



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:
FABIÁN ALEJANDRO PIZAÑA VALADEZ

CARRERA:
INGENIERÍA INDUSTRIAL

***[DISEÑO DE UN PROCESO A ESCALA DE LABORATORIO DE
TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE VEGETAL DE MALEZAS:
IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN Y PROPUESTA DE
ESCALAMIENTO A NIVEL PLANTA PILOTO]***

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



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
Asesor externo

M. en C. OSCAR MARTIN NÁJERA SOLÍS
Asesor interno

Diciembre de 2020

AGRADECIMIENTOS

Sin duda alguna, mi familia es parte fundamental de este logro ya que sin su apoyo esto no sería posible, cada palabra de aliento, abrazo era un empujón más para llegar a la cima de este proceso. Mis compañeros de clase son los actores principales de esto ya que hombro a hombro tratamos de no desanimarnos y seguir unidos para lograr estar en este punto un abrazo a todos aquellos que lo lograron y animo a los que están por llegar.

A mis maestros y personal del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga quienes se han entregado a sus labores de una manera profesional y siempre dispuestos a resolver cualquier duda o situación de conflicto.

De la misma manera, al M. en C. Oscar Martin Nájera Solís que acepto ser mi asesor interno ya que su conocimiento y motivación fue lo que me hizo encontrar el sentido al proyecto y tratar de alcanzar los objetivos deseados.

Por último y no menos importante, al Dr. José Alonso Dena Aguilar y a la LAQB. Marycarmen García López ya que fueron quienes vivieron cada proceso conmigo, quienes creyeron en mi para llevar a cabo este proyecto y que con sus conocimientos, asesorías y comentarios llegamos al fin de lo esperado.

Gracias a todos

RESUMEN

“DISEÑO DE UN PROCESO A ESCALA DE LABORATORIO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE VEGETAL DE MALEZAS: IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN Y PROPUESTA DE ESCALAMIENTO A NIVEL PLANTA PILOTO”

Por: **FABIÁN ALEJANDRO PIZAÑA VALADEZ**

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 biodiesel. Se estudia la producción de biodiesel a partir de la transesterificación de aceite vegetal proveniente de malezas para sus posibles aplicaciones en la obtención de energéticos no convencionales.

Para producir biodiesel se pueden emplear aceites vegetales, por lo tanto, es necesario contar con un aceite vegetal para poder llevar a cabo reacciones de transesterificación. El aceite vegetal puede ser obtenido de semillas u otras partes de las plantas a través de procesos mecánicos o químicos. En el caso de una reacción de transesterificación se emplean comúnmente alcoholes con un catalizador básico para propiciar que los triglicéridos del aceite vegetal reaccionen a ésteres (biodiesel) y glicerina (subproducto).

Las malezas son plantas que crecen de manera silvestre y se les considera como plantas indeseables en los campos de cultivos alimentarios debido a que crecen de forma agresiva e impiden el desarrollo de otras especies. Una maleza está

compuesta de raíces, tallo, hojas, flores y semillas, por lo que, en particular, las semillas podrían ser empleadas en estudios de obtención de biodiesel a partir de ellas. Debido a lo anterior, se pueden emplear especies arvenses (malezas) como la aceitilla amarilla (*Bidens ferulifolia (Jacq.) DC.*) o acahualillo (*Simsia amplexicaulis (Cav.) Pers.*) para estudiar su capacidad de producción de biodiesel bajo ciertas condiciones y variables de operación y así dar un valor agregado a estas especies.

En este trabajo se aplicaron técnicas y metodologías de la Ingeniería Industrial para establecer un diseño experimental ortogonal de Taguchi que permita realizar procesos de transesterificación de un aceite vegetal obtenido a partir de malezas. El proceso de transesterificación se desarrolla bajo reacciones químicas con variables de estudio como volumen de aceite vegetal (resultante de procesos previos de extracción), volumen de alcohol para el proceso de transesterificación y cantidad de catalizador.

La propuesta de solución consistió en estudiar la posibilidad de obtención de biodiesel a partir de una reacción de transesterificación de un aceite vegetal de malezas. Se logró establecer un diseño experimental que permitió realizar reacciones de transesterificación bajo diferentes condiciones de reacción. Se propone que el biodiesel obtenido sea sometido a pruebas de caracterización simple y complejas.

Este trabajo es parte de un proyecto global de producción de biodiesel a partir de malezas. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto de residencia especificados por la Institución proponente del proyecto. Por tanto, los reportes de residencia de los participantes comparten las mismas secciones básicas y logros del documento de residencia. En este estudio se presentan los resultados obtenidos del proceso de transesterificación de un aceite vegetal extraído en un trabajo colaborativo. Lo anterior bajo minuta de la Academia de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar
M. en C. Oscar Martín Nájera Solís

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..... | 4 |
| 1.4 Justificación..... | 5 |
| 1.5 Objetivos..... | 6 |
| 1.5.1 Objetivo general..... | 6 |
| 1.5.2 Objetivos específicos..... | 6 |
| II. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 2.1 ENERGÍAS RENOVABLES..... | 8 |
| 2.2 BIOCOMBUSTIBLES..... | 9 |
| 2.3 ACEITE VEGETAL USADO PARA RECICLADO..... | 10 |
| 2.4 BIODIÉSEL..... | 12 |
| 2.4.1 Propiedades físicas y químicas del biodiésel..... | 13 |
| 2.5 EXTRACCIÓN DE ACEITES VEGETALES POR DESTILACIÓN SOXHLET Y DESTILACIÓN SIMPLE..... | 15 |
| 2.6 ESPECIES ARVENSES (MALEZAS)..... | 20 |
| 2.7 DISEÑOS DE PLANTAS DE BIODIÉSEL..... | 23 |
| 2.8 DISEÑO DE TAGUCHI (ARREGLOS ORTOGONALES)..... | 26 |
| 2.9 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES FISICOQUÍMICOS.... | 29 |
| 2.10 DISEÑO DE BLOQUES COMPLETAMENTE AL AZAR (DCBA)..... | 30 |
| 2.11 CUADROS LATINOS Y GRECOLATINOS..... | 32 |
| 2.12 PERT CPM..... | 33 |
| 2.13 MINITAB..... | 35 |
| III. DESARROLLO | 36 |
| 3.1 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas..... | 36 |

| | Pág. |
|---|-----------|
| 3.1.1 Recolección y acondicionamiento de malezas..... | 36 |
| 3.1.2 Variables de operación (factores y niveles) del proceso de extracción..... | 36 |
| 3.1.3 Diseño experimental ortogonal de Taguchi..... | 37 |
| 3.1.4 Proceso de extracción de aceite vegetal..... | 38 |
| 3.1.5 Prueba de caracterización de biodiesel..... | 39 |
| 3.1.6 Escalamiento de proceso de nivel laboratorio a nivel planta piloto..... | 41 |
| 3.1.7 PERT CPM de los procesos..... | 41 |
| 3.1.8 Diseño completamente al azar (DCA)..... | 41 |
| 3.1.9 MINITAB para los procesos..... | 41 |
| 3.2 Cronograma de actividades..... | 42 |
| IV. RESULTADOS..... | 43 |
| 4.1 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL..... | 43 |
| 4.2 CARACTERIZACIÓN DE BIODIESEL LOGRADO..... | 46 |
| 4.3 PERT Y CPM..... | 49 |
| 4.4 DCA (DISEÑO COMPLETAMENTE AL AZAR)..... | 52 |
| 4.5 ESCALAMIENTO DE PROCESO DE NIVEL LABORATORIO A NIVEL PLANTA PILOTO..... | 60 |
| V. CONCLUSIONES..... | 63 |
| VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS..... | 64 |
| VII. FUENTES DE INFORMACIÓN..... | 65 |
| Anexo 1. Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional..... | 69 |

Pág.

Anexo 2. Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional.....

70

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del biodiesel..... | 14 |
| Tabla 2. Serie de arreglos para experimentos con factores a 2 niveles..... | 29 |
| Tabla 3. Arreglo L4(2 ³)..... | 30 |
| Tabla 4. Condiciones de operación de las muestras de aceite vegetal de estudio. | 36 |
| Tabla 5. Factores y niveles experimentales..... | 37 |
| Tabla 6. Factores y niveles experimentales empleadas en un arreglo L4(2 ³)..... | 38 |
| Tabla 7. Condiciones de pruebas de transesterificación..... | 38 |
| Tabla 8. Clasificación de prueba de lámina de cobre..... | 40 |
| Tabla 9. Resultados concentrados de prueba de flama..... | 46 |
| Tabla 10. Antecedentes de PERT y CPM..... | 51 |
| Tabla 11. CPM y PERT..... | 51 |
| Tabla 12. Diseño Completamente al Azar..... | 52 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia..... | 4 |
| Figura 2. Energías renovables existentes..... | 9 |
| Figura 3. Biocombustibles en el mundo..... | 10 |
| Figura 4. Proceso para la recolección e utilización del aceite vegetal reciclado.... | 12 |
| Figura 5. Biodiésel de aceite vegetal reciclado..... | 15 |
| Figura 6. Principales etapas de producción de biodiesel..... | 16 |
| Figura 7. Análisis de propiedades Fisicoquímicas de Transesterificación..... | 17 |
| Figura 8. Montaje del sistema de reacción a nivel laboratorio..... | 19 |
| Figura 9. Caracterización del Biodiesel a nivel laboratorio..... | 20 |
| Figura 10. Plantas arvenses (malezas)..... | 22 |
| Figura 11. Aceitilla amarilla..... | 23 |
| Figura 12. Acahualillo Blanco..... | 24 |
| Figura 13. Autoproducción de biodiesel..... | 25 |
| Figura 14. Plantas biodiesel a escala industrial..... | 27 |
| Figura 15. Sistema embebido (placa microcontrolador)..... | 31 |

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 16. Así es como se separan los bloques al azar..... | 32 |
| Figura 17. Cuadro greco latino..... | 34 |
| Figura 18. Red de actividades acomodadas..... | 34 |
| Figura 19. Evaluación del programa técnica de revisión (PERT)..... | 35 |
| Figura 20. Separación de prueba final de transesterificación..... | 39 |
| Figura 21. Cronograma de actividades general..... | 42 |
| Figura 22. Separación de Jabones y biodiesel en el embudo de decantación cosecha 2019..... | 43 |
| Figura 23. Separación de Jabones y biodiesel en el embudo de decantación semilla fresca 2020..... | 44 |
| Figura 24. Fases de separación en el biodiesel..... | 44 |
| Figura 25. Biodiesel resultante de la filtración cosecha 2019..... | 45 |
| Figura 26. Biodiesel resultante de la filtración cosecha 2020..... | 45 |
| Figura 27. Prueba de flama..... | 47 |
| Figura 28. Vaciado de Benceno en el matraz..... | 48 |
| Figura 29. Enjuague del tubo en benceno..... | 48 |

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 30. Examen físico del tubo después del proceso de oxidación..... | 49 |
| Figura 31. Gráfico PERT..... | 52 |
| Figura 32. Grafica de intervalos Valor vs Muestra..... | 55 |
| Figura 33. Tabla de resultados Tukey..... | 56 |
| Figura 34. Gráfico de resultados Fisher..... | 57 |
| Figura 35. Gráfico de residuos para valor..... | 58 |
| Figura 36. Equipo propuesto para escalamiento del proyecto..... | 60 |

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 biodiesel a partir de aceites vegetales. En particular se estudia la producción de biodiesel, a partir de la transesterificación de aceite vegetal proveniente de malezas como la aceitilla amarilla (*Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC.) o acahualillo (*Simsia amplexicaulis* (Cav.) Pers.), para sus posibles aplicaciones en la obtención de energéticos no convencionales.

Para producir biodiesel se pueden emplear aceites vegetales que pueden ser obtenidos de semillas mediante una extracción química por extracción Soxhlet o destilación simple. Las malezas son plantas que crecen de manera silvestre y en gran abundancia y que contienen semillas que podrían ser empleadas en estudios de obtención de biodiesel a partir de ellas.

Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo es estudiar reacciones de transesterificación de aceites vegetales a partir de las semillas de especies arvenses (malezas) para analizar su viabilidad de producción de biodiesel bajo ciertas condiciones y variables de operación y así dar un valor agregado a estas especies. En particular se aplicaron técnicas y metodologías de la Ingeniería Industrial para establecer un diseño experimental ortogonal de Taguchi que permita realizar procesos

de transesterificación de un aceite vegetal a partir de malezas como la aceitilla amarilla (*Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC.) o acahualillo (*Simsia amplexicaulis* (Cav.) Pers.).

La presente propuesta de estudiar la posibilidad de obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal de malezas permite otorgar un valor agregado a este tipo de plantas que actualmente no se considera en el sector agroindustrial.

En este proyecto se establece un diseño experimental para realizar reacción de transesterificación de los aceites vegetales de las malezas a partir de diferentes metodologías experimentales. El biodiesel obtenido permite ser empleado en trabajos futuros de caracterización compleja.

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 diseño y ejecución de un diseño experimental para obtener aceites vegetales a partir de especies arvenses (malezas).

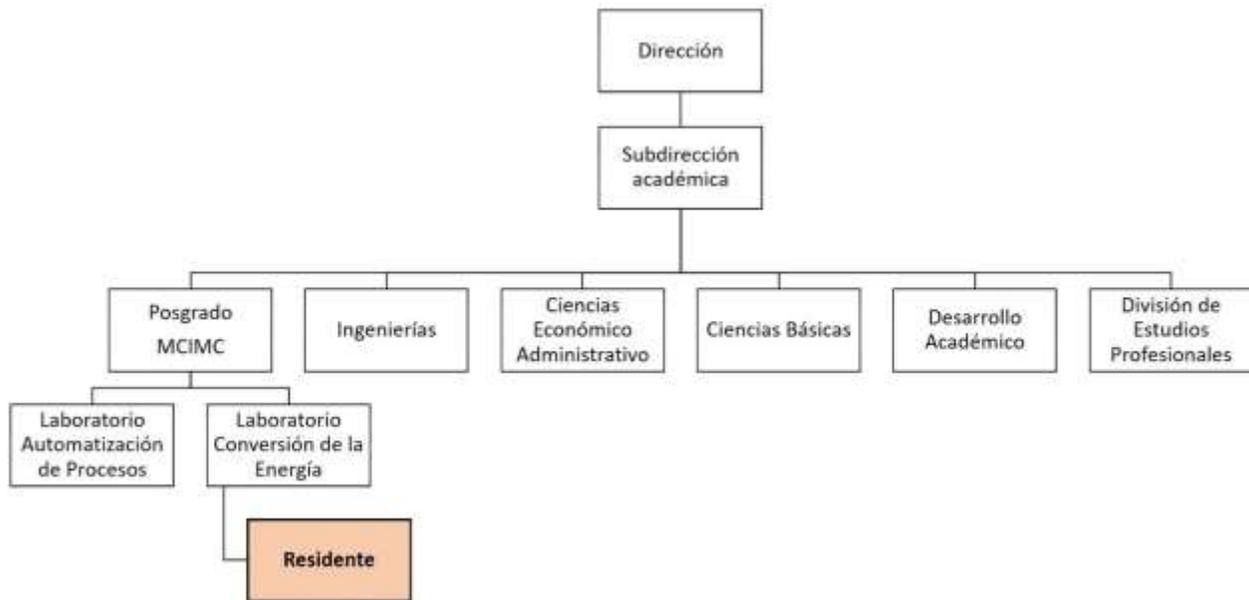


Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.

1.3 Problema(s) a resolver

Para producir biodiesel se emplean aceites vegetales o grasas. En particular los aceites vegetales son lípidos que contienen ácidos grasos que pueden ser sometidos a reacciones de transesterificación para generar el biodiesel.

Un aceite vegetal puede ser extraído de plantas como las especies arvenses, sin embargo, deben ser sometidos a reacciones de transesterificación bajo ciertas condiciones. En específico, la reacción de transesterificación convencional emplea un alcohol y un catalizador básico para llevarse a cabo.

