicos de un reactor pirolítico [5].

2.3 PIRÓLISIS DE PLÁSTICOS

La pirólisis es una técnica de reciclaje en la que se da la descomposición térmica de los polímeros en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, normalmente a temperaturas entre 300 y 900 °C. Dependiendo de la temperatura a la

cual se dé la pirólisis y otras condiciones de operación del proceso (como presión, flujos o carga de materia prima, velocidad de calentamiento, tiempo de exposición, etc.), pueden obtenerse mezclas de productos sólidos, líquidos y/o gaseosos en diferente proporción y con diferente composición. Normalmente los productos sólidos se clasifican como cenizas y corresponden mayoritariamente a materiales inertes. Los productos gaseosos pueden clasificarse como gas de síntesis (syngas) y contienen los gases no condensables, como H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , CO , CO_2 , entre otros. Por último, el producto líquido suele clasificarse como biocombustible (o combustible sintético) y consiste en una mezcla de olefinas, fenoles y compuestos aromáticos [6].

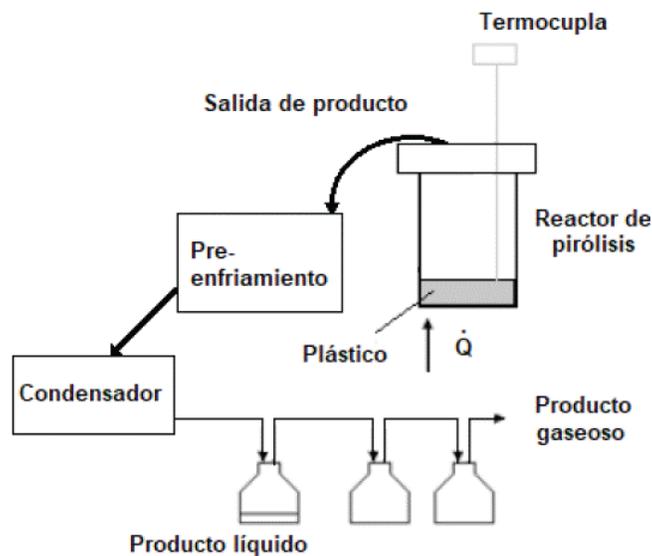


Figura 4. Diagrama del proceso de pirólisis [6].

El reciclaje es un factor de gran importancia porque permite ahorrar energía, evita la explotación de los recursos naturales, reduce la contaminación, permite alargar la vida útil de los vertederos y un largo, etc. De esta forma, el reciclaje contribuye a eliminar los residuos generados, a ahorrar en los procesos industriales y a reducir la explotación de los recursos naturales. Existen diversos tipos de métodos de reciclaje, siendo uno de ellos el reciclaje energético, este tipo de proceso se utiliza en materiales cuyo fin es el aprovechamiento energético y cuyos residuos no pueden ser clasificados y

recuperados; un ejemplo de este reciclaje es la pirólisis. Dentro de este campo, el reciclaje de plástico se puede realizar por pirólisis [7].

En el caso de los plásticos, la pirólisis es la ruptura térmica de una resina (despolimerización) en ausencia total o parcial de aire, acompañada de la generación simultánea de aceites y gases de pirólisis adecuados para la utilización química o la generación de energía. La pirólisis convierte los polímeros en un líquido. El calentamiento de plásticos como el polimetil-metacrilato (PMMA), el poliestireno (PS) y homopolímeros del acetal en ausencia de oxígeno produce monómeros de muy alto rendimiento. Estos monómeros pueden ser aislados, purificados y reutilizados para hacer nuevos polímeros [8].

