



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Departamento de Ingenierías

**REPORTE FINAL PARA ACREDITAR LA RESIDENCIA
PROFESIONAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

PRESENTA:
DARÍO ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ

CARRERA:
INGENIERÍA MECATRÓNICA

***[MANUFACTURA E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE
COAGULADO DE FILAMENTOS DE PLÁSTICO OBTENIDOS EN UNA
MÁQUINA EXTRUSORA HÍBRIDA HORIZONTAL]***

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



MMA. EDGAR ZACARÍAS MORENO
Asesor externo

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
Asesor interno

Diciembre de 2024

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga y en especial al Laboratorio de Conversión de la Energía, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Agradezco mucho también al Dr. José Alonso Dena Aguilar y al MMA. Edgar Zacarías Moreno, a quienes, sin su valiosa ayuda no hubiese sido posible la realización y edición de este trabajo.

A mis amigos, a mis compañeros de trabajo y mis padres por su apoyo tanto físico como moral.

RESUMEN

“MANUFACTURA E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE COAGULADO DE FILAMENTOS DE PLÁSTICO OBTENIDOS DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA HIBRIDA HORIZONTAL”

Por: **DARÍO ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ**

En este estudio se presenta la manufactura de un módulo de coagulado de filamentos de plástico, así como la implementación del módulo en pruebas de extrusión de filamentos poliméricos. A partir de los diseños mecánicos del módulo de coagulado (no presentados) se aplicaron técnicas de manufactura (corte, soldadura, esmerilado, pintado) para la construcción del módulo. La implementación del módulo de coagulado se realizó mediante la puesta en operación del dispositivo en pruebas de extrusión de filamentos de plástico de polietileno de baja densidad bajo un diseño experimental ortogonal. Bajo las condiciones de operación establecidas se determinó que se logran filamentos poliméricos bajo una capacidad de extrusión de 0.645 kg/h ya que el uso del módulo de coagulación permitió que fueran sometidos a enfriamiento y convertidos en hilaturas poliméricas. El presente proyecto de residencia profesional se deriva del proyecto de Estancias Posdoctorales por México (EPM), modalidad 1, CONAHCYT, “Diseño y construcción de una máquina extrusora solar horizontal de tornillo simple con calentamiento mayor a 200 °C mediante un sistema automático de concentración solar para su implementación en la industria del reciclaje de plásticos”: convocatoria 2022(1)_renovación 2023. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto de EPM proponente. 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 de diseño mecánico de un módulo de coagulado para filamentos de plástico extruidos.

Dirigido por:

MMA. Edgar Zacarías Moreno

Dr. José Alonso Dena Aguilar

ÍNDICE

	Pág.
I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción de la empresa u organización y del puesto o área de trabajo del residente.....	1
1.3 Problema(s) a resolver.....	3
1.4 Justificación.....	4
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1 Objetivo general.....	5
1.5.2 Objetivos específicos.....	5
1.6 Alcances y limitaciones.....	5
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 RECICLAJE DE PLÁSTICO POR EXTRUSIÓN.....	6
2.2 PELLETS DE PLÁSTICO.....	7
2.3 PROCESO DE PELETIZADO.....	8
2.4 TÉCNICAS DE MANUFACTURA.....	10
2.5 ARREGLOS ORTOGONALES DE TAGUCHI.....	12
III. DESARROLLO	14
3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	14
3.1.1 Diseños mecánicos CAD 3D.....	14
3.1.2 Condiciones de operación de estudio.....	14
3.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	16
IV. RESULTADOS	17
4.1 DISEÑOS DEL MÓDULO DE COAGULACIÓN.....	17
4.2 MANUFACTURA DEL MÓDULO DE COAGULACIÓN.....	19
4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE COAGULACIÓN.....	26

	Pág.
4.3.1 Resultados experimentales de extrusión.....	26
V. CONCLUSIONES.....	33
VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS.....	34
VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	35
Anexo 1. Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional.....	37
Anexo 2. Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional.....	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes de una máquina extrusora de plástico horizontal.....	9
Tabla 2. Factores y niveles experimentales empleados en el arreglo L4(2 ³) de estudio.....	14
Tabla 3. Resultados promedio de las pruebas de extrusión realizadas.....	26

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.....	3
Figura 2. Ejemplo de máquina extrusora de plástico.....	6
Figura 3. Ejemplo de plástico extruido en gránulos.....	7
Figura 4. Esferas de plástico de entre 1 y 5 milímetros de diámetro.....	8
Figura 5. Componentes típicos de una máquina extrusora horizontal de plásticos.....	9
Figura 6. Mecanizado por fresado. Vista de máquina fresadora del taller sede.....	10
Figura 7. Soldadura MMA.....	11
Figura 8. Soldadura G/MAG.....	11
Figura 9. Corte con desprendimiento de viruta.....	12
Figura 10. Diseños ortogonales de Taguchi fraccionados.....	13
Figura 11. Máquina extrusora híbrida de estudio.....	15
Figura 12. Aspecto del plástico de trabajo colocado en la tolva de alimentación...	15
Figura 13. Cronograma de actividades.....	16
Figura 14. Diseño isométrico integral del proyecto.....	17