Por otro lado, las malezas o especies arvenses son consideradas dañinas por los agricultores debido a que compiten con el crecimiento de las especies alimentarias.

Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1.- Transesterificación de aceites vegetales

- Estudiar y establecer un proceso químico de transesterificación de aceites vegetales a partir de malezas a nivel laboratorio.

- Definir condiciones de operación y límites de control de un proceso de transesterificación de aceite vegetal mediante un diseño experimental.

2. – Escalamiento de proceso

- Sugerir una propuesta de escalamiento del proceso a nivel planta piloto para trabajos futuros.

Obtener aceite vegetal a partir de malezas y luego realizar una transesterificación para generar biodiesel por procesos químicos, puede otorgarles un valor agregado, sobre todo, si el proceso puede ser escalado en cantidades aceptables para su consideración como materia prima para producir un energético alternativo.

1.4 Justificación

En los últimos años se ha impulsado la investigación y el desarrollo de nuevas fuentes de energía como una solución para sustituir el consumo de combustibles fósiles. Entre estas nuevas fuentes de energía podemos mencionar los biocombustibles ya que son recursos energéticos derivados a partir de biomasa.

En general, los biocombustibles son producidos por procesos convencionales como la transesterificación de aceites para manufacturar biodiesel, entre otros.

Específicamente el biodiesel es un biocombustible empleado como combustible alternativo de energía limpia ya que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas. En términos químicos, el biodiesel, es un éster que se obtiene mediante la reacción de transesterificación de los triglicéridos de los aceites vegetales o grasas con alcoholes en presencia de un medio alcali o ácido a temperaturas de reacción cercanas al punto de ebullición del alcohol. En términos de funcionalidad, el biodiesel, se produce para motores a diésel convencionales y es empleado para vehículos motores.

Dentro de este panorama, obtener biodiesel a partir de la transesterificación de aceites vegetales de especies arvenses presenta grandes ventajas para ser utilizado como combustible. Las plantas arvenses, también llamadas comúnmente malezas o hierbas de campo, son plantas de temporal que crecen en ciertas épocas del año y que se hospedan generalmente en el perímetro de campos de cultivo o que surgen en

terrenos de cultivo momentáneamente abandonadas después de un periodo de cosecha o en terrenos de descanso. Son especies que pueden tener aplicaciones como plantas medicinales, ornamentales y se caracterizan por ser melíferas, lo que propician que sean aptas para el alojamiento de diversas especies de insectos. Sin embargo, en los terrenos de cultivos agrícolas, campos en abandono, orillas de caminos y/o áreas rurales son tratadas como malezas sin tener algún valor agregado identificado.

Debido a su gran disposición de biomasa en la naturaleza y que no tienen hoy en día asignado un valor agregado, la presente propuesta de establecer un proceso de transesterificación de un aceite vegetal a nivel laboratorio permitirá establecer un valor a las especies arvenses con valor para el sector agroindustrial mediante una propuesta de proceso a nivel escala piloto.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar un proceso a escala de laboratorio mediante el análisis de una transesterificación de un aceite vegetal de malezas para identificar las variables de operación y realizar una propuesta de escalamiento a nivel planta piloto.

1.5.2 Objetivos específicos

- Estudiar métodos de transesterificación de aceites vegetales mediante una revisión exhaustiva de la literatura para identificar las operaciones unitarias del proceso.
- Identificar y cuantificar las variables de operación de transesterificación de un aceite vegetal mediante revisión de la literatura para establecer un diseño experimental.
- Llevar a cabo procesos de transesterificación de un aceite vegetal de la especie arvense de estudio mediante el diseño experimental establecido para validar el proceso a escala de laboratorio propuesto.
- Aplicar técnicas estadísticas mediante el análisis del proceso para estimar el comportamiento del escalado del proceso.

- Realizar una propuesta del proceso a nivel planta piloto mediante el escalamiento del proceso para trabajos futuros de investigación.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍAS RENOVABLES

La importancia del sector energético en ámbito económico es demasiado notoria ya que el crecimiento económico de años pasados estuvo impulsado por el famoso auge petrolero, y el hecho de que los ingresos petroleros representa un tercio de los ingresos destinado al estado. Sin embargo, las estadísticas muestran un patrón no sostenible a largo plazo, hay una tasa de crecimiento en el consumo de energía que aumenta considerablemente.¹

El conocido desarrollo sustentable y el uso de las energías renovables que disminuyan o disipen los gases de efecto invernadero a la atmósfera surgió a nivel mundial a partir de la necesidad de prevenir y adaptarse al cambio climático al que se enfrenta la población. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, dentro de sus acuerdos estableció, que por “cambio climático se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.²

México tiene una gran diversidad de fuentes de energía renovable que favorecen ante un buen avance para el futuro. El país se ubica en un punto donde es fácil acceder a fuentes de energía eólica, energía fotovoltaica, energía geotérmica, energía de biomasa e hidroelectricidad. El país ha demostrado la capacidad de generar opciones de préstamo más dinámicas y flexibles y vías para el desarrollo e instalación de proyectos. También hay indicios de que a los socios extranjeros se les da ahora un espacio para cultivar el potencial de energía renovable del país. Si se analiza la literatura, se puede observar que existe una clara sensación de que el país tiene muchas opciones para reducir su dependencia de los combustibles fósiles, y ahora también tiene una estructura financiera y con grandes instituciones que hace que los procesos sean más ágiles que en pasado. También hay un creciente aumento de documentos donde muestran las teorías y diferenciaciones de las formas de energía renovable.³

En la Figura 2 podemos apreciar algunas de las energías renovables que existen en la actualidad.



Figura 2. Energías renovables existentes.

2.2 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles se han implementado desde tiempos memorables, tales como lo son desde que se descubrió el fuego. Ya que las ciudades utilizaban grasas o bien aceites, en 1970 tuvieron auge los biocombustibles debido a la crisis del mercado del petróleo de esa época, ya que comenzó la preocupación sobre factores como: el clima, disminución de recursos fósiles, asegurar sustentabilidad energética, etc. Y esto condujo la manera concreta de producirlo. Es de suma importancia saber que la clasificación de los biocombustibles en su mayoría no es por su composición química ya que esta tiene cierta variación, sino por la materia orgánica de la que provienen. Se pueden obtener dependiendo de la planta de origen, por ejemplo, para el maíz, caña de azúcar o girasol si tienen un alto contenido en azúcares se fermentan, en cambio sí es por plantas ricas en grasas o aceites se utiliza la transesterificación donde se combinan los aceites con alcohol para obtener biodiesel. A los procesos antes mencionados se les conoce como biocombustibles de primera generación. Sin embargo, también existen biocombustibles de segunda generación los cuales son obtenidos de materias primas no aprovechadas para alimentación humana: aceite reciclado de cocina, residuos agrícolas y forestales, o bien a través de la bioquímica y la termoquímica. En la tercera generación se encuentran los organismos que pueden producir su propio alimento a

partir del sol y el dióxido de carbono, como lo son las algas; una vez secas se extrae el aceite contenido en sus células. Los biocombustibles son esenciales, ya que, aunque no se consideran como solución definitiva a los problemas que se enfrenta el mundo en cuanto a la energía, ambiente y economía son fuentes alternativas y complementarias a mediano plazo ya que a medida que el tiempo pasa estos siguen evolucionando puesto que ya son considerados como la base sobre la que se apoya la economía mundial, ver Figura 3.⁴



Figura 3. Biocombustibles en el mundo.

2.3 ACEITE VEGETAL USADO PARA RECICLADO

Los aceites vegetales que son usados en la obtención de biodiesel son parte de una aplicación emergente que está involucrada con el interés del reciclaje dentro de los productos oleicos que ya fueron utilizados. Esta actividad está siendo desarrollada de una manera rápida y eficaz ya que existen diversas pruebas piloto en diferentes países. Esto es porque más allá de los beneficios que se tienen en el reciclaje de los Aceites Vegetales Utilizados (AVU) tienen un gran producto final obtenido. Como combustible el biodiesel es un derivado de aceites vegetales o grasas animales el cual puede ser utilizado como sustituto o aditivo al diésel convencional, ya que tiene características fisicoquímicas de las cuales son demasiado parecidas. A esto se le agradece que su intervención no requiere grandes cambios en los motores de diésel convencionales, así que se puede agregar de manera directa con cualquier proporción con el diésel.⁵

Este combustible alternativo puede ser bombeado, almacenado o manipulado con los mismos procedimientos, infraestructura y los equipos que se emplean con el combustible fósil. No tiene un significado potencial en el rendimiento, torque o potencia en los motores, aunque depende del proceso el motor puede verse levemente incrementado en un 5%. De una manera etimológica los combustibles alternos solo pueden tener esa definición cuando no han sido fosilizados y su obtención es de una manera renovable a partir de los restos orgánicos. Todos los combustibles fósiles como los biocombustibles tienen un origen biológico y de esto se hace referencia que todas las sustancias tienden a ser susceptibles a la oxidación para otorgar energía.⁶

En la mayoría de las ocasiones el biodiesel se realiza a través de los aceites comestibles que han sido semirrefinados con una buena característica de acidez y humedad, sin embargo, se tiene una gran cantidad de aceites y grasas que poseen una menor calidad y un costo menor que en su caso también podrían ser convertidos en biodiesel (aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales). El problema con estos es el poder procesar estas materias baratas que huelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres, gomas y humedad que todo esto afecta al proceso de transesterificación alcalina. Un aceite cambia sus características al aumentar su temperatura, teniendo en cuenta que algunos aceites son saludables, algunos otros al calentarlos pueden volverse perjudiciales cuando se calientan por encima de ciertas temperaturas, al elegir un aceite de cocina es necesario tener en cuenta la tolerancia con el calor.⁷ En la Figura 4 se muestran los pasos a seguir para reciclar el aceite vegetal.

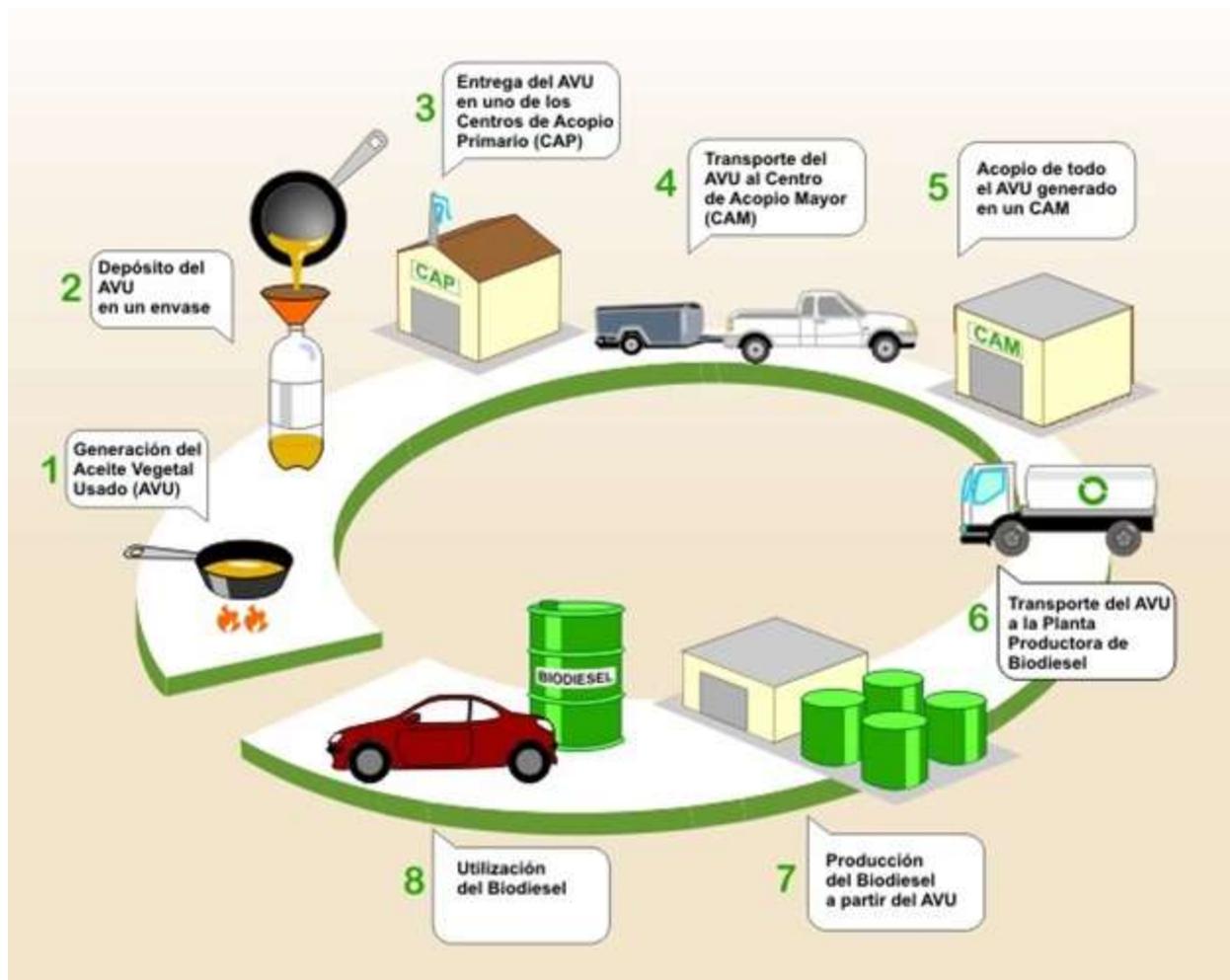


Figura 4. Proceso para la recolección e utilización del aceite vegetal reciclado.

2.4 BIODIESEL

Podemos definir el biodiesel como un ácido graso que se obtiene a través de aceites vegetales o bien las grasas animales, muy parecido al diésel ya que ambos sustituyen completamente o bien en algunos casos el combustible de motores, ya que al ser ecológico porque reduce en gran medida el CO₂ y a su vez no depende de las fuentes de energía no renovables. Las propiedades que tiene el biodiesel son de origen fósil, hablando de densidad, índice de cetano, eficiencia, y rendimiento, lo que nos lleva a las mismas características del gas olí. Los ésteres que frecuentemente se utilizan son el metanol y etanol. Debido a que la viscosidad que este tiene es 2 veces superior a la del gas olí, y 10 veces más de la del aceite crudo tomándose como adecuado para usar como combustible.