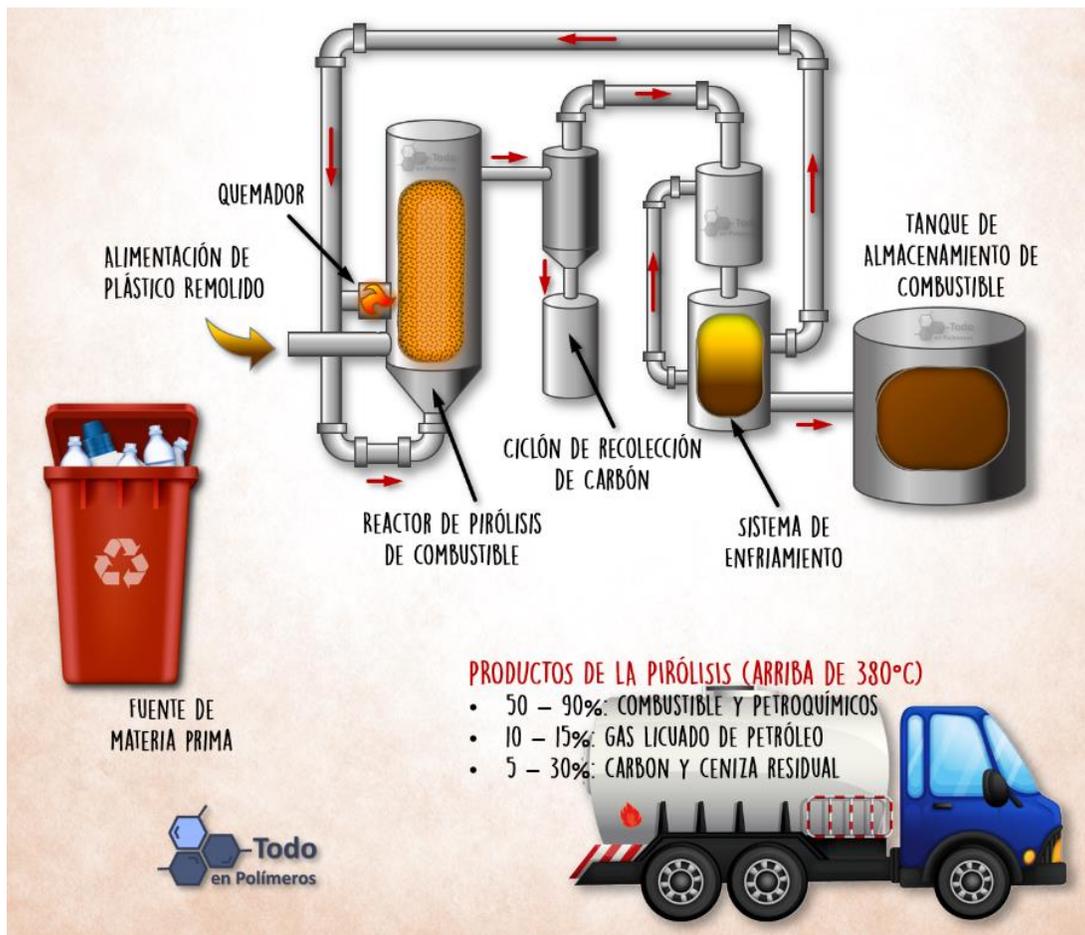


Figura 5. Proceso de pirólisis de plásticos [8].

2.4 ARREGLOS ORTOGONALES DE TAGUCHI

El método de Taguchi ha desarrollado una serie de arreglos para experimentos con factores a dos niveles, los más utilizados y difundidos según el número de factores a analizar son relacionados en la Tabla 1 [9].

Tabla 1. Serie de arreglos para experimentos con factores a 2 niveles [9].

| No. de factores | Arreglo a utilizar | No. de condiciones a probar |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|
| Entre 1 y 3 | L4 | 4 |
| Entre 4 y 7 | L8 | 8 |
| Entre 8 y 11 | L12 | 12 |
| Entre 12 y 15 | L16 | 16 |
| Entre 16 y 31 | L32 | 32 |
| Entre 32 y 63 | L64 | 64 |

Las columnas de los arreglos son balanceadas y ortogonales. Esto significa que, en cada par de columnas, todas las combinaciones de factores ocurren el mismo número de veces. Los diseños ortogonales permiten estimar el efecto de cada factor sobre la respuesta independientemente del resto de los factores [10].

La notación L(corridas) (niveles ^ factores) indica lo siguiente:

- L(corridas) = número de corridas
- (niveles ^ factores) = número de niveles para cada factor ^ número de factores

En la Tabla 2 se presenta un arreglo L4(2³) que significa que el diseño tiene 4 corridas, 3 factores con 2 niveles.