	Pág.
Figura 15. Dibujo técnico del módulo de coagulado: tanque de enfriamiento.....	18
Figura 16. Metrología de piezas del sistema.....	19
Figura 17. Soldadura de la base del tanque de enfriamiento.....	20
Figura 18. Armado de base del tanque de enfriamiento.....	20
Figura 19. Ensamble de base del tanque de enfriamiento.....	21
Figura 20. Tanque de enfriamiento del módulo de coagulado concluido.....	21
Figura 21. Taladrado de soportes de la base de la torre.....	22
Figura 22. Ensamblado de soportes de la base la torre.....	22
Figura 23. Preensamble de los soportes de la base de la torre.....	23
Figura 24. Corte por plasma de bases de nivelación de torre.....	23
Figura 25. Pintado de piezas de la torre	24
Figura 26. Pintado de la torre concluida.....	24
Figura 27. Aspecto de la torre concluida.....	25
Figura 28. Material en tolva de alimentación del proceso de la corrida 3-eléctrica	27
Figura 29. Aspecto del material extruido a la salida de la extrusora del proceso de la corrida 3-eléctrica SIN el uso de módulo de coagulado.....	27

	Pág.
Figura 30. Aspecto “pata de elefante” del material extruido ya enfriado y resultante del proceso de la corrida 2-híbrida SIN el uso de módulo de coagulado	28
Figura 31. Módulo de coagulado: componentes y aspecto de salida del filamento polimérico de la extrusora CON el uso de módulo de coagulado.....	28
Figura 32. Aspecto del filamento polimérico sumergido en agua de enfriamiento CON el uso de módulo de coagulado.....	29
Figura 33. Recolección manual de filamento de plástico CON el uso de módulo de coagulado.....	29
Figura 34. Sistema completo del módulo de coagulado.....	30
Figura 35. Aspecto del filamento de plástico extruido y recolectado CON el uso de módulo de coagulado.....	30
Figura 36. Registro de lecturas de irradiación solar durante el proceso de la corrida 2-híbrida.....	31
Figura 37. Registro de lecturas de temperatura durante el proceso de la corrida 2-híbrida.....	31
Figura 38. Gráfica de extrusión (T vs t) de la corrida 2-híbrida.....	32

I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 Introducción

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

Uno de estos proyectos se refiere a la extrusión de filamentos de plásticos empleando una máquina extrusora híbrida.

En este trabajo se manufactura e implementa un módulo de coagulado para la obtención de filamentos poliméricos. La implementación del módulo de coagulado se realizó mediante la puesta en operación del dispositivo en pruebas de extrusión de filamentos de plástico de polietileno de baja densidad bajo un diseño experimental ortogonal.

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

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

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

Misión

Brindar un servicio de educación superior de calidad comprometido con la generación, difusión y conservación del conocimiento científico, tecnológico y humanista, a través de programas educativos que permitan un desarrollo sustentable, conservando los principios universales en beneficio de la humanidad.

Visión

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

Objetivos de la empresa

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

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

Valores

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

- Compromiso. - lograr propósitos comunes mediante el trabajo responsable y en equipo, mejorando permanentemente el ser, hacer y tener mediante la participación activa y el liderazgo compartido.
- Responsabilidad. - decidir y actuar conforme al análisis previo de las consecuencias inmediatas o mediatas de las acciones.

- Respeto. - actitud personal y colectiva hacia la conservación, mejoramiento y protección de las diversas formas de vida, además de la aceptación de la diversidad propia de lo humano.
- Cooperación. - facilitar condiciones que allanen el trabajo de los demás, y capacitar a toda la gente para propiciar su desarrollo personal y profesional dentro y fuera de la institución.
- Honestidad. - liderazgo que toma decisiones con base en una información completa, retroalimentando directamente con resultados e impacto mutuo, dando transparencia a cada una de las acciones personales e institucionales.
- Equidad. - crear un ambiente que permita establecer un sistema de reconocimiento al esfuerzo individual y de grupo en la institución.

En la Figura 1, se presenta el organigrama de la institución, así como el área de trabajo del residente. Las funciones del residente son propias del proyecto de residencia y se enfocan al desarrollo del proyecto.

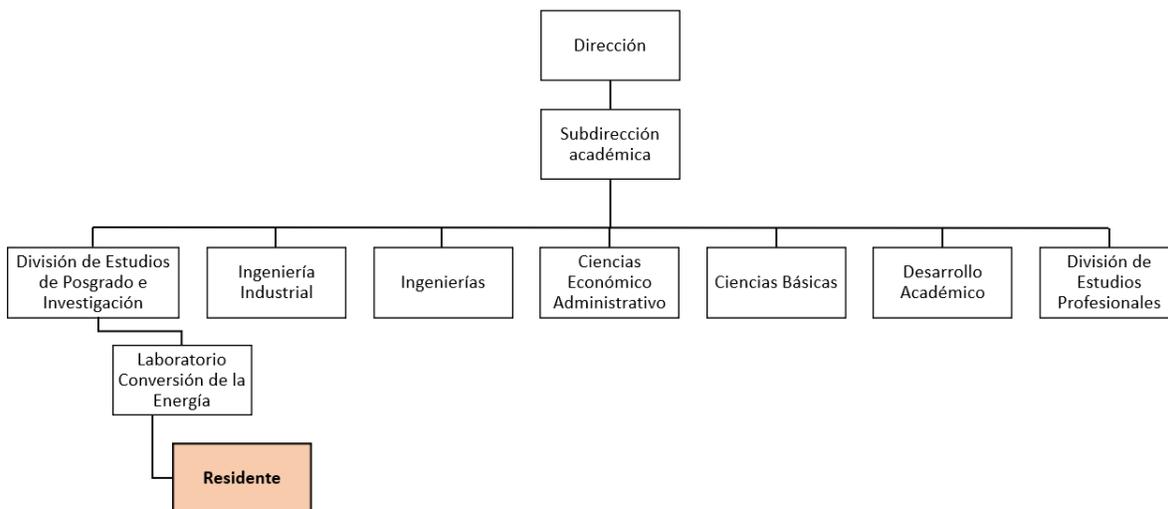


Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.