2.4.1 Propiedades físicas y químicas del biodiesel

La producción del biodiesel en el mundo mayormente es adquirida de los aceites de colza en Canadá y Europa, en la zona mediterránea de Europa se utilizan los aceites de girasol y aceites usados de fritura, en Colombia y el centro de América es el aceite de palma, similar al que se utiliza en Malasia, Indonesia y países de la región y en Estados Unidos el aceite de soya. Por su parte al obtener el biodiesel por medio de materia prima alternativa, como lo puede ser a través de aceites usados, residuos grasos de animales, genera un costo más bajo ya que al obtenerlo por medio de aceites vegetales como tal representa un 85% en cuanto a los costos de la producción del mismo, que nos dice que como ganancia solo se obtiene el 15% restante de la inversión.⁸

Existe variedad de insumos principales para la producción de biodiésel, como lo son aceites de:

- Soja
- Girasol
- Colza
- Jatropha
- Tártago
- Ricino
- Usados de fritura

También se pueden utilizar los sebos de:

- Vacunos
- Porcinos
- Aves
- Pescado

Sin embargo, debido a la textura que tienen las grasas animales es muy viscosa y sólida cuando se encuentra a temperatura ambiente, esto es a consecuencia de que contiene demasiados ácidos grasos saturados, por lo que aquí se encuentra una desventaja, puesto que nos puede llevar a una mala dispersión en partes muy

pequeñas de los mismos y nos da como resultado final una combustión incompleta. Es aquí donde entra la transesterificación y la emulsificación, para solucionar el problema. En la Tabla 1 se presentan las propiedades física y químicas del biodiesel.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del biodiesel.

| Propiedad | Unidad | Valor aproximado |
|--|-----------------------|-------------------------|
| Conversión | % (m/m) | 96.50 a 97.50 |
| Densidad a 15° C | Kg. /m ³ | 860 a 900 |
| Viscosidad a 40° C | mm ² / gr. | 3.50 a 5.00 |
| Punto Inflamación | °C | 120 |
| Contenido de azufre | Mg / Kg | 10 |
| Índice de cetanos | N° | 51 |
| Contenido máximo de agua | mgr. / Kg | 500 |
| Contenido máximo de metanol | % (m/m) | 0.20 |
| Contenido máximo de Mono glicéridos | % (m/m) | 0.80 |
| Contenido máximo de di glicéridos | % (m/m) | 0.80 |
| Contenido máximo de triglicéridos | % (m/m) | 0.20 |
| Glicerol Libre | % (m/m) | 0.02 |
| Glicerol total | % (m/m) | 0.025 |
| Metales de grupo I (Na - K) | mgr. / Kg | 5.00 |
| Metales de grupo II (Ca - Mg) | mgr. / Kg | 5.00 |
| Contenido de fósforo | mgr. / Kg | 10.00 |
| Índice de Yodo (para soja) | Gr. Yodo / 100grs | 120 |

En cuanto a los aceites usados, o bien de fritura, podemos rescatar que es la materia prima más barata y a su vez ayuda, puesto que evita la contaminación del medio ambiente ya que al recolectarlo evitamos que su destino sea para ríos o mares y así disminuimos una contaminación innecesaria. En la Figura 5, se puede observar el aspecto de aceites reciclados.



Figura 5. Biodiésel de aceite vegetal reciclado.

Por otra parte, si se trata de composiciones similares a las de los aceites vegetales por medio de algas, bacterias y hongos lo más recomendable es la transesterificación. Además, su índice de cetano alto (tiempo entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión) y los valores de calefacción están cerca del combustible diésel, al igual que su contenido de oxígeno, que mejora la combustión con menor relación aire/combustible, así mismo se ha demostrado que existe una buena disponibilidad de estas materias primas, evitando los debates éticos de utilizar cultivos y tierras que se destinan para fines alimenticios, además estimaciones hechas en Noruega por Andersen y Weinbach muestran que es posible obtener 2,5 toneladas de ácidos grasos de residuos de origen animal por cada 1000 familias al año.⁸ En la Figura 6 se muestra el ciclo del biodiesel.

2.5 TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITES VEGETALES

Dentro de las necesidades energéticas del mundo son suplidas por recursos petroquímicos como lo son el carbón, gas natural con excepción de energía hidroeléctrica y nuclear, siendo estos los recursos que no son renovables y altamente contaminantes. El diésel como combustible tiene una función demasiado esencial en la teca de la economía industrial y es utilizado como motor principal en los transportes. Una posible alternativa para este combustible son los aceites vegetales para la obtención de bioesteres, donde se consiguen las que las moléculas grandes y ramificadas iniciales, de elevada viscosidad y alta proporción de carbono se transformen en otras de con menos viscosidad y carbono.

Para este método consiste en agregar cierta cantidad de de hidróxido de potasio o sodio para así neutralizar los ácidos grasos libres del aceite y el material reaccione pasando de ácido a ligeramente básico., La transesterificación tiene el propósito de que estos ácidos se neutralicen con el catalizador y esto genere jabone y ahí tenemos la explicación de que el índice disminuya en el biodiesel, ver Figura 6.⁹

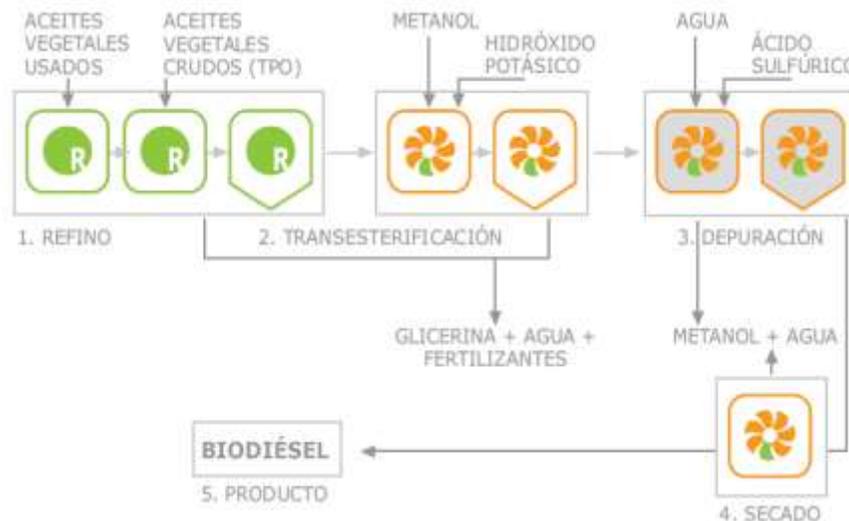


Figura 6. Principales etapas de producción de biodiesel.

La transesterificación tiene como propósito el hacer una reacción de un triéster de glicérico (Triglicérido) combinado con un alcohol para formar los esteres y glicerol. Químicamente, el biodiesel se aprecia como una mezcla de esteres de alquilo que contienen largas cadenas de ácidos grasos obtenidos típicamente de los recursos biológicos que no son tóxicos, como lo son los aceites vegetales, las grasas animales e incluso el aceite de cocina usado. Más del 95% de la materia prima que se utiliza para realizar el biodiesel se obtiene de los aceites comestibles ya que tiene una producción amplia en muchas regiones y el biodiesel obtenido a partir de estos aceites se acerca mucho al combustible diésel, aunado a esto la reacción es reversible y se utiliza el alcohol en exceso para desplazar el equilibrio hacia el lado de los productos. El etanol y metanol son los alcoholes que se utilizan con más frecuencia, en su mayoría el metanol ya que tiene un bajo costo y sus ventajas físicas y químicas además el metanol reacciona rápidamente con los triglicéridos y se disuelve fácilmente en álcalis. Para realizar una transesterificación estequiométricamente completa es necesario tener una

relación molar de alcohol a triglicérido de 3:1 y dentro de la práctica es necesaria una relación mayor para desplazar el equilibrio para así poder aumentar el rendimiento, haciendo mención que la velocidad de la transesterificación no depende solamente de las condiciones de operación o del tipo de catalizador sino también de la variedad y el tipo de triglicéridos presentes en el aceite o la grasa.¹⁰

Dentro del procedimiento se muestra el experimental utilizado en este proceso. Donde inicialmente se abre el paso de agua en el sistema de refrigeración y se introduce y se introduce el aceite (250 g) en el interior del reactor. Se inicia la agitación y el calentamiento donde se espera que la temperatura alcance un valor prefijado donde se hará la reacción. En ese momento es donde se añaden el catalizador el metanol y a partir de ahí se comienza a contar el tiempo de la reacción. Aunque todo esto produce una disminución de temperatura en el aceite de unos 5 a 8 °C la recuperación de esta temperatura es rápida ya que el aceite es superior al metanol. Como seguimiento analítico del proceso a intervalos de tiempo variable, se pueden tomar muestras de 2 mL, de las cuales pasaran a ser filtradas y centrifugadas, para después llegar al análisis cromatográfico. Al final del tiempo establecido de reacción (3-5 h), se apaga el sistema de calefacción y de agitación y se filtra la mezcla a fin de separar el catalizador, ver Figura 7.



Figura 7. Análisis de propiedades Físicoquímicas de Transesterificación.

Ya con la mezcla fría se concentra en un embudo de decantación. Se deja reposar hasta que la glicerina pueda ser evidente a la decantación y una vez retirada la glicerina, los esteres se depuran de los materiales y métodos, eliminando así el metanol residual de las reacciones que obtuvo a los 85°C. El biodiésel obtenido puede ser mejorado a través de una inducción de cantidades excesivas de metanol ya que el equilibrio se desplaza a la derecha. Sin embargo, el aumento de la cantidad de alcohol más allá de la relación óptima no puede aumentar el rendimiento, pero si podrá aumentar los costes por la recuperación/eliminación de alcohol.

Al final de todo esto, la relación molar Alcohol-aceite alta puede intervenir con la separación de la glicerina porque hay un aumento dentro de la solubilidad, cuando la glicerina permanece en solución podría ayudar a desarrollar el equilibrio hacia la izquierda, bajando el rendimiento de los esteres. Llevando esto a que las relaciones molares elevadas, a cima del valor óptimo para cada proceso, donde la separación de glicerina sería difícil y el rendimiento aparente de los esteres disminuiría debido a que una parte de la glicerina quedaría dentro de la fase de biodiesel al tener un porcentaje de ácidos grasos menor a 0.98% no se necesita la esterificación bajo condiciones acidas. Pero este porcentaje al lote de aceite empleado dentro del trabajo, teniendo en cuenta que es posible variar la fuente del aceite o que las condiciones de recolección puedan variar en el porcentaje de ácidos grasos donde se requiera la esterificación previa. Así pues, la determinación del porcentaje de acidez podrá definir el proceso que se debe seguir con el aceite. Además de que este factor se convierte en el principal inconveniente para la implementación industrial como materia prima del aceite de cocina ya usado, así que por lo tanto implicaría un proceso adicional que llevaría a incrementar los costos. Solamente dentro del análisis económico de todo el proceso incluyendo la recolección aceite se podría dar cuenta de la posibilidad al implementar industrialmente el uso del aceite usado.

Estableciendo las mejores condiciones fueron catalizador NaOH al 1 % p/p, con una relación molar alcohol: aceite 12:1; en estas condiciones se obtuvo un rendimiento de aceite en biodiesel de 98 % y una conversión de 64,1 %, definida como metilésteres en el biodiesel a metilésteres en el aceite. Todo esto se debe a que el costo del aceite

usado es menor que el costo de un aceite virgen el cual se puede usar como dicho subproducto como materia prima de la generación de biodiesel, ver Figura 8.



Figura 8. Montaje del sistema de reacción a nivel laboratorio.

El biodiesel como combustible alternativo es renovable y sin duda una alternativa energética, donde actualmente se produce por una transesterificación de aceites vegetales empleando de manera principal los hidróxidos de sodio y potasio en forma de catalizadores, pero suelen ser inconvenientes en el proceso de producción como la formación de jabones, dificultad dentro de la recuperación del catalizador y sobre todo la neutralización de las aguas residuales entre otras. Se han enfocado en la atención de los investigadores como en la implementación de la catálisis heterogénea teniendo como catalizadores sólidos, todo esto en virtud de sus características ya que pueden aliviar esos problemas. Los catalizadores sólidos ácidos tipo zeolitas o heteros poliácidos, pueden emplearse para generar reacciones de esterificación y transesterificación en una forma simultánea ya que son tolerantes a los ácidos grasos libres y al agua. Pero también hay que hacer mención que por su morfología es limitante a su estabilidad presentando problemas de lixiviación de los sitios activos, además de que las reacciones son más lentas que las catalizadas en medio básico

La transesterificación de aceites oleicos a partir de los catalizadores homogéneo alcalinos es aún el proceso más empleado dentro de la producción de biodiesel industrial. Ya que el desarrollo de etanol a partir de las fuentes renovables ha permitido

que sea implementado en la producción de FAEE's teniendo así un gran número de ventajas como combustible y este aspecto a orientado a las investigaciones hacia la implementación y desarrollo de procesos etanoicos con materiales primas, pero de menor calidad, aunque a un bajo costo y estas son las razones para la mejora y el desarrollo de los nuevos procesos de producción, ver Figura 9.¹¹



Figura 9. Caracterización del Biodiesel a nivel laboratorio.

2.6 ESPECIES ARVENSES (MALEZAS)

Los campos de cultivo alimenticio tradicionales en México (frijol, maíz, chile, tomate, trigo, café, caña de azúcar, calabaza, entre otros) se caracterizan porque dentro de un mismo espacio conviven las plantas alimenticias con otras especies de plantas. Siendo una de este tipo de especies las denominadas plantas arvenses. Sin embargo, en los terrenos de cultivos agrícolas, campos en abandono, orillas de caminos y/o áreas rurales son tratadas como malezas sin tener algún valor agregado identificado. Las plantas arvenses, también llamadas comúnmente malezas o hierbas de campo, son plantas de temporal que crecen en ciertas épocas del año y que se hospedan generalmente en el perímetro de campos de cultivo o que surgen en terrenos de cultivo momentáneamente abandonadas después de un periodo de cosecha o en terrenos de descanso. Las plantas arvenses poseen diversas características que las hacen de utilidad: (a) en términos ecológicos, las plantas arvenses, juegan un papel importante porque guardan humedad, son hábitat de varias especies de insectos, evitan

la erosión del suelo, participan en el ciclo de nutrientes y sobretodo crecen espontáneamente sin la intervención del hombre lo que significa una alta disponibilidad de biomasa sin costo alguno de producción; (b) en términos culturales, algunas especies son aprovechadas como plantas medicinales, forraje, ornamento, alimento de ganado, entre otras utilidades. Se consideran como arvenses a todas las plantas superiores, que por crecer junto o sobre plantas cultivadas, perturban o impiden el desarrollo normal, encarecen el cultivo y merman sus rendimientos o la calidad. Con el manejo adecuado de arvenses, se consigue además la protección de los suelos contra la erosión, la regulación de las aguas de escorrentía, la conservación de la biodiversidad genética y la reducción de los costos de los desyerbes hasta un 85%. Las arvenses, en el sentido agronómico, representan plantas sin valor económico o que crecen fuera de lugar interfiriendo en la actividad de los cultivos, afectando su capacidad de producción y desarrollo normal por la competencia de agua, luz, nutrientes y espacio físico, o por la producción de sustancias nocivas para el cultivo. En diferentes partes del mundo sus habitantes nombran a las arvenses atendiendo a sus perjuicios beneficios, por ejemplo, en las tierras tropicales bajas de Tabasco y México, hay una clasificación única de las plantas no cultivadas conforme a su uso potencial por una parte y su efecto sobre el suelo y los cultivos por la otra. Con este sistema los campesinos reconocen 21 tipos de plantas en los maizales llamados Mal Monte (mala hierba), y 20 denominadas Buen Monte (buena hierba). Las arvenses buenas sirven como alimento, medicinas, material de ceremonias, té y mejoradores del suelo, ver Figura 10.¹²



Figura 10. *Plantas arvenses (malezas).*

Dentro de las especies arvenses podemos citar algunas de ellas: la amapola silvestre *Anoda cristata* (L.) Schltidl empleada como alimento o de ornamento, la verdolaga *Portulaca oleracea* L. empleada como alimento, el pápalo *Porophyllum macrocephalum* DC empleada como alimento o la *Amaranthus hybridus* L. empleada como forraje, entre otras.¹³

En particular en el estado de Aguascalientes y de forma muy notoria durante el verano y la temporada de lluvias se observa un prolifero crecimiento de las especies arvenses, aceitilla blanca (*Bidens odorata* Cav.), aceitilla amarilla (*Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC.) y ahuacalillo (*Simsia amplexicaulis* (Cav.) Pers.) que son especies que pueden tener aplicaciones como plantas medicinales, ornamentales y se caracterizan por ser melíferas, lo que propician que sean aptas para el alojamiento de diversas especies de insectos.¹⁴⁻¹⁷

La aceitilla amarilla es una especie de origen de USA y mexicano meramente en Arizona y Texas, y Sonora donde crecen en suelos arenosos, ya que es una herbácea perenne, es decir que vive más de dos años, y en algunos lugares es considerada como maleza. Crece de 15 a 50 cm y su anchura es de 30 a 90cm, con tallos muy ramificados, delgados presenta hojas opuestas bipinnadas largas 1.5 a 4.5 cm, ver Figura 11.