Tabla 2. Arreglo L4(2³).

| Corrida | 1 | 2 | 3 |
|---------|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 2 | 1 | 2 |
| 4 | 2 | 2 | 1 |

2.5 DISEÑO COMPLETAMENTE AL AZAR (DCA) Y ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Muchas comparaciones, como las antes mencionadas, se hacen con base en el diseño completamente al azar (DCA), que es el más simple de todos los diseños que se utilizan para comparar dos o más tratamientos, dado que sólo consideran dos fuentes de variabilidad: los *tratamientos* y el *error aleatorio*. Este diseño se llama *completamente al azar* porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio completo. De esta manera, si durante el estudio se hacen en total N pruebas, éstas se corren al azar, de manera que los posibles efectos ambientales y temporales se vayan repartiendo equitativamente entre los tratamientos [11]. Por otro lado, el análisis de varianza (ANOVA) consiste en separar la variación total observada en cada una de las fuentes que contribuye a la misma. El ANOVA es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. En el caso del DCA se separan la variabilidad debida a los tratamientos y la debida al error. Cuando la primera predomina “claramente” sobre la segunda, es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto (Figura 6b), o dicho de otra manera, las medias son diferentes. Cuando los tratamientos no dominan contribuyen igual o menos que el error, por lo que se concluye que las medias son iguales (Figura 6a) [11].

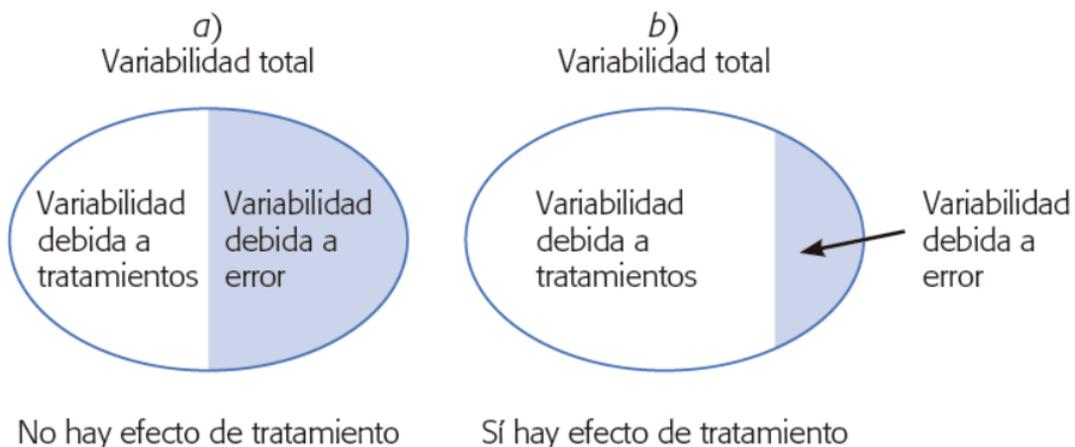


Figura 6. Variabilidad en el método DCA [11].

III. DESARROLLO

3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

3.1.1 Condiciones de operación de estudio

El reactor de pirólisis prefabricado ha sido desarrollado en estudios previos (no presentados), ver Figura 7. Bajo su arquitectura de ingeniería se definió un arreglo ortogonal L4(2³) de las variables de operación de trabajo para llevar a cabo pruebas de pirólisis y obtener datos experimentales de cantidad (L) de combustible bruto líquido (sin refinar), ver Tabla 3.

Tabla 3. Factores y niveles experimentales empleados en el arreglo L4(2³) de estudio.

| Corrida | A | B | C |
|---------|-----|---------|-----|
| 1 | 6.0 | Abierto | 2.5 |
| 2 | 6.0 | Cerrado | 3.0 |
| 3 | 8.0 | Abierto | 3.0 |
| 4 | 8.0 | Cerrado | 2.5 |

Donde:

A = cantidad de materia prima (kg).

B = modo de operación.*

C = tiempo de operación (h).