1.3 Problema(s) a resolver

El pellet es un concepto que se aplica a gránulos comprimidos de un material determinado en forma de pequeños cilindros que posteriormente son usados para la fabricación de

diversos artículos. Convencionalmente las peletizadoras de plástico se integran de un sistema de extrusión en donde el plástico se plastifica. Es por ello que se ha estudiado la fabricación de máquinas peletizadoras. Sin embargo, los trabajos reportados son escasos y están principalmente orientados a estudios académicos sin el perfil pertinente para llegar a su implementación aplicada. Adicional a lo anterior, los trabajos reportados no especifican el desarrollo de los módulos auxiliares y complementarios del proceso.

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

1.- Desarrollo de un sistema de peletizado con módulos de operación integrados:

- Diseño de un módulo de coagulado para el enfriamiento del filamento polimérico recién extruido.
- Manufactura de un módulo de coagulado para obtener filamentos de plástico con gradiente de temperatura manipulable.
- Implementación del módulo de coagulado en pruebas de extrusión de filamentos poliméricos.

Obtener filamentos de plástico extruido con un gradiente de temperatura manipulable puede otorgar un valor agregado a un sistema de extrusión.

1.4 Justificación

En la institución sede del proyecto se cuenta con una máquina extrusora híbrida horizontal (patente en trámite) con una capacidad de producción de filamentos de plástico amorfos por lo que es necesario diseñar, manufacturar e implementar demás módulos de fabricación de peletizado para obtener productos poliméricos cilíndricos (pellets) de geometría regular y controlada. Dentro de los módulos convencionales de peletizado se encuentran: coagulado, secado, estirado, bobinado y corte. En particular, el módulo de coagulado es la operación unitaria que permite inicialmente disminuir la temperatura (por enfriamiento por inmersión) de salida del filamento y simultáneamente comenzar la solidificación de las capas externas del filamento para continuar su proceso de acabado final en demás operaciones unitarias. El coagulado del filamento extruido es

el primer paso para definir algunas propiedades mecánicas del filamento, como lo es, la cristalización del material. Es por ello que se requiere diseñar, construir e implementar un modulo de coagulado para ir conformando el proceso de peletizado requerido para completar la funcionalidad de la máquina extrusora hibrida horizontal prefabricada.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Manufacturar e implementar un modulo de coagulado de filamentos de plástico obtenidos de una maquina extrusora hibrida prefabricada mediante la aplicación de técnicas de manufactura y de diseño experimental para la obtención de pellets amorfos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Comprender el proceso de obtención de pellets por extrusión mediante una revisión exhaustiva de la literatura para elegir las condiciones de operación y operaciones unitarias que lo integran.
- Comprender las características del proceso de coagulado de filamentos plásticos mediante una revisión exhaustiva de la literatura para establecer una estrategia de implementación de un módulo de coagulado a una máquina extrusora hibrida prefabricada.
- Construir el modulo de coagulado mediante el uso de técnicas de manufactura para su puesta en operación.
- Implementar el modulo de coagulado mediante la obtención de filamentos de plástico utilizando la máquina extrusora hibrida existente para validar el diseño construido bajo una metodología experimental.

1.6 Alcances y limitaciones

- La manufactura del módulo de coagulado se realizó bajo diseños mecánicos CAD 3D obtenidos en un trabajo previo.
- Esta fuera de alcance la reingeniería del módulo.
- Esta fuera de alcance la optimización de la experimentación establecida.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 RECICLAJE DE PLÁSTICO POR EXTRUSIÓN

El reciclaje de plásticos es un proceso mediante el cual los residuos de plástico se recuperan y se utilizan como materia prima para producir nuevos productos. Los métodos más comunes de reciclaje de plásticos son el reciclaje mecánico y químico. El reciclaje mecánico consiste en la recuperación del plástico mediante la trituración y el lavado de los residuos de plástico para producir hojuelas de plástico reciclado que se pueden utilizar como materia prima para fabricar nuevos productos. Por otro lado, el reciclaje químico implica la descomposición de los residuos de plástico en sus componentes químicos originales para producir nuevas materias primas [1].

La extrusión es indispensable para obtener los llamados pellets. Es una etapa fundamental del proceso de reciclado mecánico que, gracias a la utilización de máquina extrusoras, permite obtener un material reciclado de alta calidad, ver Figura 2. La extrusora tiene como principal función fundir el material plástico, anteriormente triturado en escamas mediante el proceso de molturación, por medio de un tornillo giratorio calentado [2].



Figura 2. Ejemplo de máquina extrusora de plástico [2].

La extrusión de plástico es un proceso de manufactura que consiste en fundir y moldear termoplásticos, como pellets o gránulos, bajo presión a través de una matriz.

Este método permite obtener productos de forma continua y en grandes cantidades, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones, desde tuberías hasta perfiles para construcción. Es una técnica de producción altamente eficiente que aprovecha la fusión de termoplásticos para dar forma a una variedad de productos. A través de la aplicación de presión, el material fundido es forzado a pasar por una boquilla, adquiriendo la geometría deseada. Esta versatilidad ha posicionado a la extrusión como un método fundamental en la fabricación de productos de plástico [3].



Figura 3. Ejemplo de plástico extruido en gránulos [3].

2.2 PELLETS DE PLÁSTICO

El pellet de plástico, también denominado granza, son polímeros que la industria del plástico utiliza para la fabricación a gran escala de multitud de productos para la vida cotidiana, así como para uso industrial y médico. En otras palabras, es la materia prima con la que se fabrican los productos plásticos. Los pellets son pequeñas esferas de plástico de entre 1 y 5 milímetros de diámetro, ver Figura 4. Su composición varía dependiendo del uso que se les dé. Pero generalmente, los pellets de plástico están compuestos de polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), tereftalato de polietileno (PET) y cloruro de polivinilo (PvC), entre otros tipos de plásticos [4].