Figura 11. Aceitilla amarilla.

Por otra parte, nos encontramos al acahualillo que es una planta compuesta del género *Bidens* llamada también té de milpa. Se encuentra como maleza en varios Estados de la República Mexicana como lo son Chihuahua, Monterrey, Guadalajara, Guanajuato, Colima, Ciudad de México, Aguascalientes, por mencionar algunos. Su estacionalidad se puede observar en la figura 0 obteniendo como nivel más alto en octubre y diciembre, ver Figura 12.¹⁸



Figura 12. *Acahualillo Blanco.*

2.7 DISEÑOS DE PLANTAS DE BIODIESEL

Existe un gran número de estudios donde destacan los grandes beneficios de usar biodiesel en lugar del diésel convencional o, al menos una mezcla entre los dos, ver Figura 13. Así que a continuación se muestran las principales ventajas del biodiesel:

- Su fabricación necesita poca energía, esencialmente utilizada en los procesos de extracción, labores en las zonas agrícolas y la creación del vapor.
- Se puede permitir el aumento del número de índice de cetano y de la capacidad del combustible en auto encenderse, produciendo una mejor combustión.
- Es un combustible biodegradable que es fácil de disolver en la naturaleza sin crear una contaminación en el ambiente, en caso de derrame accidental.
- El combustible puede permitir una reducción notable de las emisiones nocivas a la atmosfera, teniendo un balance neutro en CO₂ ya que se consume por

fotosíntesis el dióxido de carbono emitido en vegetales que se pueden usar para fabricar de nuevo biodiesel.

Todo esto es la variedad de una materia base teniendo un dato interesante ya que podría permitir que el biodiesel sea un combustible renovable y además de reciclado de desechos grasos. Todos estos se distinguen en tres categorías esenciales:

1. Aceite vegetal.
2. La grasa animal.
3. Aceites usados.



Figura 13. Autoproducción de biodiesel.

Generalmente se admiten que en una producción industrial de biodiesel es mejor tener una planta con un tamaño mayor y considerable la cual pueda estar centralizada y las cuales puedan operar de una forma autónoma ya que son basadas en una economía grande y de escalabilidad, ver Figura 14. No obstante, entre mayor sea la capacidad de la planta en producción más alejadas estarán las fuentes de abastecimiento de la materia prima y esto podría tener una repercusión en los costos de transporte en la materia prima hacia la planta.¹⁹

Desde los años anteriores el biodiesel se ha convertido en parte de las energías alternativas potenciales reemplazando el diesel fósil. El biodiesel es un combustible amigable con el medio ambiente, sin embargo, el uso de los aceites vegetales refinados para la producción de este combustible alternativo es poco práctico y rentable. Los aceites de cocina usados de fritura pueden ser buena opción, pero no prácticos por el contenido de los ácidos grasos libres, esto se ha convertido en el principal

inconveniente para poder emplear como la materia prima alternativa. Así que el primer paso del trabajo es establecer los diseños de los procesos de producción de biodiesel a partir de los aceites de fritura bajo el análisis de las variables en la etapa de producción y posteriormente establecer el rendimiento de este proceso de trabajo. Todos los resultados son establecidos en un proceso de producción de los cuales se realiza en dos etapas la primera es una esterificación con catálisis homogénea ácida y segunda etapa con una transesterificación con catálisis homogénea básica, las variables del análisis son temperatura de reacción, porcentaje en peso del catalizador, relación molar de 1:8 –Esterificación-, y 1:7 –Transesterificación-, condiciones que se emplearon para una prueba de producción de biodiesel de 105 L/Lote en una planta piloto de proceso discontinuo teniendo como resultado un biodiesel con características físicas y químicas dentro de los parámetros de la norma ASTM6751 teniendo un rendimiento de 93.52% p/p y trazas de 4.60% p/p de monodigliceridos. Obteniendo así las condiciones óptimas encontradas en este estudio podrían hacer posible el uso del biodiesel que fue producido en los equipos industriales.²⁰

En el aspecto de la ruta química se puede emplear un proceso de esterificación catalítica donde el aceite usado está en medio del ácido con etanol y la reacción de la transesterificación de la fase por medio del catalizador homogéneo es básico con el etanol y estos son los servicios adicionales que se utilizarán.

a) Materias primas. Como ejemplo se puede mencionar las materias primas que se pueden emplear para un proceso de producción del biodiesel de fritura de soja:

- Aceite Usado de fritura de soja.
- Etanol (C_2H_6O) con pureza del 96%.
- Hidróxido de sodio (NaOH), en escamas con una pureza del 98%.
- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), del 98%.
- Ácido acético ($C_2H_4O_2$), glacial del 99%

b) Servicios. Los servicios adicionales requeridos para el proceso de producción del biocombustible son:

- Agua caliente a una temperatura de 65 °C. Elemento que se empleara en el calentamiento de las materias primas dentro del reactor.
- Agua a temperatura ambiente. Sustancia que se empleará para condensar el vapor de etanol en el interior del reactor.
- Energía Eléctrica a 110 V, para conexión de motores, bombas, resistencias eléctricas.



Figura 14. Plantas biodiesel a escala industrial.

Un aspecto de gran importancia está en obtener un producto con unos rangos ajustados a los parámetros establecidos en las normas ASTM D6751 o EN14214. La pureza dentro de las sustancias empleadas dentro del proceso tiene una vital importancia dentro de las pruebas de laboratorio, así como lo tiene la etapa de producción en la planta piloto porque la acidez y la presencia disminuyen la efectividad de la reacción de Transesterificación teniendo un reflejo en el rendimiento y la calidad en el momento de la obtención del biodiesel.²¹

2.8 DISEÑO DE TAGUCHI (ARREGLOS ORTOGONALES)

El método Taguchi (también conocido como arreglo ortogonal) ha sido bastante aplicado en la mejora de procesos y productos en diversos sectores como la industria de alimentos, farmacéutica, electrónica, vidrios y envases, aeronáutica, hidrocarburos, *software* y en materiales de construcción, entre otros; sin embargo, en la literatura consultada no fueron encontrados antecedentes de aplicaciones del método

en el sector objeto de estudio. En este sentido, la presente contribución expone una aplicación del método Taguchi para el análisis de las variables del proceso de producción de biodiesel con el fin de mejorar su calidad y estandarizar la operación para mantenerla controlada y estable. El método Taguchi no solo se emplea en la investigación de las relaciones causales, sino que busca desarrollar un modelo matemático de causa y efecto y contribuir a la selección de los efectos principales para consolidar la robustez del diseño del producto y del proceso. Es aplicable en procesos donde sea bastante costoso el manejo de los niveles para cada uno de los factores involucrados en la experimentación y, aunque existen otros métodos aplicables, ofrece ventajas superiores como: mayor poder de estimación de las interacciones, el tamaño de los arreglos experimentales, la efectividad de las soluciones, la facilidad de su aplicación, la buena relación beneficio/costo, la flexibilidad y la efectividad de los métodos propuestos para el análisis de los resultados.²²

Un diseño de Taguchi es un experimento diseñado que permite elegir un producto o proceso que funciona con mayor consistencia en el entorno operativo. Los diseños de Taguchi reconocen que no todos los factores que causan variabilidad pueden ser controlados. Estos factores que no se pueden controlar se denominan factores de ruido. Los diseños de Taguchi intentan identificar factores controlables (factores de control) que minimicen el efecto de los factores de ruido. Durante el experimento, usted manipula los factores de ruido para hacer que haya variabilidad y luego determina la configuración óptima de los factores de control para que el proceso o producto sea robusto o resistente ante la variación causada por los factores de ruido. Un proceso diseñado con esta meta producirá una salida más consistente. Un producto diseñado con esta meta tendrá un rendimiento más consistente, independientemente del entorno en el que se utilice.²³

Los métodos de Taguchi son técnicas estadísticas para realizar experimentos que pueden determinar las mejores combinaciones de variables de productos y procesos para fabricar o desarrollar un producto. El método de Taguchi para el diseño de experimentos utiliza técnicas que implican bajos costos y que son aplicables a los problemas y requerimientos de la industria moderna. El propósito que se tiene en el diseño del producto es encontrar aquella combinación de factores que nos proporcione

un desempeño más estable y costo de desarrollo más bajo. El método de Taguchi valora la ventaja fundamental de los arreglos ortogonales es que pueden ser aplicados al diseño experimental involucrando un gran número de factores. Es muy frecuente que a la hora de diseñar un producto tengamos múltiples variables (FACTORES) a tener en cuenta. Cada uno de estos factores toma distintos valores (NIVELES) y es necesario elegir el más conveniente, sin embargo, cuando el número de factores y de niveles es elevado, el número de combinaciones posibles es elevado y el número de experimentos a realizar sería muy costoso. En general, para un arreglo a dos niveles, el número de columnas (efectos o factores) que se pueden analizar, es igual al número de renglones más uno. 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 2.²⁴

Tabla 2. Serie de arreglos para experimentos con factores a 2 niveles.

| 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.²⁵

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

Por ejemplo, un diseño L8 tiene 8 corridas. (2³) o (2³) significa 3 factores en 2 niveles. Si su notación es L(corridas) (número ^ exponente número ^ exponente), usted

tiene un diseño de niveles combinados. Por ejemplo, un L18 ($2^1 3^7$) significa que el diseño tiene 18 corridas, 1 factor con 2 niveles y 7 factores con 3 niveles.

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

Tabla 3. Arreglo L4(2^3).

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

2.9 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES FISICOQUÍMICOS

La automatización es un elemento clave para la industria en su conjunto, interviene hoy en todos los procesos de cualquier fábrica, ayudando en la productividad y reduciendo los riesgos para los operarios. La automatización es un gran aliado para una industria tan exigente como la química. La Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas define la automática como el conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas. De dicha definición obtenemos pues que la automatización sea la aplicación de responsabilidades que previamente se realizaban por los operarios, pero ahora se hacen de manera programada gracias a ciertas máquinas.²⁶

Un sistema embebido es un (integrado, incrustado) sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas, frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real, ver Figura 15. Al contrario de lo que ocurre con los ordenadores de propósito general (como por ejemplo una computadora personal o PC) que están diseñados para cubrir un amplio rango de necesidades, los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas. En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base (tarjeta de vídeo, audio, módem, etc.) y muchas veces los dispositivos resultantes no tienen el aspecto de lo que se suele asociar a una computadora. Muchas veces los dispositivos resultantes no tienen el aspecto de lo que se suele asociar a una

computadora. Por lo general los sistemas embebidos se pueden programar directamente en el lenguaje ensamblador del micro controlador o microprocesador incorporado sobre el mismo, o también, utilizando los compiladores específicos, pueden utilizarse lenguajes como C o C++; en algunos casos, cuando el tiempo de respuesta de la aplicación no es un factor crítico, también pueden usarse lenguajes Orientados a Objetos como JAVA.²⁷



Figura 15. Sistema embebido (placa microcontrolador).

2.10 DISEÑO DE BLOQUES COMPLETAMENTE AL AZAR (DCBA)

En cualquier experimento, la variabilidad proveniente de un factor de ruido puede afectar los resultados. Un factor de ruido es un efecto en la respuesta pero que no nos interesa estudiar. Si el factor de ruido es desconocido y no controlable, la solución es la aleatorización, que tiende a distribuir los niveles y efectos de este factor.

Si el factor de ruido es conocido y no controlable, pero por lo menos podemos medir su valor en cada corrida del experimento, entonces podemos compensarlo usando análisis de covarianza.

Si el factor de ruido es conocido y controlable, se utilizan bloques para eliminar su efecto en la comparación estadística de los tratamientos. Utilizar bloques es una forma de reducir y controlar la varianza del error experimental para tener mayor precisión.

En el diseño completamente al azar se supone que las u.e. son relativamente homogéneas con respecto a factores que afectan la variable de respuesta. Sin embargo, algunas veces no tenemos disponibles suficiente número de u.e. homogéneas.

Cualquier factor que afecte la variable de respuesta y que varíe entre u.e. aumentará la varianza del error experimental y disminuirá la precisión de las comparaciones. Factores como la edad y el peso de los animales, diferentes lotes de material, sexo de las personas y parcelas alejadas son ejemplos de variables externas a los tratamientos que pueden incrementar la variación entre las observaciones de la variable de respuesta. Usar bloques estratifica a las unidades experimentales (u.e.) en grupos homogéneos. Una buena elección del criterio de bloqueo resulta en menor variación entre las u.e. dentro de los bloques comparada con la variación entre u.e. de diferentes bloques. Generalmente los criterios de bloqueo son:

- Proximidad (parcelas vecinas).
- Características físicas (edad, peso, sexo).
- Tiempo.
- Manejo de las unidades experimentales en el experimento.

El diseño de bloques (completos) al azar implica que en cada bloque hay una sola observación de cada tratamiento, ver Figura 16. El orden en que se “corren” los tratamientos dentro de cada bloque es aleatorio (restricción en la aleatorización).²⁸

| | | Tratamientos | | | | | |
|---------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | ... | j | ... | k |
| Bloques | 1 | Y_{11} | Y_{12} | ... | Y_{1j} | ... | Y_{1k} |
| | 2 | Y_{21} | Y_{22} | ... | Y_{2j} | ... | Y_{2k} |
| | ... | | | ... | | ... | |
| | i | Y_{i1} | Y_{i2} | ... | Y_{ij} | ... | Y_{ik} |
| | ... | | | ... | | ... | |
| n | Y_{n1} | Y_{n2} | ... | Y_{nj} | ... | Y_{nk} | |

Figura 16. Así es como se separan los bloques al azar.

2.11 CUADROS LATINOS Y GRECOLATINOS

Cuando se pretende crear un algoritmo de generación de cuadrados latinos, con el fin de obtener un algoritmo de encriptación o des encriptación para un protocolo de comunicación seguro, debe ser de tal manera que el cuadrado latino se genere de forma rápida y cada cierto tiempo, y esto no debe representar una sobrecarga de tiempo o recursos (memoria, disco duro, etc.) en el protocolo. Por lo general, los algoritmos simples de generación de cuadrados latinos son de orden exponencial, por lo que el problema exige una cierta complejidad para que sea eficiente. Con el diseño en cuadro grecolatino se controlan tres factores de bloque además del factor de tratamientos, dentro de este modelo como el diseño en cuadro latino, todos los factores deberían de tener el mismo número de niveles K y el número de las observaciones necesarias debería seguir siendo K^2 este diseño por lo tanto es parte de una fracción del diseño completo en los bloques aleatorios con un factor principal y los tres factores secundarios que será requerido en K^4 observaciones. Los cuadros grecolatinos se obtienen a través de una superposición de dos cuadros latinos del mismo orden y ortogonales que tienen entre si los cuales serán uno de los cuadros tendrán letras latinas y las otras letras griegas, ver Figura 17.

a) Desarrollador. La persona encargada de realizar el desarrollo de todo el proyecto teniendo en consecuencia la más implicada y activa durante las etapas del mismo. Para esto debería de ser la encargad de todos los progresos y realizar la forma correcta de la gestión del proyecto del cual incluye la planificación encargándose de cumplirla, la redacción de la memoria y la preparación de su defensa delante del tribunal

b) Director y ponente. Las personas involucradas son las encargadas de ofrecer una guía y dar orientación en las diversas etapas de las que el desarrollador se ha de encargar. A través de diversas reuniones estas figuras han dado soporte en la selección de la mejor estrategia a seguir, proporcionando consejos en el caso que el desarrollador tenga dificultades. En el presente proyecto los encargados de realizar estos roles.

c) Beneficiarios. Todas las personas implicadas, tanto directa como indirectamente, son beneficiarios del resultado obtenido. Es decir, tanto el desarrollador, encargado del desarrollo de todas las etapas, se beneficia de la obtención de nuevos conocimientos

en áreas en las que desconocía su funcionamiento, como los usuarios finales los cuales obtendrán un beneficio directo con el aporte de los resultados del presente proyecto, el cual pretende aportar una línea de trabajo enfocada a la optimización del cálculo de cuadrados latinos.²⁹⁻³⁰

| | | |
|-----------|-----------|-----------|
| $A\alpha$ | $B\gamma$ | $C\beta$ |
| $B\beta$ | $C\alpha$ | $A\gamma$ |
| $C\gamma$ | $A\beta$ | $B\alpha$ |

Figura 17. Cuadro greco latino.