*El reactor cuenta con un sistema de tren de condensación a base de 4 recipientes cilíndricos (22 L de volumen c/u) y 1 serpentín de cobre (med. 3/8, 10 m) interconectados entre si mediante tubería y válvulas. El recipiente 1 y 2 se encuentran comunicados entre si; el recipiente 2 y 3 se conectan mediante el serpentín; el recipiente 3 y 4 están conectados directamente entre si. SISTEMA ABIERTO, significa que todo el tren de condensación se mantiene con las válvulas de paso abiertas, esto es, que se propone que los gases de pirólisis se transporten por cada uno de los 4 recipientes y el serpentín. SISTEMA CERRADO, significa que únicamente se mantiene la comunicación del reactor

con el 1er recipiente de condensación, es decir, que no se permite el paso de los gases de pirólisis del recipiente 1 al 2 y subsecuentemente con los demás.

Como materia prima de estudio se emplearon plásticos de desecho automotriz. Todas las pruebas de pirólisis se realizaron bajo el tiempo de operación establecido donde al concluir este tiempo se detenía el calentamiento, se dejaba enfriar el equipo por 1-2 horas y se recolectaba el combustible líquido de los recipientes; en el caso de los residuos carbonizados, se recolectaban hasta el día siguiente por razones de seguridad. Todos los materiales se caracterizaban gravimétrica y volumétrica.

Todas las pruebas se realizaron durante días soleados de los meses de octubre y noviembre 2023 con temperaturas ambientes superiores a los 15 °C (se observó que a temperaturas por debajo de los 12 °C provocaban deficiencias operativas y/o requería más tiempo de operación).



Figura 7. Reactor de pirólisis de estudio.



Figura 8. *Materia prima de estudio.*

3.1.2 DCA y ANOVA de estudio

Para realizar los análisis estadísticos correspondientes, se utilizó el software (Minitab) considerando la metodología DCA y ANOVA reportada por [11].

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 | | | | | | | | | | |
| Pruebas experimentales | | | | | | | | | | |
| Análisis de datos | | | | | | | | | | |
| Asesorías | | | | | | | | | | |
| Evaluación y seguimiento de asesorías | | | | | | | | | | |
| Evaluación de reporte | | | | | | | | | | |
| Informe semestral | | | | | | | | | | |
| Elaboración reporte técnico (productos entregables) | | | | | | | | | | |

Figura 9. *Cronograma de actividades general.*

IV. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL ARREGLO ORTOGONAL

Aplicando dos veces el diseño ortogonal $L4(2^3)$ descrito en la Tabla 3, se obtuvieron 8 pruebas en orden aleatorio. Los resultados promedio obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados promedio de las pruebas de extrusión realizadas.

| Corrida | 1er ciclo experimental | | 2do ciclo experimental | |
|---------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | Cantidad de materia prima (kg) | Combustible liquido obtenido (L) | Cantidad de materia prima (kg) | Combustible liquido obtenido (L) |
| 1 | 6.0 | 5.30 | 6.0 | 5.46 |
| 2 | 6.0 | 5.71 | 6.0 | 5.88 |
| 3 | 8.0 | 6.68 | 8.0 | 6.88 |
| 4 | 8.0 | 6.20 | 8.0 | 6.39 |

En las siguientes Figuras se muestran diversas fases del proceso de pirólisis llevado a cabo bajo las condiciones de operación definidas en el arreglo ortogonal seleccionado.



Figura 10. Carga de materia prima.



Figura 11. *Materia prima en el reactor.*



Figura 12. *Cierre de reactor para iniciar prueba.*



Figura 13. Aislamiento de sistema de calentamiento: inicio de prueba.



Figura 14. Comprobación física de obtención de gases de pirólisis.



Figura 15. Comprobación física de combustible líquido bruto obtenido directamente de la condensación en el 1er recipiente: corrida 3.



Figura 16. Comprobación física de residuos carbonizados obtenidos directamente de la pirólisis de la corrida 1.



Figura 17. Aspecto de los residuos carbonizados recolectados de la pirólisis de la corrida 1.



Figura 18. Combustible líquido bruto (sin refinar) obtenido de la corrida 3.

En todas las corridas, el líquido resultante en el 1er recipiente de condensación presento un color café oscuro, mientras que el líquido recolectado en el 2do recipiente presento un color claro amarillento. En ninguna prueba en sistema abierto se recolecto combustible líquido tanto en el serpentín como en los recipientes 3 y 4.