Figura 4. Esferas de plástico de entre 1 y 5 milímetros de diámetro [4].

Los gránulos de plástico se pueden fundir y adoptar la forma que se desee para fabricar una infinidad de artículos compuestos de estos materiales plásticos. Según datos de Plastics Europe, más de 50 000 fabricantes en todo el mundo emplean este material industrial para la elaboración de productos de plástico, como, por ejemplo: botellas de plástico, bolsas, envases alimentarios, cubos y contenedores, cables, tuberías, piezas mecánicas, recubrimientos, biberones, juguetes y catéteres [4].

2.3 PROCESO DE PELETIZADO

La máquina extrusora de plásticos tiene como objetivo la extrusión de polímeros triturados por medio de procesos de compactación, fundición y empuje de material. Esto en un sistema continuo que comprende en el calentamiento del material hasta obtener un estado líquido y por medio una fuerza mecánica, extruir todo el material en distintas formas y tamaños. Actualmente las máquinas extrusoras de plástico son altamente utilizadas en la industria para la producción de distintos productos plásticos [5].

La máquina extrusora de plástico contiene un husillo o también conocido como tornillo sin fin, el cual consta de un eje de metal dentro de un cilindro metálico cubierto por resistencias eléctricas. En el inicio del cilindro se encuentra la entrada para la materia prima a través de una tolva, generalmente de forma cónica, además posicionado en ese mismo extremo se encuentra el sistema de accionamiento del husillo que con ayuda de un motor eléctrico permite el movimiento controlando la velocidad a través del sistema de

engranaje manipulado por una programación estandarizada. En la parte final del cilindro metálico, se encuentra la salida del material plástico [6].

Cómo tal extrusión significa forzar un material a través de un orificio. La extrusión consiste trasladar bajo la acción de la presión un material termoplástico [7].

En la Figura 5, se muestran los distintos elementos que integran típicamente una máquina extrusora horizontal. En la Tabla 1, se describen las funciones generales de los componentes del equipo de extrusión [6].

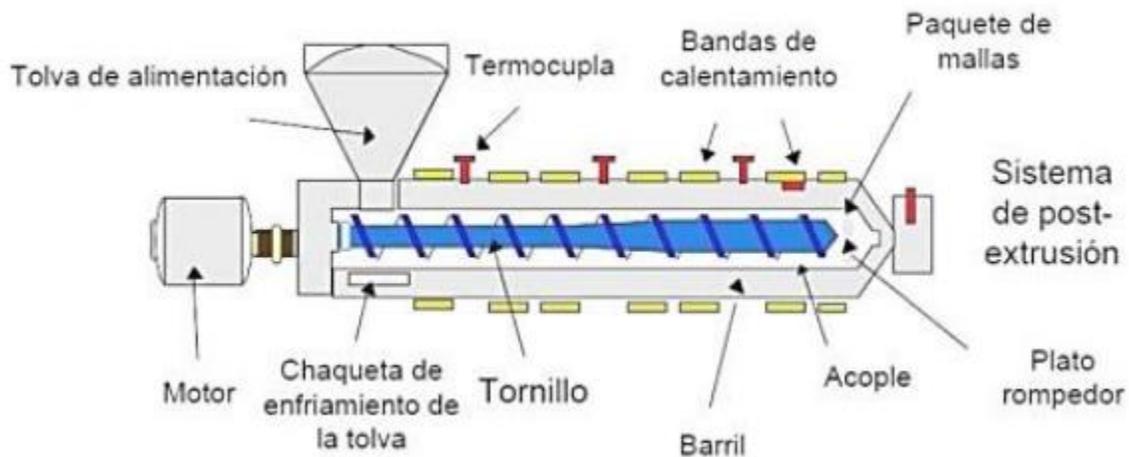


Figura 5. Componentes típicos de una máquina extrusora horizontal de plásticos [6].

Tabla 1. Componentes de una maquina extrusora de plástico horizontal [6].

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Motores	Sistemas de conversión de energía a movimiento especialmente al tornillo sin fin.
Tolva de alimentación	Embudo con aislante de temperatura para la entrada de materia prima al barril.
Barril	Cilindro metálico principal que recubre al tornillo sin fin con la función principal de recibir y concentrar el calor a la materia prima.
Tornillo sin fin o husillo	Sistema mecánico ajustable de empuje de material desde la entrada hasta la boquilla.
Resistencias eléctricas	Sistema de transmisión de calor por conducción con energía eléctrica.
Plato rompedor	Pieza metálica con la función de romper el patrón de flujo de plástico que genera el tornillo sin fin.
Boquilla	Pieza final del cabezal que conforma la extrusión a un cierto diámetro.
Sistema de control	Sistema de programación para el control de los actuadores.

2.4 TÉCNICAS DE MANUFACTURA

El mecanizado es un proceso de fabricación donde se controla las herramientas de mecanizado aplicado al torneado, fresado, taladrado, incluso complementando todas ellas en una sola máquina. Las maquinas pueden ser adaptadas a un proceso de fabricación. Algunas máquinas son: fresadoras, tornos, perforadoras, cortadores de plasma, dobladoras y otros [8].



Figura 6. Mecanizado por fresado. Vista de máquina fresadora del taller sede.