2.12 PERT CPM

La dirección de proyectos es una disciplina en la cual se aplican conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para satisfacer los requisitos del mismo. La elección de las herramientas y técnicas correctas para cada proyecto es una decisión fundamental para el éxito del proyecto. Muchas son las opciones que se presentan al director de proyectos, pero como la gestión del tiempo es materia de vital importancia, me inclinare por una herramienta de planificación necesaria para conseguir cumplir con el objetivo de fecha de entrega del producto del proyecto: el método PERT-CPM. Uno de los mayores problemas con que la dirección se enfrenta hoy en un proyecto complejo, es cómo coordinar las diversas actividades para lograr su objetivo a tiempo; PERT y CPM son dos métodos usados por la dirección para, con los medios disponibles, planificar el proyecto a fin de lograr su objetivo con éxito. Las técnicas de PERT y CPM preparan el plan mediante la representación gráfica de todas las operaciones que intervienen en el proyecto y las relacionan, coordinándolas de acuerdo con las exigencias tecnológicas, ver Figura 18.

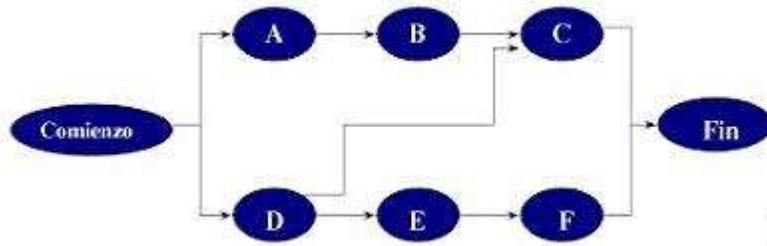


Figura 18. Red de actividades acomodadas.

El método PERT es más recomendable para los proyectos de investigación, en los cuales existe el problema de la estimación de los tiempos de trabajo y, por otro lado, tampoco hay antecedente para calcular los costes por unidad de tiempo, mientras que el CPM es aplicable a las construcciones en general en las cuales sea fácil estimar los tiempos y costes, y lo que interesa es saber cuál es la combinación coste-duración de cada tarea para que se pueda lograr el coste total mínimo del proyecto, ver Figura 19.

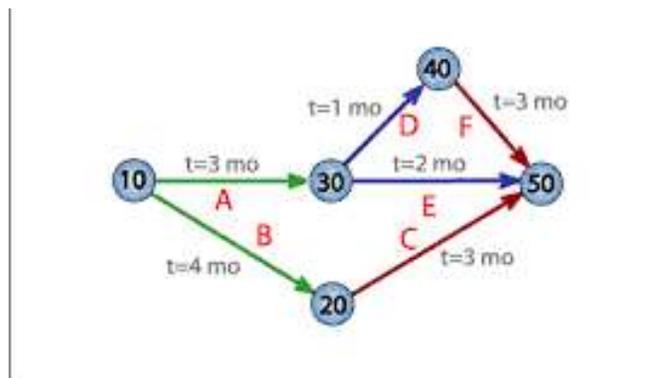


Figura 19. Evaluación del programa técnica de revisión (PERT).

Entre las ventajas de estas técnicas podemos señalar:

- Identificar qué trabajos serán necesarios primero y cuándo se deben realizar los acopios de materiales y problemas de financiación.
- Identificar qué trabajos hay y cuántos serán requeridos en cada momento.
- Determinar la situación del proyecto que está en marcha en relación con la fecha programada para su terminación.
- Señalar las actividades críticas del proyecto.

- Señalar las actividades no críticas y cuánto tiempo de holgura se les permite si se demoran.
- Si el proyecto está atrasado, ¿dónde se puede reforzar la marcha para contrarrestar la demora y qué coste produce?
- La planificación y programación de un proyecto se desarrolla con un coste total mínimo y duración óptima.³¹

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 Obtención de aceite vegetal de malezas para las pruebas de transesterificación

El presente trabajo es continuidad de un estudio a la par de extracción de aceites vegetales. Por tanto, se emplean 8 muestras de aceite vegetal para las pruebas de transesterificación (pruebas realizadas en otro trabajo no presentado en este estudio).

Todos los aceites vegetales fueron obtenidos bajo condiciones de operación diferentes. En la Tabla 4 se presentan las condiciones de obtención de aceite vegetal de aceitilla amarilla y acahuahualillo.

Tabla 4. Condiciones de operación de las muestras de aceite vegetal de estudio.

| Muestra | Tipo de solvente | Tiempo | Cantidad | Tipo de maleza | Año de cosecha |
|---------|------------------|--------|----------|----------------|----------------|
| 1 | Etanol | 4 hr | 10 g | Bf | 2020 |
| 2 | Etanol | 5 hr | 15 g | Sa | 2019 |
| 3 | Hexano | 4 hr | 10 g | Sa | 2019 |
| 4 | Hexano | 5 hr | 15 g | Bf | 2020 |
| 5 | Metanol | 4 hr | 15 g | Bf | 2019 |
| 6 | Metanol | 5 hr | 10 g | Sa | 2020 |
| 7 | Butanol | 4 hr | 15 g | Sa | 2020 |
| 8 | Butanol | 5 hr | 10 g | Bf | 2019 |

Bf=aceitilla amarilla; Sa=acahuahualillo.

3.1.2 Variables de operación (factores y niveles) del proceso de transesterificación

Conforme la literatura y pruebas preliminares (realizadas previas al establecimiento de diseño experimental final) se definieron las siguientes variables de operación (factores) y sus niveles para cada factor (2 por factor) que servirán para

determinar el arreglo ortogonal de estudio. En la Tabla 5 se presentan las condiciones manejadas.

Tabla 5. Factores y niveles experimentales.

| Factor (variable de operación) | Nivel 1 | Nivel 2 | Observaciones |
|--|---------|---------|---|
| Volumen de aceite vegetal (mL) | 25 | 50 | El aceite vegetal empleado es una mezcla de solvente original (ver Tabla 5) + aceite vegetal (no cuantificado). p.e. la muestra 7 (Tabla 5) es una mezcla de butanol + aceite vegetal de Sa. |
| Volumen de alcohol para el proceso de transesterificación (mL) | 7.5 | 10 | Se emplea etanol para todas las pruebas realizadas. Relación (v/v) aceite vegetal:etanol: 1:0.3 Nivel 1 1:0.2 Nivel 2. |
| Cantidad de catalizador (mL) | 0.131 | 0.175 | Se utiliza hidróxido de sodio (sosa caustica) en solución al 50% (densidad 1.48 g/cm ³). Relación (v/v) aceite vegetal:catalizador: 1:0.00525 Nivel 1. 1:0.0035 Nivel 2. |

3.1.3 Diseño experimental ortogonal de Taguchi

Conforme los catálogos de diseños de Taguchi,²⁵ los factores y niveles definidos en la sección 3.1.2 se seleccionó un arreglo ortogonal de Taguchi L4(2³) para llevarse a cabo, ver Tabla 3.

En la tabla 6 se muestra el arreglo definido de las condiciones de operación de las 4 muestras contempladas. Donde el factor 1 corresponde al Volumen de aceite vegetal, el factor 2 al volumen de alcohol (etanol) para el proceso de transesterificación y el factor 3 a la cantidad de catalizador.

Tabla 6. Factores y niveles experimentales empleadas en un arreglo L4(2³).

| | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|--------|----------|
| 1 | 25 mL | 7.5 mL | 0.131 mL |
| 2 | 25 mL | 10 mL | 0.175 mL |
| 3 | 50 mL | 7.5 mL | 0.175 mL |
| 4 | 50 mL | 10 mL | 0.131 mL |

En la Tabla 4 se presentan las condiciones de obtención de aceite vegetal de aceitilla amarilla y acuahualillo que fueron llevadas a cabo en otro trabajo de residencia profesional. Por tanto, se tuvo disponibilidad de 8 muestras de aceites vegetales. Al aplicar el diseño experimental de la tabla 6 resultan 32 pruebas de transesterificación. Por la cantidad de volumen disponible de cada una de las 8 muestras de aceite vegetal, se determinó aplicar únicamente a las 8 muestras las corridas 1 y 4 para las pruebas de transesterificación, ver Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de pruebas de transesterificación.

| Muestra (Tabla 4) | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|-------|--------|----------|
| 1 | 25 mL | 7.5 mL | 0.131 mL |
| 2 | 50 mL | 10 mL | 0.175 mL |
| 3 | 50 mL | 7.5 mL | 0.175 mL |
| 4 | 50 mL | 10 mL | 0.175 mL |
| 5 | 25 mL | 7.5 mL | 0.131 mL |
| 6 | 50 mL | 10 mL | 0.175 mL |
| 7 | 50 mL | 10 mL | 0.175 mL |
| 8 | 50 mL | 10 mL | 0.131 mL |

3.1.4 Proceso de transesterificación de aceite vegetal

Con el volumen de aceite problema (25 o 50 mL) se realizan las pruebas de transesterificación. Primeramente, el volumen se lleva a 55 ± 1 °C empleando una parrilla de calentamiento con agitación magnética. Se tiene preparado el volumen de etanol (7.5 o 10 mL) y la cantidad de catalizador (0.131 o 0.175 mL). El catalizador fue empleado como hidróxido de sodio, grado técnico en solución al 50% (densidad 1.48 g/mL).

Una vez alcanzado la temperatura de operación, se vierte primeramente el etanol y posteriormente la sosa con precaución. Enseguida se emplea agitación manual por 5 minutos para asegurar una mezcla homogénea. Terminado el tiempo de agitación se deja reposar el residuo final por unos minutos.

Finalmente, el residuo final se coloca en un embudo de separación y se deja reposar por 24 h. En esta etapa se pueden apreciar, por diferencias de densidad, 3 fases: la primera de ella en la parte superior donde se considera se deposita el biodiesel obtenido, la segunda fase en la zona media que es una mezcla entre glicerina y compuestos de saponificación obtenidos, y una tercera fase en la parte inferior que se aprecia de compuestos saponificados más concentrados. En la Figura 20 se muestra la etapa de separación.



Figura 20. Separación de prueba final de transesterificación.

Transcurrido el tiempo de separación, se realiza la recolección de las distintas capas resultantes mediante un filtrado simple con papel filtro grueso para separar los jabones y la glicerina existente.

El líquido final recolectado y filtrado es el que se emplea para realizar pruebas de caracterización simple.

3.1.5 Pruebas de caracterización de biodiésel

Se realizaron pruebas de flamabilidad (color de flama) y de lámina de cobre.

a) Prueba de flama. Simplemente se impregno un abatelengua de madera con el biodiésel y se combustiona directamente y donde se registra el color de flama obtenido.

b) Prueba de lámina de cobre. El biodiesel final se somete a pruebas de la corrosión por el método de manchado de lámina de cobre (referencias: NOM-L19-CT-1981 y NTE INEN 927:2013). En el caso de la prueba de corrosión se emplea para evaluar el grado relativo de corrosividad de un producto del petróleo como el combustible diésel. Dado que el biodiesel comparte similitudes con el diésel de hidrocarburos, se adapta esta prueba para el presente proyecto en donde se puede considerar que al haber corrosión en el cobre se supondrá que se tiene presencia cualitativa de biodiésel.

Tabla 8. Clasificación de prueba de lámina de cobre.

| Clasificación | Designación | Descripción |
|----------------------|----------------------|---|
| Lamina recién pulida | | |
| 1 | Ligeramente atacada | a. Color anaranjado claro, casi el mismo color de la lámina recién pulida |
| | | b. Anaranjado oscuro |
| 2 | Medianamente atacado | a. Vino tinto |
| | | b. Lavanda |
| | | c. Multicolor con azul lavanda y/o plateado, sobre fondo vino tinto |
| | | d. Plateado |
| | | e. Bronce o dorado |
| 3 | Muy atacada | a. Revestimiento color magenta sobre bronce |
| | | b. Multicolor con vivos rojo y verde pero sin gris |
| 4 | Corrosión neta | a. Negro claro, gris oscuro o marron con verde poco perceptible |
| | | b. Negro opaco o grafito |
| | | c. Negro brillante o azabache |

El biodiesel de aceite de acahualillo y aceitilla amarilla se expuso a oxidación mediante la presencia de un material metálico del cual en esta prueba se tomó como instrumento un tubo de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. El cual se sumergio en un matraz con capacidad de 125 ml el cual para este ensayo se colocaron 100 ml de muestra de biodiesel durante 3 horas en una parrilla eléctrica a $67^{\circ}\text{C} \pm 1$ cabe

mencionar que el matraz se cubrió con papel aluminio por la parte exterior para generar oscuridad dentro del líquido. Una vez que el tiempo cumplió con lo estipulado, tubo de cobre fue retirado del matraz con unas pinzas de laboratorio para dejarlo reposar aproximadamente 5 minutos, tiempo en el que el tubo de cobre se seco por completo sobre un pedazo de papel. Para que seguido de esto en otro matraz de la misma capacidad (125ml) se colocó benceno al mismo nivel que la muestra de biodiesel en el cual se introduciría el tubo de cobre con el fin de enjuagar el tubo previamente mencionado y finalmente dejar reposar y observar los cambios en la capa externa del tubo

3.1.6 Escalamiento de proceso de nivel laboratorio a planta piloto

La propuesta realizada se sustenta en la búsqueda, a través de las referencias, documentos y libros encontrados en los diversos medios digitales, de un equipo existente en el mercado debido a que ya están comprobados que cumplen con la función y satisfacen las necesidades requeridas para llevar a otro nivel de producción mayor al que se tiene actualmente

3.1.7 PERT CPM de los procesos

Se aplicaron las metodologías de PERT y CPM para determinar la ruta crítica de las actividades de la Transesterificación del aceite vegetal. A través de una lista de actividades secuenciales y esenciales para realizar con éxito este proceso.

3.1.8 Diseño completamente al azar (DCA)

La metodología DCA fue aplicada para cerciorar qué factores son los que causan problemas al proceso de Transesterificación.

3.1.9 MINITAB para los procesos

Se realiza un análisis ANOVA de un solo factor: valor vs muestra para obtener graficas de Tukey, graficas de Fisher y graficas de residuos de valor en el proceso de Transesterificación.

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 transesterificación de aceite vegetal | | | | | | | | | | |
| Modelación de proceso de transesterificación | | | | | | | | | | |
| Análisis estadístico | | | | | | | | | | |
| Propuesta de escalamiento | | | | | | | | | | |
| Asesorías | | | | | | | | | | |
| Evaluación y seguimiento de asesorías | | | | | | | | | | |
| Evaluación de reporte | | | | | | | | | | |
| Informe semestral | | | | | | | | | | |
| Elaboración reporte técnico (productos entregables) | | | | | | | | | | |

Figura 21. Cronograma de actividades general.

IV. RESULTADOS

4.1 PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE VEGETAL

Después de aplicar el diseño ortogonal de Taguchi definido, se obtuvieron residuos aproximados de 30-60 mL (según la muestra). Se sugiere que se logró obtener aceite vegetal de la especie de estudio y bajo su posterior proceso de transesterificación se sugiere que se logró obtener biodiesel bruto. De la Figura 22 a la 26 se presentan resultados de algunas muestras. Demás muestras presentan resultados similares, pero solo con un cambio de color de la sustancia final obtenida.



Figura 22. Separación de Jabones y biodiesel en el embudo de decantación cosecha 2019.



Figura 23. Separación de Jabones y biodiesel en el embudo de decantación semilla fresca 2020.