Siendo importante resaltar que durante las pruebas de pirólisis se detectaron las siguientes áreas de mejora:

- Fallas operativas del reactor en su sistema de cerrado hermético: se habilito un sellado de fugas empleando material de desecho de llanta de bicicleta convencional (esto evito fugas por la tapa de cierre).
- Fallas operativas del sistema de calentamiento: se subsano una resistencia que presento un corto circuito.
- Fallas operativas en la cama refractaria: se subsano el pegado de ladrillo refractario y se mejoro el diseño de la arquitectura refractaria para una mejor cobertura del reactor y evitar que se desga nuevamente el pegado con mortero.
- Se aplico una nueva capa de aislamiento con fibra de vidrio y aluminio en la parte superior del reactor.



Figura 19. *Subsanado de cama refractaria.*



Figura 20. *Subsanado de resistencias eléctricas.*

4.2 RESULTADOS DEL DCA Y ANOVA

Para el análisis estadístico por DCA y ANOVA se estableció como variable de respuesta: L de combustible líquido bruto sin refinar obtenido de cada prueba de pirólisis.

La estrategia experimental fue aplicar dos veces las cuatro corridas en orden completamente aleatorio (las 8 pruebas en orden aleatorio). En la Tabla 4, se muestran las cantidades (L) de combustible líquido bruto sin refinar obtenido en cada corrida.

Al aplicar la metodología DCA, se supone que, además de las corridas, no existe ningún otro factor que influya de manera significativa sobre las variables de respuestas.

Para la comparación de las corridas (tratamientos) se prueban las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$$H_1: \text{al menos una } \mu_i \text{ es distinta}$$

Donde, en caso de aceptar la H_0 se concluye que, la cantidad (L) de combustible líquido bruto obtenido en cada corrida, en cuanto a sus medias (μ_i) son estadísticamente

iguales; pero en caso de rechazar H_0 , se concluye que al menos una media es estadísticamente diferente.

En este estudio se considero el modelo estadístico lineal del DCA

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde μ es el parámetro de escala común a todas las corridas experimentales del arreglo ortogonal de estudio; τ_i media global, es un parámetro que mide el efecto de la corrida i ; ε_{ij} es el error atribuible a la medición Y_{ij} .

Se empleo las siguientes formulas para ANOVA para el DCA:

| <i>FV</i> | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | F_0 | Valor- <i>p</i> |
|--------------|--|-----------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Tratamientos | $SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y_{..}^2}{N}$ | $k - 1$ | $CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$ | $\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$ | $P(F > F_0)$ |
| Error | $SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$ | $N - k$ | $CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$ | | |
| Total | $SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$ | $N - 1$ | | | |

Figura 21. Formulas ANOVA para el DCA de estudio [11].

Para el análisis estadístico de los resultados promedio de pirólisis promedio se establecieron las siguientes:

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la variable de respuesta de combustible liquido bruto sin refinar obtenido en cada corrida:

Tabla 5. Tabla ANOVA para el DCA de los g/min extruidos.

| Replica | Tratamiento | | | |
|---------|-------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 5.30 | 5.71 | 6.68 | 6.20 |
| 2 | 5.46 | 5.88 | 6.88 | 6.39 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|----------|----|---------|---------|---------|---------|
| Corridas | 3 | 2.19366 | 0.73122 | 45.22 | 0.002 |
| Error | 4 | 0.06468 | 0.01617 | | |
| Total | 7 | 2.25834 | | | |

Empleando tablas de distribución F para un nivel de significancia de 0.05, se tiene un valor de F-Tabla = 6.49

Regla de decisión: F-Value = 45.22 > F-Tabla = 6.49, se rechaza H_0 .

Conclusión: Por lo que al menos una corrida experimental SI genera diferencias en la cantidad (L) de combustible liquido obtenida.

Aplicando pruebas de medias mediante prueba de Tukey para determinar que corridas (en pareja) son los que hacen diferencia:

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

| Factor | N | Mean | Grouping |
|--------|---|--------|----------|
| 3 | 2 | 6.775 | A |
| 4 | 2 | 6.2930 | A B |
| 2 | 2 | 5.7991 | B C |
| 1 | 2 | 5.3795 | C |

Means that do not share a letter are significantly different.