La soldadura es la unión o fusión de piezas mediante el uso de calor y/o el material de aporte para que las piezas formen una sola. La fuente de calor en la soldadura es producida por la electricidad de la fuente de potencia de soldadura (arco eléctrico). La soldadura más habitual se puede realizar a través de gas. En la parte de consumibles, suministramos gas, electrodos, varias de aportación, bobinas de hilo, mangueras bi-tubo oxígeno acetileno, cable de soldadura, pinzas de masa, pinzas porta electrodos, antorchas tig, etc. El arco se establece cuando el material de aporte toca la superficie de la pieza de trabajo y se genera un cortocircuito. Luego, la corriente de cortocircuito eficiente funde el extremo del alambre de relleno y se establece un arco de soldadura, para que el proceso sea de calidad se debe utilizar un voltaje de soldadura y una

velocidad de alimentación de alambre adecuados a los materiales a soldar en base a sus espesores [9].



Figura 7. Soldadura MMA.



Figura 8. Soldadura G/MAG [9].

El corte es una operación de gran importancia dentro de los procesos de fabricación para diferentes sectores de la industria. Dicha operación es efectuada en materiales tales como el acero, donde cada material se obtiene mediante un proceso,

para que el producto final sea transformado, debe ser sometido a una transformación, en donde este corte juega un papel muy importante. Durante este proceso, las piezas que tienen una forma determinada y sus dimensiones definidas, son separadas. Los tipos de corte son: cizallado, troquelado, corte por plasma y corte con desprendimiento de viruta [10].



Figura 9. Corte con desprendimiento de viruta [10].

2.5 ARREGLOS ORTOGONALES DE TAGUCHI

El Diseño de Experimentos es un procedimiento que se utiliza en aquellos procesos en los que se desea determinar si una o más variables independientes (factores) tienen influencia sobre la media de una variable respuesta. Evalúa simultáneamente en una misma experimentación los efectos de los factores y sus interacciones; permite un análisis completo de los resultados experimentales, pudiéndose además obtener, para aquellos factores que tienen influencia sobre la media de la variable respuesta, el mejor nivel que la optimiza. De gran utilidad, es un método que puede resultar complejo a medida que se aumenta el número de factores. Fue introducido por Ronald Fisher en la década del 20 y aplicado originalmente en el ámbito agrícola. Un aporte relevante de Taguchi al Diseño de Experimentos consistió en extender de manera práctica su aplicación al ámbito de la industria, simplificando considerablemente su complejidad. Recién en la década del 80 se hizo conocido el trabajo que al respecto Taguchi venía desarrollando en Japón desde mucho tiempo atrás. A partir de ello se dio un amplio debate sobre la eficiencia de su método y la comparación con el diseño clásico

desarrollado por Fisher. Indirectamente esta discusión contribuyó a la difusión del Diseño de Experimentos y especialmente del método de Taguchi, ya que éste, a diferencia de lo que ocurre con el diseño clásico, no requiere ser un experto en el método para estar en condiciones de aplicarlo [10].

Factores de control			Factores de ruido				
			z ₃	-1	1	1	-1
x ₁	x ₂	x ₃	z ₂	-1	1	-1	1
			z ₁	-1	-1	1	1
-1	-1	-1		y ₁₁	y ₁₂	y ₁₃	y ₁₄
1	-1	-1		y ₂₁	y ₂₂	y ₂₃	y ₂₄
-1	1	-1		y ₃₁	y ₃₂	y ₃₃	y ₃₄
1	1	-1		y ₄₁	y ₄₂	y ₄₃	y ₄₄

Figura 10. Diseños ortogonales de Taguchi fraccionados [11].

III. DESARROLLO

3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

3.1.1 Diseños mecánicos CAD 3D

Los diseños mecánicos CAD 3D se elaboraron en un trabajo previo empleando el software SolidWorks® considerando un recipiente rectangular para alojar el agua de enfriamiento, una torre de enfriamiento y un sistema de bobinado provisional.

3.1.2 Condiciones de operación de estudio

Para obtener los filamentos poliméricos se empleo una máquina extrusora hibrida horizontal prefabricada desarrollad en el trabajo de [12], ver Figura 11. Bajo su arquitectura de ingeniería se definió un arreglo ortogonal $L4(2^3)$ [13] de las variables de operación de trabajo para llevar a cabo pruebas de extrusión y obtener datos experimentales de capacidad de producción (kg/h) de filamentos de plástico, ver Tabla 2.

Tabla 2. Factores y niveles experimentales empleados en el arreglo $L4(2^3)$ de estudio.

Corrida	A	B	C
1	2.0	Eléctrica	50.0
2	2.0	Hibrida	70.0
3	3.0	Eléctrica	70.0
4	3.0	Hibrida	50.0

Donde:

A = cantidad de materia prima (kg).

B = modo de operación de la máquina extrusora hibrida.

C = velocidad de rotación del husillo (rpm).

Como materia prima de estudio se emplearon perlas de polietileno de baja densidad color blanco con una densidad de 0.9209 g/cm^3 obtenidas a granel de la empresa IPASA bolsas artesanales de Occidente SA de CV. Todas las pruebas de extrusión se realizaron durante el mes de junio de 2024, que se caracteriza por ser el inicio del temporal de lluvias y por ende en los días de pruebas se pronosticaba alta

probabilidad de precipitaciones. Las pruebas se llevaron a cabo por duplicado bajo las metodologías definidas y durante un determinado tiempo de extrusión, el cual era determinado por el agotamiento del total de material de trabajo. Al finalizar la extrusión, se dejaba por 24 h que el material extruido se enfriara con convección natural (por razones de seguridad y manejo) para posteriormente caracterizarlo gravimétricamente.



Figura 11. Máquina extrusora híbrida horizontal de estudio.



Figura 12. Aspecto del plástico de trabajo colocado en la tolva de alimentación.