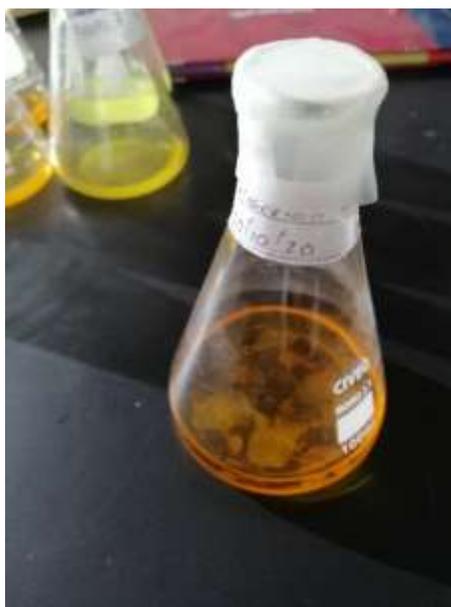


Figura 24. Fases de separación en el biodiesel.

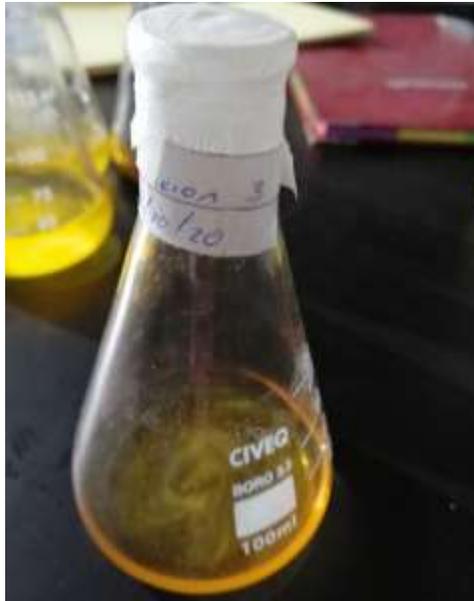


Figura 25. Biodiesel resultante de la filtración cosecha 2019.

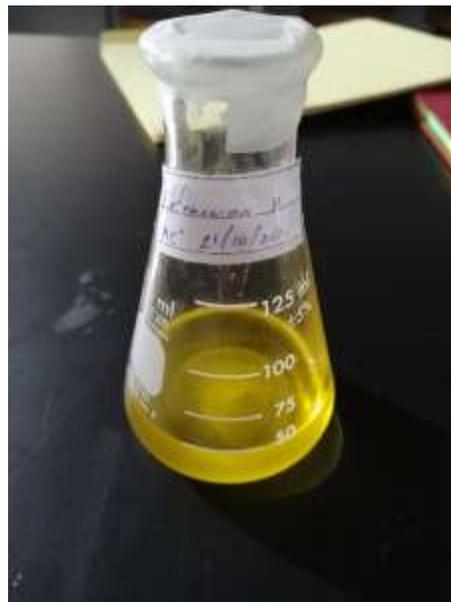


Figura 26. Biodiesel resultante de la filtración cosecha 2020.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE BIODIÉSEL LOGRADO

Las pruebas de flamabilidad denotan un color de llama diferente entre el solvente puro (amarillo) y el biodiesel bruto obtenido (un poco más naranja). En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos. En la Figura 27 se muestran resultados de prueba de flama.

Tabla 9. Resultados concentrados de prueba de flama

| Muestra | Observación |
|----------------------|---|
| Muestra 1 Etanol | Flama de base azul y punta naranja con una altura aproximada de 8 cm |
| Muestra 2 Etanol | Flama de tono naranja y altura aproximada de 3 cm |
| Muestra 3 Hexano | Flama de tono naranja y una altura de 13 cm aproximadamente |
| Muestra 4 Hexano | Flama de tono amarillo con base naranja y una altura aproximada de 10 cm |
| Muestra 5 Metanol | Flama de tono naranja con altura aproximada de 4 cm |
| Muestra 6 Metanol | Flama de base azul y punta naranja, con altura de 12 cm aproximadamente |
| Muestra 7 Butanol | Flama de tono azul en su mayoría con punta amarilla y una altura aproximada de 5 cm |
| Muestra 8 Butanol | Flama de base azul y punta amarilla 7 cm aproximadamente de altura |

Después de estas descripciones podemos apreciar que la muestra que produce más flama y por lo tanto es más notable es la muestra 3 que se compone de Hexano como el solvente principal desde la extracción de aceite y con botón de acahualillo de la cosecha 2019. Y de la misma manera la flama más pequeña, con menos duración, altura y color fue la muestra 2 compuesta de etanol en su totalidad y con un aceite

obtenido de aceitilla amarilla de la cosecha 2019. Teniendo en cuenta estas observaciones podremos concluir que, el hexano por sus propiedades generales de las cuales se puede apreciar que es uno de los principales solventes para la creación de gasolina y la extracción de aceite en semillas ya que es un solvente de reacción y materia prima para la síntesis. Y dentro de sus propiedades termodinámicas se aprecia que tiene un punto de ebullición bajo, así como la densidad ante otros compuestos es muy notable. Es un compuesto altamente inflamable y sus vapores pueden viajar a través de una fuente de ignición y tienen la capacidad de regresar al fuego. Así que se puede concluir que es uno de los mejores solventes con los cuales se trabajó a lo largo de este proyecto.

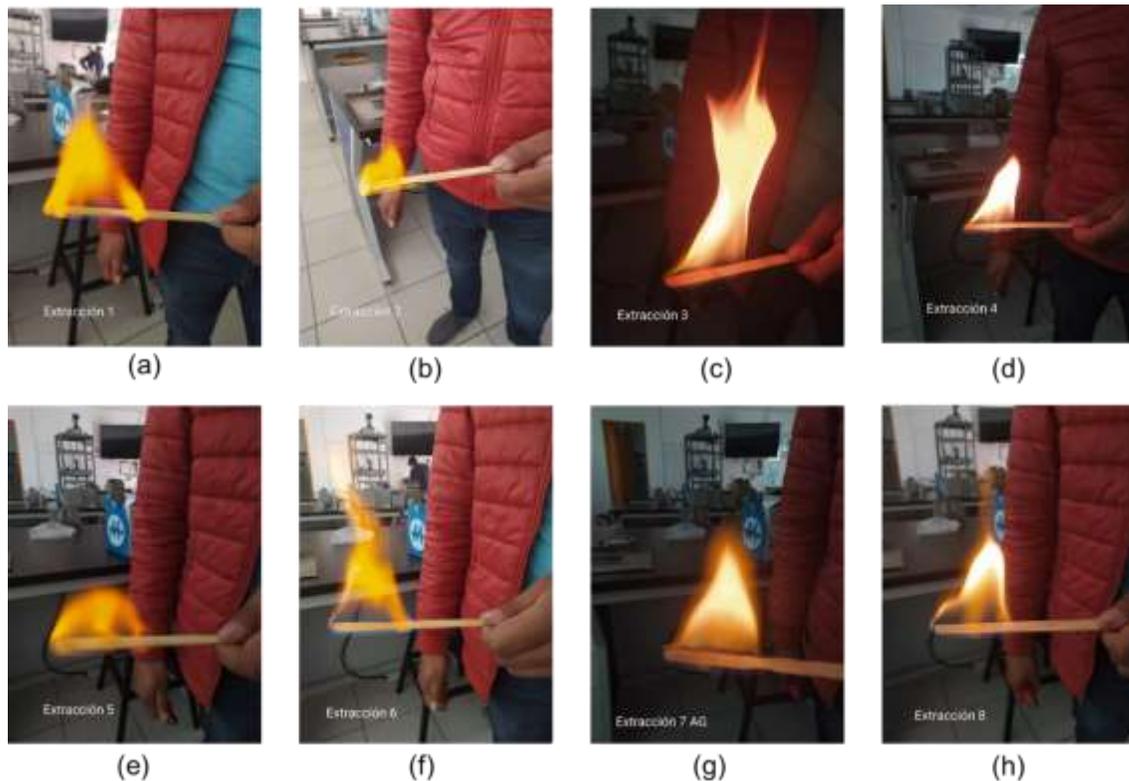


Figura 27. Prueba de flama: (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4, (e) muestra 5, (f) muestra 6, (g) muestra 7, (h) muestra 8.

La prueba de lámina de cobre denota un cambio de color en la superficie de la lámina con un manchado ligero de color naranja oscuro, lo que significa un ataque de corrosión ligero y por tanto biodiesel logrado. Teniendo un resultado en el nivel 1

ligeramente atacado y con un físico casi del mismo color que la lámina recién pulida. A pesar de ser un cambio sutil, tiene demasiado significado desde la perspectiva de la oxidación ya que al presentar cambios es un buen indicio ante el trabajo realizado. De la Figura 28 a la 30 se muestra la metodología empleada para la prueba de lámina de cobre.

Como trabajo a futuro se considera la caracterización química del biodiesel obtenido, así como presentar propuestas para hacer más eficiente el proceso.



Figura 28. *Vaciado de Benceno en el matraz.*



Figura 29. *Enjuague del tubo en benceno.*



Figura 30. Examen físico del tubo después del proceso de oxidación.

4.2 PERT y CPM

Estas técnicas permiten comprender un plan de actividades mediante ayudas graficas de todas las operaciones que intervienen en el proyecto, se relacionan mediante dependencias entre ellas. Todo esto nos ayuda a comprender la secuencia de cada paso.

Estas son las actividades a realizar para lograr culminar con el proceso de Transesterificación:

- A. Muestra de aceite aprox. 62.5 ml ± 5 como tolerancia obtenido de la destilación simple
- B. Vaciar a un matraz redondo de 150ml de capacidad para almacenarlo
- C. Poner la parrilla en 150°C para comenzar el proceso de calentamiento de la mezcla
- D. Colocar dentro de la muestra 10 ml de etanol para que comience a mezclarse uniformemente
- E. Insertar un termómetro para llevar la medición de la temperatura y regular cada paso

- F. Esperar a que llegue a 55°C la muestra, ya que es la temperatura indicada para comenzar el proceso de transesterificación
- G. Quitar de la parrilla y colocar en una superficie segura
- H. Agregar la cantidad de sosa caustica (NaOH) indicada previamente por la pared del matraz con cuidado
- I. Mezclar durante 5 minutos a una agitación constante para lograr una homogeneidad
- J. Vaciar la mezcla observada a un embudo de 500ml para comenzar la fase de decantación
- K. Sellar con parafina el embudo evitando tener fugas de gases o que el aire exterior sea factor de alteración en la mezcla
- L. Dejar reposar 1 día para observar la separación de jabones, glicerina y biodiesel y después poder filtrarlos obteniendo solo el líquido deseado
- M. Colocar en un vaso de precipitado 80ml de capacidad para vaciar la glicerina que será nuestro diseño por el momento dejándolo de lado en el proceso
- N. Cortar un rectángulo de papel filtro y doblar haciendo un cono para colocarlo en un embudo y ahí se depositen los jabones y grumos no deseados
- O. Filtrar la mezcla en cantidades pequeñas evitando derramar por los lados del embudo y esperar hasta que se deposite por completo en el matraz
- P. Sellar el matraz con parafina, para conservar la mezcla y dejarla reposar hasta su utilización

En la Tabla 10 se muestra la solución de antecesoros y en la Tabla 11 la solución por este método. En la Figura 31 se presenta el grafico PERT.

Tabla 10. Antecedentes de PERT y CPM (transesterificación).

| Actividad | Tiempo de Actividad | Predecesor 1 | Predecesor 2 |
|-----------|---------------------|--------------|--------------|
| A | 0 | - | |
| B | 10 | A | |
| C | 2 | - | |
| D | 5 | A | B |
| E | 2 | D | |
| F | 300 | E | |
| G | 2 | F | |
| H | 10 | G | |
| I | 300 | H | |
| J | 5 | I | |
| K | 2 | J | |
| L | 86400 | K | |
| M | 10 | L | |
| N | 20 | - | |
| O | 2 | N | |
| P | 2 | O | |

Tabla 11. PERT y CPM (solución de transesterificación).

| Actividad | Tiempo de Actividad | COMIENZO TEMPRANO | TERMINO TEMPRANO | INICIO TARDÍO | ACABADO TARDE | FLOJO |
|-----------------|---------------------|-------------------|------------------|---------------|---------------|-------|
| Proyecto | 87046 | | | | | |
| A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 0 |
| C | 2 | 0 | 2 | 87044 | 87046 | 87044 |
| D | 5 | 10 | 15 | 10 | 15 | 0 |
| E | 2 | 15 | 17 | 15 | 17 | 0 |
| F | 300 | 17 | 317 | 17 | 317 | 0 |
| G | 2 | 317 | 319 | 317 | 319 | 0 |
| H | 10 | 319 | 329 | 319 | 329 | 0 |
| I | 300 | 329 | 629 | 329 | 629 | 0 |
| J | 5 | 629 | 634 | 629 | 634 | 0 |
| K | 2 | 634 | 636 | 634 | 636 | 0 |
| L | 86400 | 87036 | 87036 | 636 | 87036 | 0 |
| M | 10 | 87036 | 87046 | 87036 | 87046 | 0 |
| N | 20 | 0 | 20 | 87022 | 87042 | 87022 |
| O | 2 | 20 | 22 | 87042 | 87044 | 87022 |

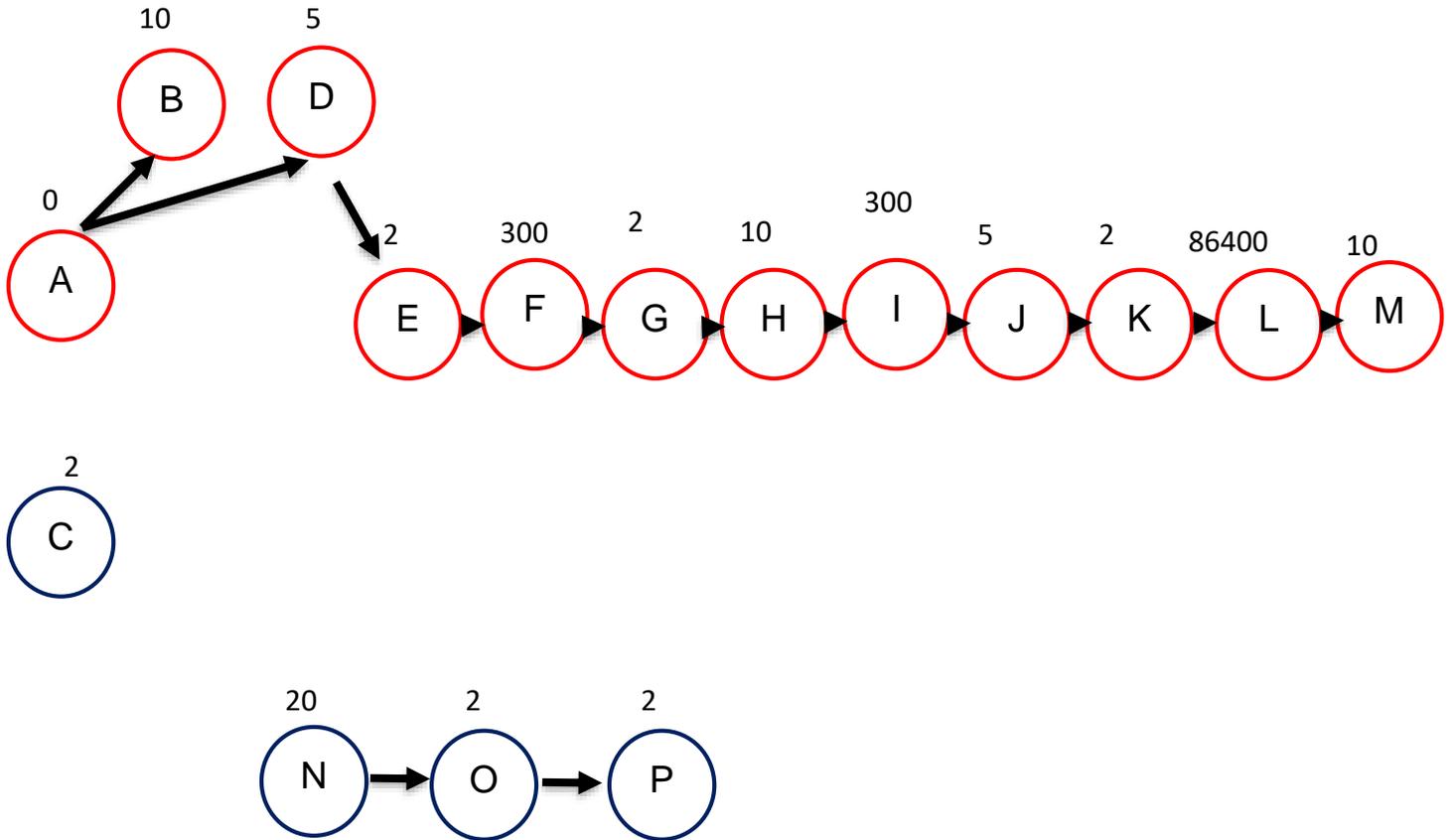


Figura 31. Grafica de procedencia PERT.