Regla de decisión: Las medias 1 y 3 (corridas 1 y 3) no comparten ninguna letra, por lo que ambas son significativamente diferentes, es decir, que las corridas 1 y 3 influyen en la variable de respuesta, por lo que se debe establecer otro criterio para poder definir cual seria la mejor corrida que brinde los mejores resultados. Para este estudio esta fuera de alcance analizar los datos bajo otro criterio de decisión.

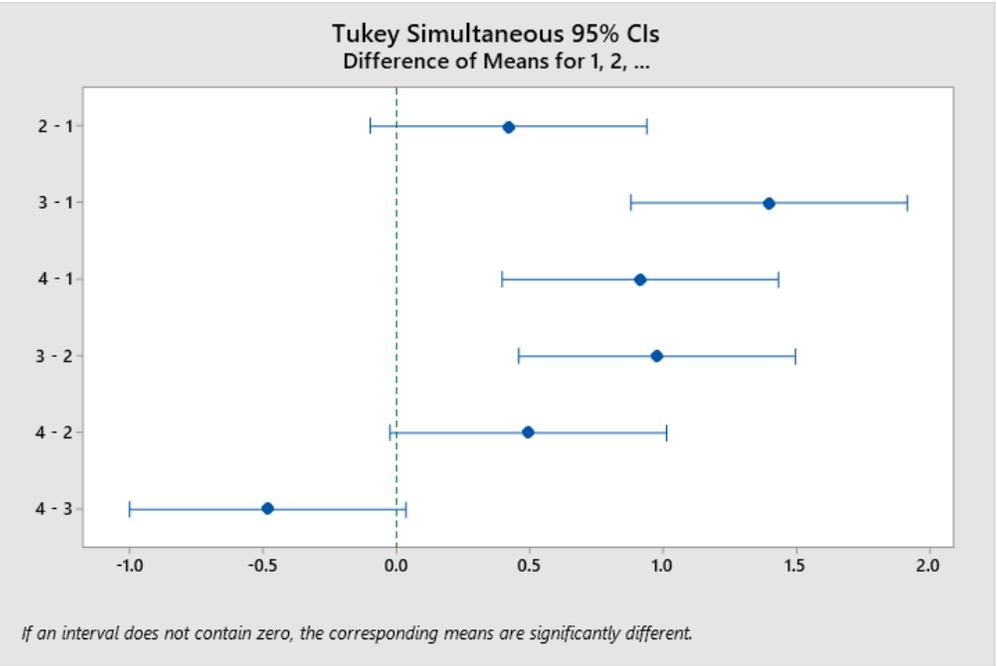


Figura 22. Prueba de medias de Tukey del presente estudio.

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 realizar pruebas de pirólisis en un reactor de pirólisis prefabricado bajo un diseño ortogonal experimental $L4(2^3)$ en donde se definieron como variables de operación: la cantidad de materia prima (kg), la modalidad de operación (abierta o cerrada) y el tiempo de pirólisis (h). Donde en promedio, por cada kilogramo de plástico pirolizado se obtienen 800 mL de combustible líquido bruto (sin refinar) donde el resto de material se pierde por fugas o son restos no recolectados. Del análisis de datos por DCA y ANOVA de los resultados experimentales obtenidos, se determina que las corridas 1 y 3 SI generan diferencias y SI son significativamente diferentes; por lo que se debe establecer otro criterio para poder definir cual sería la mejor corrida que brinde los mejores resultados. Para este estudio esta fuera de alcance analizar los datos bajo otro criterio de decisión.