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										
Manufactura del módulo de coagulado										
Implementación del módulo de coagulado										
Asesorías										
Evaluación y seguimiento de asesorías										
Evaluación de reporte										
Informe semestral										
Elaboración reporte técnico (productos entregables)										

Figura 13. Cronograma de actividades general.

IV. RESULTADOS

Por cuestiones de patentado, se reservan los datos mas prioritarios obtenidos durante el presente proyecto de residencia profesional, por lo que se presentan solo algunos resultados de la aplicación del sistema propuesto.

4.1 DISEÑOS DEL MÓDULO DE COAGULACIÓN

Se presentan solo algunos diseños mecánicos CAD 3D en vista isométrica y de dibujo técnico.

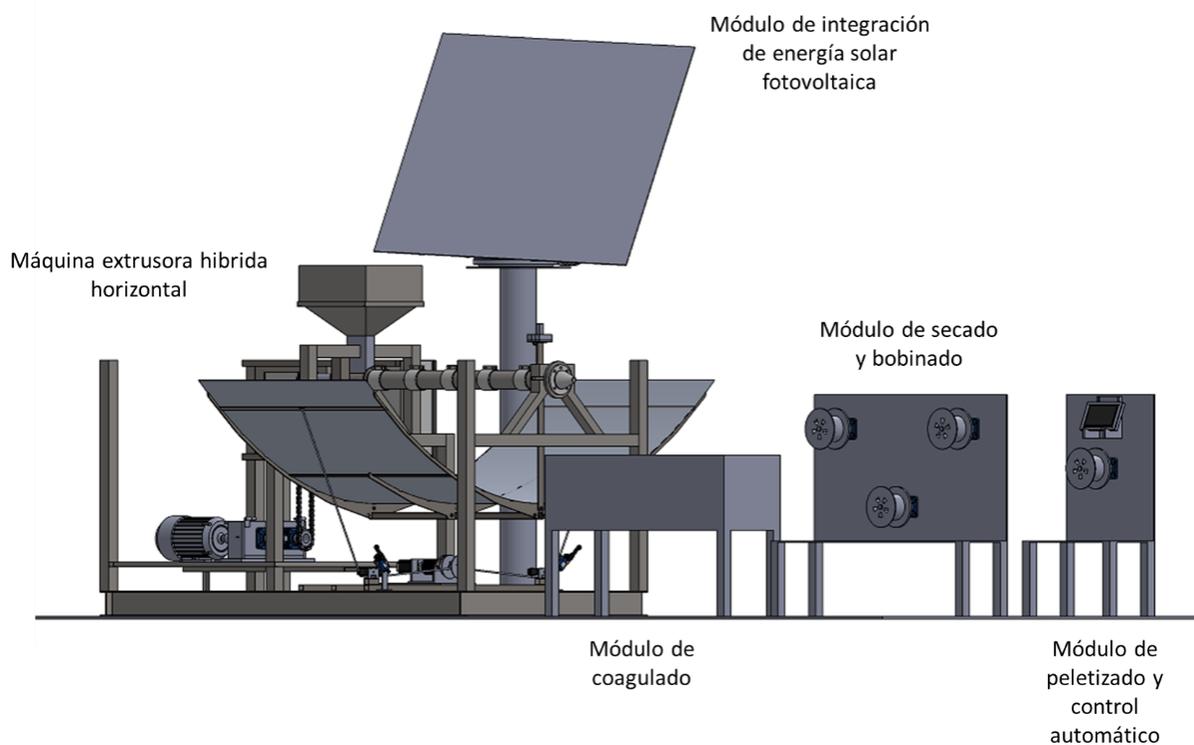


Figura 14. Diseño isométrico integral del proyecto.

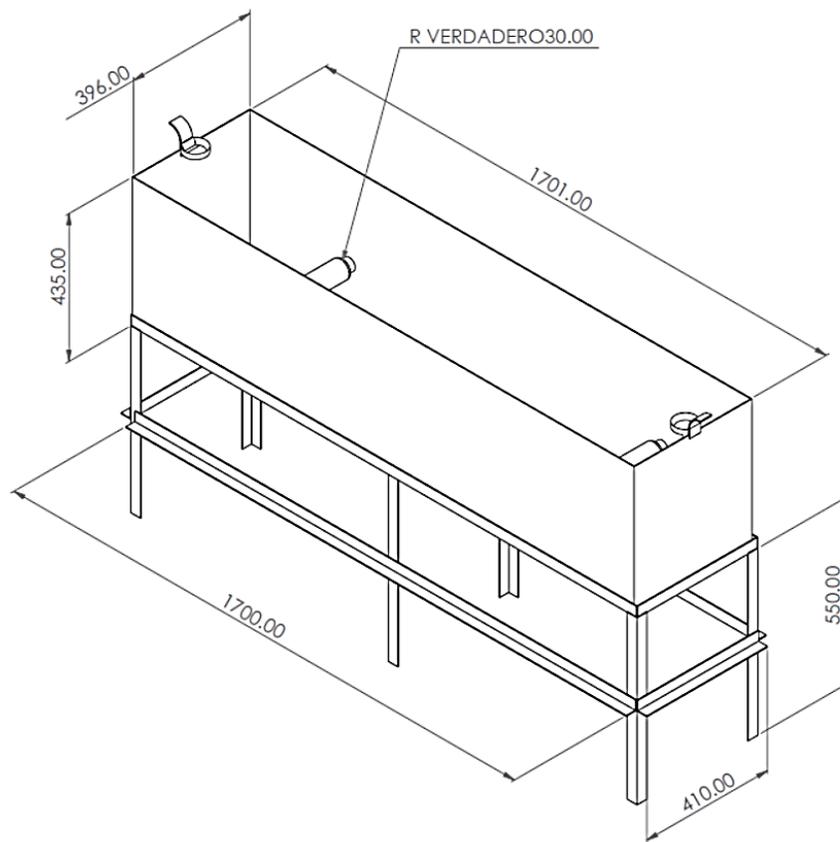


Figura 15. Dibujo técnico del módulo de coagulado: tanque de enfriamiento.