4.3 DCA (DISEÑO COMPLETAMENTE AL AZAR)

Tabla 12 . Diseño Completamente al Azar.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 | Muestra 6 | Muestra 7 | Muestra 8 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ml de mezcla | 25 | 25 | 50 | 50 | 25 | 25 | 50 | 50 |
| Etanol | 7.5 | 10 | 7.5 | 10 | 7.5 | 10 | 7.5 | 10 |
| Sosa Caustica | 0.131 | 0.175 | 0.175 | 0.131 | 0.131 | 0.175 | 0.175 | 0.131 |

Modelo lineal general: Valor vs. Muestra, Condiciones Método

Codificación de factores (-1, 0, +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|-------------|------|---------|------------------------|
| Muestra | Fijo | 8 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |
| Condiciones | Fijo | 3 | 1, 2, 3 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Muestra | 7 | 420.8 | 60.12 | 1.00 | 0.471 |
| Condiciones | 2 | 6120.7 | 3060.36 | 50.90 | 0.000 |
| Error | 14 | 841.7 | 60.12 | | |
| Total | 23 | 7383.2 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---------|---------|--------------------|----------------|
| 7.75366 | 88.60% | 81.27% | 66.50% |

Coeficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|-----------|-------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 15.47 | 1.58 | 9.77 | 0.000 | |
| Muestra | | | | | |
| 1 | -4.59 | 4.19 | -1.10 | 0.291 | 1.75 |
| 2 | -3.74 | 4.19 | -0.89 | 0.387 | 1.75 |
| 3 | 3.76 | 4.19 | 0.90 | 0.385 | 1.75 |
| 4 | 4.58 | 4.19 | 1.09 | 0.293 | 1.75 |
| 5 | -4.59 | 4.19 | -1.10 | 0.291 | 1.75 |
| 6 | -3.74 | 4.19 | -0.89 | 0.387 | 1.75 |
| 7 | 3.76 | 4.19 | 0.90 | 0.385 | 1.75 |

Condiciones

| | | | | | |
|---|-------|------|-------|-------|------|
| 1 | 22.03 | 2.24 | 9.84 | 0.000 | 1.33 |
| 2 | -6.72 | 2.24 | -3.00 | 0.010 | 1.33 |

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{Valor} = & 15.47 - 4.59 \text{ Muestra}_1 - 3.74 \text{ Muestra}_2 + 3.76 \text{ Muestra}_3 + 4.58 \text{ Muestra}_4 \\ & - 4.59 \text{ Muestra}_5 - 3.74 \text{ Muestra}_6 + 3.76 \text{ Muestra}_7 + 4.58 \text{ Muestra}_8 \\ & + 22.03 \text{ Condiciones}_1 - 6.72 \text{ Condiciones}_2 - 15.31 \text{ Condiciones}_3 \end{aligned}$$

ANOVA de un solo factor: Valor vs. Muestra

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

| Factor | Niveles | Valores |
|---------|---------|------------------------|
| Muestra | 8 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Muestra | 7 | 420.8 | 60.12 | 0.14 | 0.993 |
| Error | 16 | 6962.4 | 435.15 | | |
| Total | 23 | 7383.2 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---------|---------|--------------------|----------------|
| 20.8602 | 5.70% | 0.00% | 0.00% |

Medias

| Muestra | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|---------|---|-------|-----------|-----------------|
| 1 | 3 | 10.88 | 12.77 | (-14.65, 36.41) |
| 2 | 3 | 11.73 | 12.50 | (-13.81, 37.26) |
| 3 | 3 | 19.2 | 26.9 | (-6.3, 44.8) |
| 4 | 3 | 20.0 | 26.4 | (-5.5, 45.6) |
| 5 | 3 | 10.88 | 12.77 | (-14.65, 36.41) |
| 6 | 3 | 11.73 | 12.50 | (-13.81, 37.26) |
| 7 | 3 | 19.2 | 26.9 | (-6.3, 44.8) |
| 8 | 3 | 20.0 | 26.4 | (-5.5, 45.6) |

Desv.Est. agrupada = 20.8602

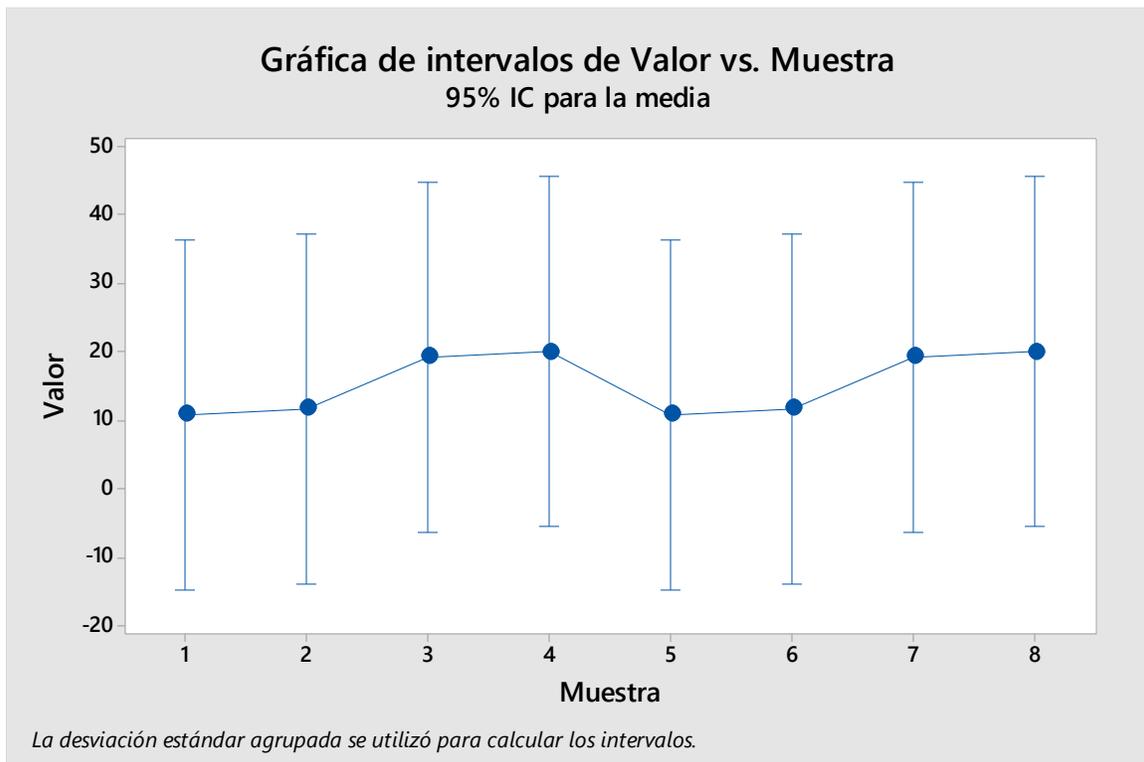


Figura 32. Grafica de intervalos Valor vs Muestra.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Muestra | N | Media | Agrupación |
|---------|---|-------|------------|
| 8 | 3 | 20.0 | A |
| 4 | 3 | 20.0 | A |
| 7 | 3 | 19.2 | A |
| 3 | 3 | 19.2 | A |
| 6 | 3 | 11.73 | A |
| 2 | 3 | 11.73 | A |
| 5 | 3 | 10.88 | A |
| 1 | 3 | 10.88 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

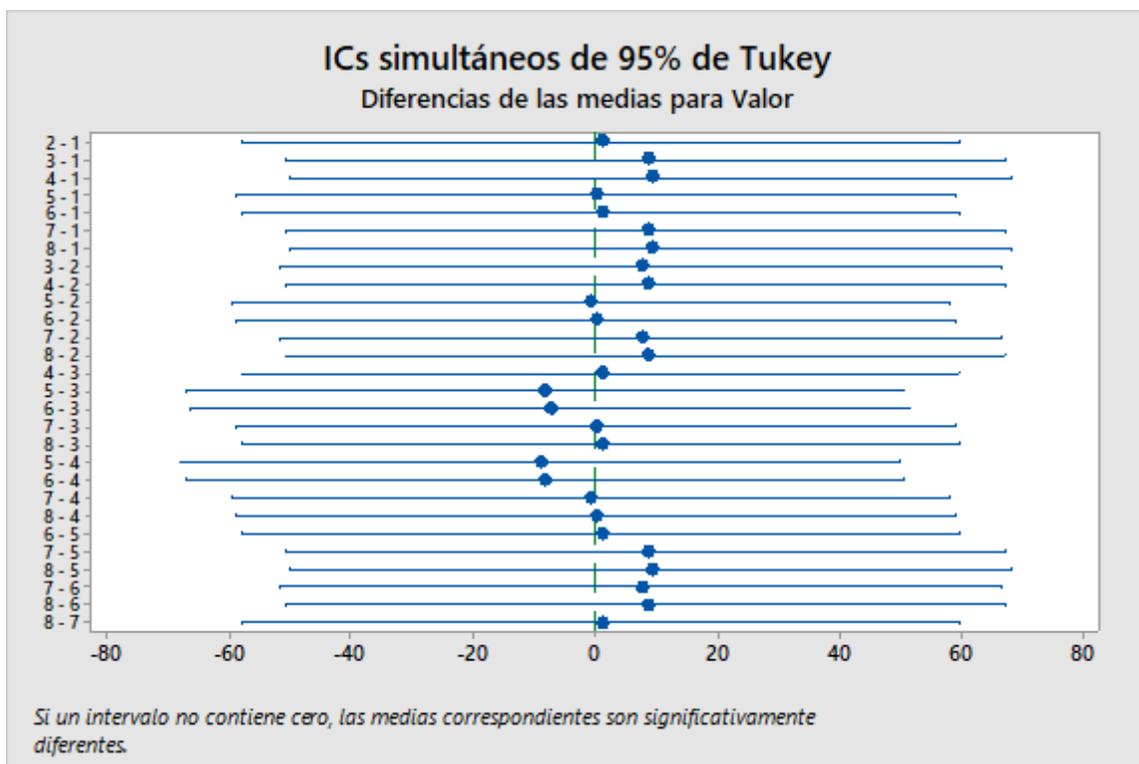


Figura 33. Tabla de resultados Tukey

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

| Muestra | N | Media | Agrupación |
|---------|---|-------|------------|
| 8 | 3 | 20.0 | A |
| 4 | 3 | 20.0 | A |
| 7 | 3 | 19.2 | A |
| 3 | 3 | 19.2 | A |
| 6 | 3 | 11.73 | A |
| 2 | 3 | 11.73 | A |
| 5 | 3 | 10.88 | A |
| 1 | 3 | 10.88 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

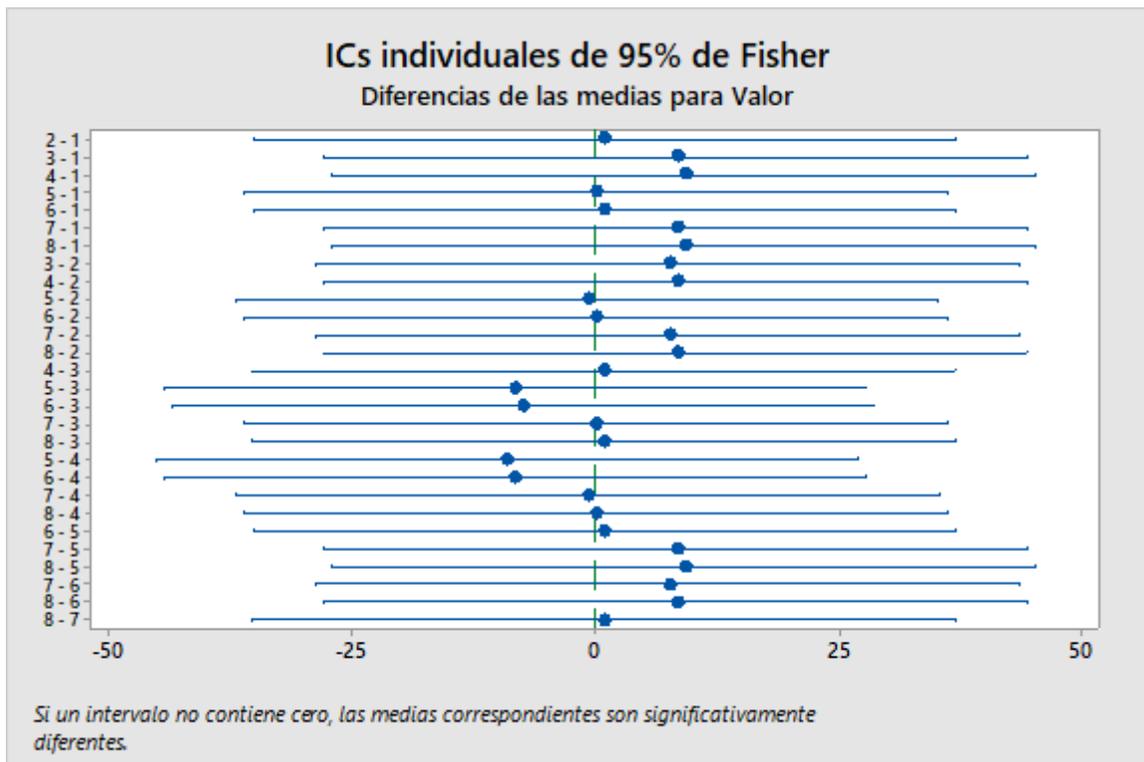


Figura 34. Gráfico de resultados Fisher.