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 desarrollo tecnológico a nivel prototipo. Para llevar a cabo este proyecto se pusieron en práctica los conocimientos y habilidades a lo largo de la carrera, procesos de fabricación, estadística inferencial, control estadístico de la calidad, 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 desarrollo tecnológico, investigación e innovación 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 desarrollo tecnológico de estudio para incrementar sus diversos indicadores de operación.
2. Aplique técnicas de procesos de fabricación, estadística inferencial y control estadístico de la calidad.
3. Implementé métodos innovadores de solución de problemas de tecnología a través de la mejora de procesos, 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 desarrollo tecnológico.
6. 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.
7. Promoví el desarrollo de la ciencia e investigación, con el fortalecimiento de las líneas de investigación de la institución.
8. Aplique métodos de investigación para desarrollar e innovar sistemas y/o procesos industriales.
9. Actúe como agente de cambio para facilitar la mejora continua en los procesos de aprendizaje de la carrera de Ingeniería Industrial de la institución.
10. Aplique métodos, técnicas y herramientas para la solución de problemas presentados durante la fase de ejecución del proyecto.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. (s. f.). Valorización energética/tratamientos térmicos: pirólisis. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirólisis.aspx>
- [2] Insignia. (19 nov 2018). Pirólisis. Recuperado de <https://elinsignia.com/2018/11/19/pirólisis-2/>
- [3] Pirólisis, una técnica de tratamiento térmico no tradicional. Recuperado de <https://saludsindanio.org/sites/default/files/documents-files/1463/Pirólisis.pdf>
- [4] Low-Tech Lab. (s. f.). Pirólisis de plásticos. Recuperado de https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Pyrolyseur_de_plastique/es
- [5] Fernández, H. (s. f.). ¿Qué tipos de máquinas se utilizan para la pirólisis de plásticos?. Recuperado de <https://es.quora.com/Qu%C3%A9-tipo-de-maquinas-se-utilizan-para-la-pirólisis-de-plasticos>
- [6] Amar-Gil, S., Ardila-Arias, A. N. & Barrera-Zapata, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2). doi: <http://dx.doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>
- [7] La trinchera reciclados. (s. f.). Tipos de reciclaje y en que consisten. Recuperado de <https://recicladoslatrinchera.com/tipos-de-reciclaje-y-en-que-consisten/>
- [8] Todo en polímeros. (14 ago 2020). La pirólisis como fuente de materia prima. Recuperado de <https://todoenpolimeros.com/2020/08/14/la-pirólisis-como-fuente-de-materia-prima/>
- [9] Pentón-Saucedo, A. E. & d.-Castillo-Serpa, A. (2012). Aplicación de la Tabla Ortogonal en el diseño de los casos de prueba de Software. *Revista Avanzada Científica*, 15(2), p12.
- [10] Minitab.com. (2019). Catálogo de diseños de Taguchi. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/catalogue-of-taguchi-designs/>
- [11] Gutiérrez-Pulido, H, & De la Vara-Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (2ª edición). McGraw-Hill Interamericana.

ANEXO 1

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



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, **15/agosto/2023**

Oficio No. DEPI011/2023

Asunto: Carta de aceptación de Residencias Profesionales

JULISSA ELAYNE COSME CASTORENA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el(la) **C. JAVIER AQUINO LÓPEZ**, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control T71050236, ha sido aceptado(a) para realizar en esta Institución su Residencia Profesional a través de proyecto interno de carácter local en el ámbito de Investigación, denominado "**Análisis de datos aplicado a un proceso de pirólisis de plásticos establecido bajo una metodología DOE**" durante el periodo de agosto-diciembre 2023, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 09:00 a 16:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de los investigadores José Alonso Dena Aguilar (asesor externo) y Alejandro Puga Vargas (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®
"Tierra Siempre Fértil"®

EDGAR ZACARÍAS MORENO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo

EZM/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km. 1 C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. 465 958-2482 e-mail: depi_parteaga@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
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, 8/diciembre/2023
Oficio No. DEPI030/2023
Asunto: Carta de conclusión de Residencias Profesionales

JULISSA ELAYNE COSME CASTORENA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el **C. JAVIER AQUINO LÓPEZ**, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 171050236, concluyo satisfactoriamente en esta Institución su Residencia Profesional a través de proyecto interno de carácter local en el ámbito de Investigación, denominado **“Análisis de datos aplicado a un proceso de pirólisis de plásticos establecido bajo una metodología DOE”** durante el periodo de agosto-diciembre 2023, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 09:00 a 16:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de los investigadores José Alonso Dena Aguilar (asesor externo) y Alejandro Puga Vargas (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

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Tierra Siempre Fértil"®

EDGAR ZACARÍAS MORENO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
EZM/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km. 1 C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. 465 958-2482 e-mail: depi_parteaga@tecnm.mx tecnm.mx | pabellon.tecnm.mx