4.2 MANUFACTURA DEL MÓDULO DE COAGULACIÓN

Se presentan evidencias de la manufactura del sistema. En específico, se emplearon técnicas de corte manual y por plasma, soldadura, esmerilado, pintado, perforado. Se incluye la elaboración de una estructura de soporte para el tanque de enfriamiento y una torre de enfriamiento.

Manufactura del tanque de enfriamiento del módulo de coagulado



Figura 16. Metrología de piezas del sistema.



Figura 17. Soldadura de la base del tanque de enfriamiento.



Figura 18. Armado de base del tanque de enfriamiento.



Figura 19. *Ensamble de base del tanque de enfriamiento.*



Figura 20. *Tanque de enfriamiento del módulo de coagulado concluido.*

Manufactura de la torre de enfriamiento del módulo de coagulado



Figura 21. Taladrado de soportes de la base de la torre.



Figura 22. Esmerilado de soportes de la base de la torre.



Figura 23. Preensamble de los soportes de la base de la torre.



Figura 24. Corte por plasma de bases de nivelación de torre.



Figura 25. Pintado de piezas de la torre.

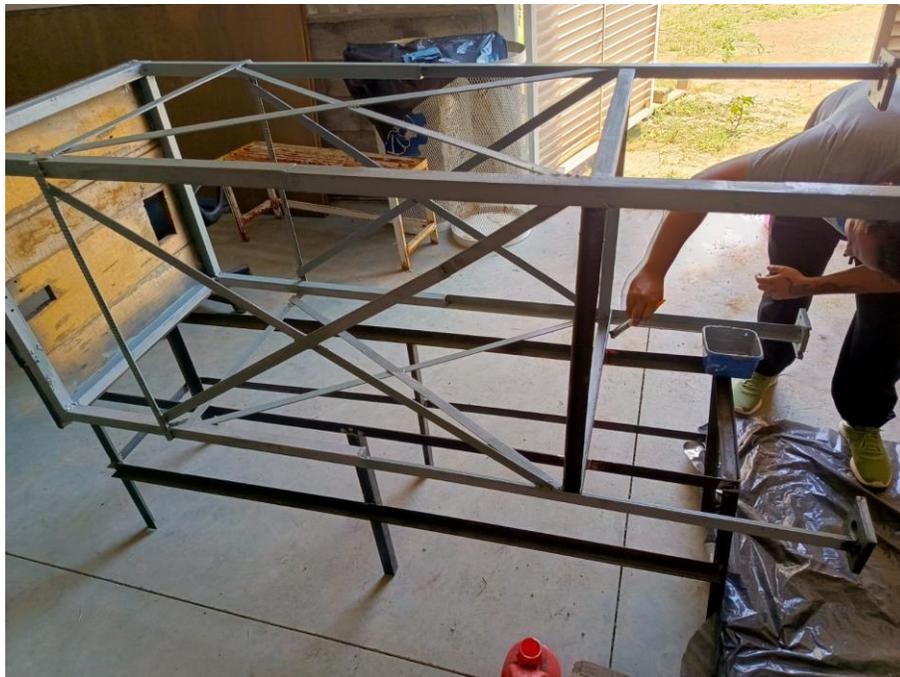


Figura 26. Pintado de la torre concluida.



Figura 27. Aspecto de la torre concluida.

4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE COAGULACIÓN

Se presentan las estrategias de implementación del módulo de coagulación propuestas: pruebas experimentales bajo metodología DOE de arreglos ortogonales y análisis estadístico por DCA y ANOVA.

4.3.1 Resultados experimentales de extrusión

Aplicando por duplicado el diseño ortogonal L4(2³) descrito en la Tabla 2, se obtuvieron 8 pruebas en orden aleatorio. Los resultados promedio obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados promedio de las pruebas de extrusión realizadas.

Corrida	1er ciclo experimental		2do ciclo experimental	
	Cantidad de materia prima (kg)	Flujo de extrusión (kg/h)	Cantidad de materia prima (kg)	Flujo de extrusión (kg/h)
1	2.0	0.69	2.0	0.60
2	2.0	0.60	2.0	0.66
3	3.0	0.73	3.0	0.68
4	3.0	0.65	3.0	0.64

Para la caracterización gravimétrica del material extruido se utilizó una balanza granataria Velab VE-2610.

Para el registro de las variables de operación (valores no presentados por motivos de patentado) de temperaturas de extrusión (°C), temperatura ambiental (°C), humedad (%), velocidad de rotación del husillo (rpm), velocidad del viento (km/h), consumos energéticos (kWh), irradiación solar (W/m²), tiempos se emplearon diversos instrumentos de medición como lo son:

- Cámara termográfica portátil FLIR E5-XT.
- Medidor portátil Fluke IRR1-SOL.
- Anemómetro digital portátil RZ GM816.
- Medidor de potencia digital PZEM-022.
- Tacómetro dual Lutron DT-2236.
- Termómetro digital Steren con sensor de humedad TER-150.

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



Figura 28. Material en tolva de alimentación del proceso de la corrida 3-eléctrica.



Figura 29. Aspecto del material extruido a la salida de la extrusora del proceso de la corrida 3-eléctrica SIN el uso de módulo de coagulado.



Figura 30. Aspecto “pata de elefante” del material extruido ya enfriado y resultante del proceso de la corrida 2-hibrida SIN el uso de módulo de coagulado.