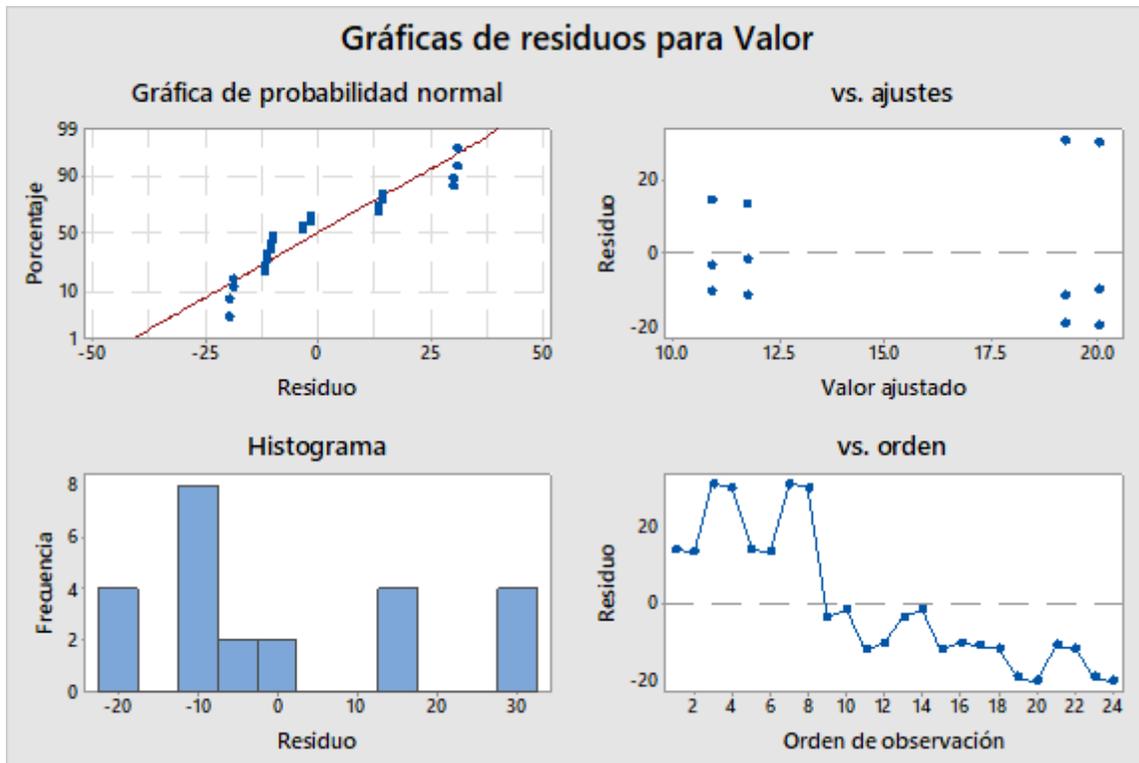


Figura 35. Gráfico de residuos para valor.

1. Normalidad de los errores

| |
|--|
| <p>Hipótesis:</p> <p>H_0 = Los valores se distribuyen normalmente</p> <p>H_1 = Los valores no se distribuyen normalmente</p> |
| <p>Nivel de significancia:</p> <p>$\alpha = 0.05$</p> |
| <p>P-valor = 0.005</p> |
| <p>Decisión:</p> <p>No se rechaza la hipótesis alterna</p> |
| <p>Conclusión:</p> <p>Con una significancia del 5% se cumple con la condcion de trabajo</p> |

2. ¿Al menos un valor es diferente a las demás?

| |
|---|
| Hipótesis: $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ (no hay diferencias significativas entre los valores) $H_i =$ Al menos una μ es diferente a las demás (Los valores tienen efectos en los resultados) |
| Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$ |
| Estadístico: $F = 0.14$ |
| P-valor = 0.993 |
| Decisión: No se rechaza la hipótesis alterna |
| Conclusión: No existe un valor que haga diferencia |

3.- ¿Qué Valor para realizar la transesterificación es el más apropiado?

Prueba Tukey

| Hipótesis: $H_0 = \mu_i = \mu_j$ $H_i = \mu_i \neq \mu_j$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|-------|------------|------------|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|
| Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Salida Minitab: <table border="1"><thead><tr><th>Muestra</th><th>N</th><th>Media</th><th>Agrupación</th></tr></thead><tbody><tr><td>8</td><td>3</td><td>20.0</td><td>A</td></tr><tr><td>4</td><td>3</td><td>20.0</td><td>A</td></tr><tr><td>7</td><td>3</td><td>19.2</td><td>A</td></tr><tr><td>3</td><td>3</td><td>19.2</td><td>A</td></tr><tr><td>6</td><td>3</td><td>11.73</td><td>A</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td><td>11.73</td><td>A</td></tr><tr><td>5</td><td>3</td><td>10.88</td><td>A</td></tr><tr><td>1</td><td>3</td><td>10.88</td><td>A</td></tr></tbody></table> | Muestra | N | Media | Agrupación | 8 | 3 | 20.0 | A | 4 | 3 | 20.0 | A | 7 | 3 | 19.2 | A | 3 | 3 | 19.2 | A | 6 | 3 | 11.73 | A | 2 | 3 | 11.73 | A | 5 | 3 | 10.88 | A | 1 | 3 | 10.88 | A |
| Muestra | N | Media | Agrupación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 3 | 20.0 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 3 | 20.0 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 3 | 19.2 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3 | 19.2 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 3 | 11.73 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 3 | 11.73 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 3 | 10.88 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 | 10.88 | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Conclusión:

Mediante el método Tukey con una significancia del 5% se puede apreciar que las condiciones de trabajo son apropiadas para la transesterificación sin embargo no existe un método que difiera ente la forma de trabajo

Recordemos: Las medidas que no comparten una letra son significativamente diferente

4.3 ESCALAMIENTO DE PROCESO DE NIVEL LABORATORIO A NIVEL PLANTA PILOTO

Después de la investigación a través de las referencias, documentos y libros encontrados en los diversos medios podemos concluir en que existen equipos dentro del mercado los cuales cumplen con la función y satisfacen las necesidades requeridas para llevar a otro nivel de producción mayor al que se tiene actualmente.

En la Figura 36 se presenta el modelo industrial Mod. UPBa/EV del fabricante <https://www.elettronicaveneta.com/es/prodotto/planta-piloto-para-la-produccion-de-biodiesel/>



Figura 36. Equipo propuesto para escalamiento del proyecto.

Este modelo incluye todas las características técnicas del mod. UPB/EV, y además los siguientes componentes suplementarios:

- Controlador digital de microprocesador tipo PID, con tarjeta serie
- Software de supervisión en ambiente Windows que permite controlar señales ON-OFF, señales analógicas procedentes del controlador PID, trend en tiempo real y trend histórico
- Transesterificación de un aceite vegetal
- Desorción de la glicerina
- Lavado del biodiesel
- Recuperación del metanol

Alimentación: 230 Vca 50 Hz monofásica - 2 kVA (Otra tensión y frecuencia bajo pedido)

Dimensiones: 1300 x 700 x 1900 mm

Peso: 180 kg

DATOS TÉCNICOS:

- Estructura de acero inox AISI 304 con ruedas
- Reactor polifuncional de vidrio borosilicato y acero inox AISI 304, provisto de moto agitador y de condensador, capacidad de 18 litros
- Sistema de calentamiento con resistencias eléctricas provisto de termostato
- Tanque de reactivo/catalizador de vidrio borosilicato y acero inox AISI 304, provisto de sistema de agitación
- 2 tanques de recuperación de vidrio borosilicato
- Cuadro eléctrico IP55, conforme a las normas CE, provisto de sinóptico e interruptor automático diferencial

El biodiesel es un carburante líquido que se obtiene por transesterificación de materias primas regenerables, como por ejemplo los aceites vegetales o las grasas animales. Las ventajas de este combustible con respecto a los de origen fósil son numerosas:

- Muy bajo contenido de azufre ($< 0,001\%$) responsable del fenómeno de las lluvias ácidas;
- Reducción de las emisiones de polvos hasta 50%;
- No contiene benceno u otros componentes cancerígenos;
- Ya que tiene un alto punto de inflamabilidad, no está clasificado como material peligroso y es fácil de manipular con seguridad; altamente biodegradable (en caso de dispersión no contamina);
- Alto poder lubricante (disminuye el desgaste del motor);

La planta está dotada fundamentalmente por un reactor polifuncional que permite llevar a cabo todas las operaciones típicas de la producción del biodiesel: esterificación, transesterificación, lavado y recuperación del metanol.

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 obtener biodiesel a partir de las reacciones de transesterificación realizadas, las pruebas de flama observadas y la prueba de lámina de cobre llevada a cabo. Lo anterior bajo el diseño experimental propuesto.

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) Vazquez, A. L. (Enero de 2015). *Desarrollo y perspectivas de energía renovable en Mexico* . Obtenido de Desarrollo y perspectivas de energía renovable en Mexico : <http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/390/09LariosVazquez.pdf>
- (2) S.Bonilla, C. (2019). *Dimension Juridica de la energía eléctrica y las energías renovables en Mexico*. Obtenido de Dimension Juridica de la energía eléctrica y las energías renovables en Mexico: <https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/rdigdad22&div=14&id=&page=>
- (3) Rodriguez, S. (22 de 07 de 2019). *Energía Renovable en Mexico: Retos y Oportunidades* . Obtenido de Energía Renovable en Mexico: Retos y Oportunidades : <https://www.revistaespacios.com/a19v40n25/a19v40n25p29.pdf>
- (4) Fernando Daniel Ramos, M. S. (2016, Enero). *CONICET*. Retrieved from CONICET: CONICET_Digital_Nro.cf291889-a370-4b7a-915b-4de3e1058c97_A.pdf
- (5) Lisando, G. (2014). *Cadena de abastecimiento de ciclo cerrado aplicada al reciclaje de aceites vegetales usados* . Obtenido de Cadena de abastecimiento de ciclo cerrado aplicada al reciclaje de aceites vegetales usados : https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=https%3A%2F%2Fri.it%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F191%2FTesis%2520-%2520CACC%2520AVU.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&btnG=#d=g_s_cit&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AGtsIAU4sFgMJ%3Ascholar.go
- (6) Tamayo, A. C. (2012). *OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES COMESTIBLES*. Obtenido de OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES COMESTIBLES: <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/1918/1/BQ%2029.pdf>
- (7) Meniz, O. (2018). *Mejora de Procesos para optimizar los volúmenes de obtención de glicerina y biodiésel en laboratorio a partir de aceite vegetal reciclado*. Obtenido de Mejora de Procesos para optimizar los volúmenes de obtención de glicerina y

biodiésel en laboratorio a partir de aceite vegetal reciclado:
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/24359/Osorio_MMG.pdf?sequence=4&isAllowed=y

- (8) Demirbas, A. (2008). *Biodiesel A Realistic Fuel Alternative*. Turkey : Springer.
- (9) Hoyos, J. A. (1 de Junio de 2010). *Optimización de condiciones de operación en la transesterificación de aceites* . Obtenido de Optimización de condiciones de operación en la transesterificación de aceites de: <https://www.redalyc.org/pdf/903/90315226010.pdf>
- (10) Ortega, C. (10 de Junio de 2014). *Transesterificación de aceites vegetales empleando*. Obtenido de Transesterificación de aceites vegetales empleando: <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250640010.pdf>
- (11) Lopez, L. (Junio de 2015). *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado*. Obtenido de Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado: <https://www.redalyc.org/pdf/477/47736230010.pdf>
- (12) Blanco Y., & Leyva Á., (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospedadores de enemigos naturales. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*. 28 (2). p 21-28
- (13) Rendón-Aguilar, B., Bernal-Ramírez, L. A. & Sánchez-Reyes, G. (15 de marzo de 2017). Las plantas arvenses: más que hierbas del campo. Recuperado de <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/todos-los-numeros/articulos-antteriores/226-las-plantas-arvenses?tmpl=component&print=1>
- (14) García-Regalado, G. (2015). Plantas medicinales de Aguascalientes. Aguascalientes, Ags., México: Universidad Autónoma de Aguascalientes, p 20-21.
- (15) Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. (s.f.). *Bidens odorata* Cav. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/bidens-odorata/fichas/ficha.htm#9.%20Referencias>
- (16) Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. (s.f.). *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/bidens-ferulifolia/fichas/ficha.htm>

- (17) Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. (s.f.). *Simsia amplexicaulis* (Cav.) Pers. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/simsia-amplexicaulis/fichas/ficha.htm>
- (18) Naturalista. (2020, Noviembre 17). *Naturalista*. Retrieved from Naturalista: <https://www.naturalista.mx/taxa/850963-Simsia-lagasceiformis>
- (19) Hernandez, J. (Agosto de 2007). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE BIODIESEL*. Obtenido de DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE BIODIESEL : <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- (20) Zapata, C. D. (10 de Noviembre de 2006). *PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA*. Obtenido de PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/894/1305>
- (21) Garcia, R. (8 de Marzo de 2011). *Planta Piloto, con Fines Experimentales, para la Producción de Biodiesel*. Obtenido de Planta Piloto, con Fines Experimentales, para la Producción de Biodiesel: http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/354/346
- (22) Zapata-Gómez A., & Sarache-Castro W. A.. (2014). Mejoramiento de la calidad del café soluble utilizando el método Taguchi. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 22(1), 116-124. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000100011>
- (23) Minitab.com. (2019). Diseños de Taguchi. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>
- (24) 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.
- (25) 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/>

- (26) J.Castillo. (2007). *Papel de la estadística en la investigación científica* . Obtenido de *Papel de la estadística en la investigación científica* : <http://eprints.uanl.mx/12472/1/A5.pdf>
- (27) Calleja-Acosta, P. E., Iglesias Martínez, M. E., & Carmona Martínez, J. F.. (2013). Linux embebido en FPGA para sistemas de monitoreo industrial. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 7(1), p 44-54.
- (28) Calero, C. (2012). *Calidad del producto y proceso de software*. Ra-Ma
- (29) GUTIERREZ, P. H y DE LA VARA, S. R. 2008. Segunda edición. Análisis y Diseño de Experimentos. Mc Graw Hill.
- (30) MONTGOMERY, C.D. Diseño y Análisis de Experimentos. Segunda edición. LIMUSA WILEY
- (31) Manuel de los Reyes García M., J. C. (1992). *Investigacion de operaciones I*. México: UAM-Azcapotzalco.

ANEXO 1

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



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Dirección

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Pabellón de Arteaga, Ags.,
No. de Oficio:
Asunto:

3/agosto/2020
D 026/2020
Carta aceptación
residencia
profesionales

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

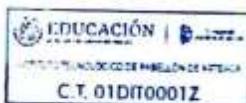
PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el C. FABIÁN ALEJANDRO PIZAÑA VALADEZ, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 161050478, ha sido aceptado para realizar en esta Institución su proyecto de Residencia Profesional denominado "Diseño de un proceso a escala de laboratorio de transesterificación de aceite vegetal de la aceitilla amarilla (*Bidens ferulifolia* Jacq.) DC.; identificación de variables de operación y propuesta de escalamiento a nivel planta piloto" durante el periodo de agosto-diciembre 2020, 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 José Alonso Dena Aguilar (asesor externo) y Oscar Martín Nájera Solís (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
"Terra Sempre Fértil"

HUMBERTO AMBRIZ DELGADILLO
DIRECTOR



C.p. Edgar Zacarías Moreno. - Subdirector Académico. I.T. Pabellón de Arteaga.
Archivo.
HAD/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km 1, C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel: 01 (465) 9562730 y 9562482 ext. 100 e-mail: dir_parteaga@tecnm.mx
www.tecnm.mx | https://pabellon.tecnm.mx



ANEXO 2

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



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Dirección

2020, Año de Leona Vicario, Benemerita Madre de la Patria

Pabellón de Arteaga, Ags.,
No. de Oficio:
Asunto:

11/diciembre/2020
C-047/2020
Carta conclusión
residencias
profesionales

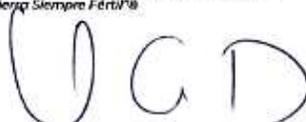
MA. MAGDALENA CUEVAS MARTÍNEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el C. **FABIÁN ALEJANDRO PIZAÑA VALADEZ**, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 161050478, concluyó satisfactoriamente en esta Institución su proyecto de Residencia Profesional denominado "Diseño de un proceso a escala de laboratorio de transesterificación de aceite vegetal de malezas: identificación de variables de operación y propuesta de escalamiento a nivel planta piloto" durante el periodo de agosto-diciembre 2020, 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 José Alonso Dena Aguilar (asesor externo) y Oscar Martín Nájera Solís (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 enviarte un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica.
"Tierra Siempre Fértil!"


HUMBERTO AMBRIZ DELGADILLO
DIRECTOR



C.p. Edgar Zacañas Moreno. - Subdirector Académico. I.T. Pabellón de Arteaga.
Archivo.
HAD/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km 1, C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. 01 (463) 9582730 y 9582482 ext. 100 e-mail: dir_parteaga@tecnm.mx
www.tecnm.mx | https://pabellon.tecnm.mx