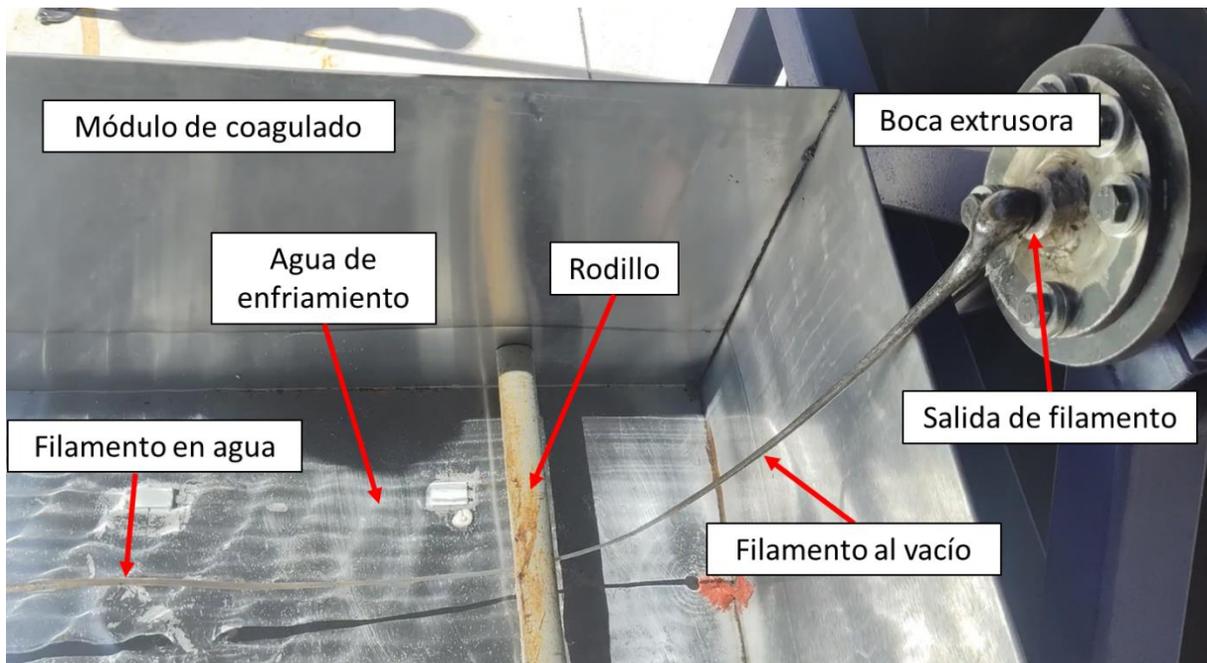


Figura 31. Módulo de coagulado: componentes y aspecto de salida del filamento polimérico de la extrusora CON el uso de módulo de coagulado.

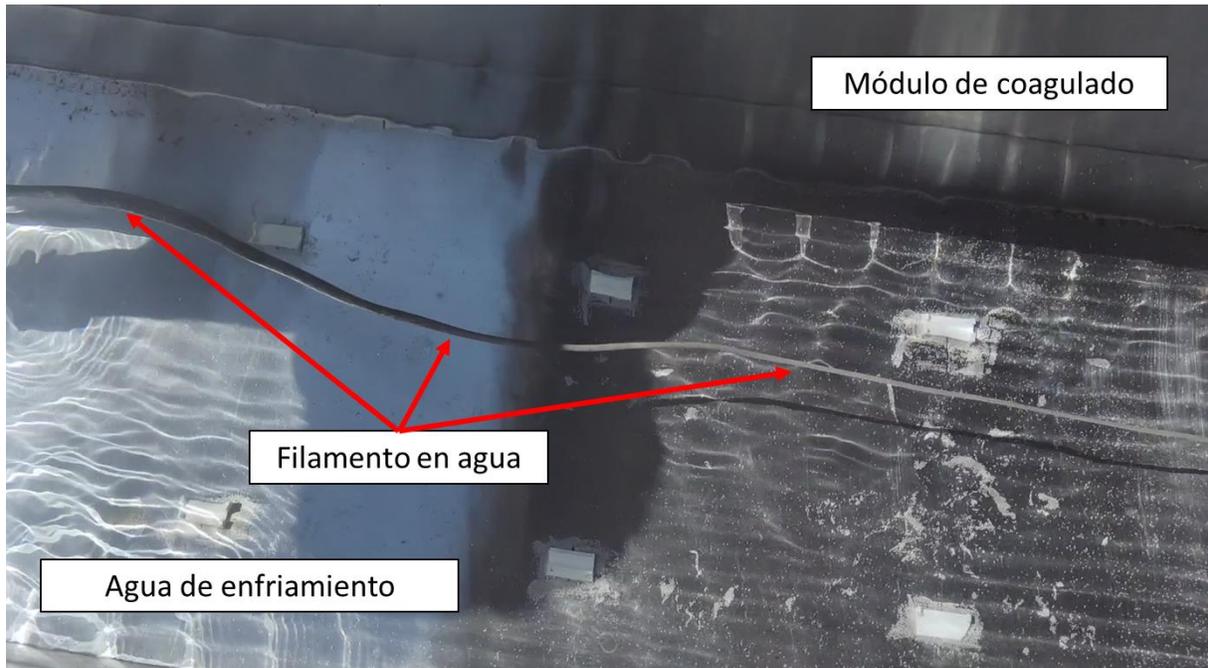


Figura 32. Aspecto del filamento polimérico sumergido en agua de enfriamiento CON el uso de módulo de coagulado.



Figura 33. Recolección manual de filamento de plástico CON el uso del módulo de coagulado.

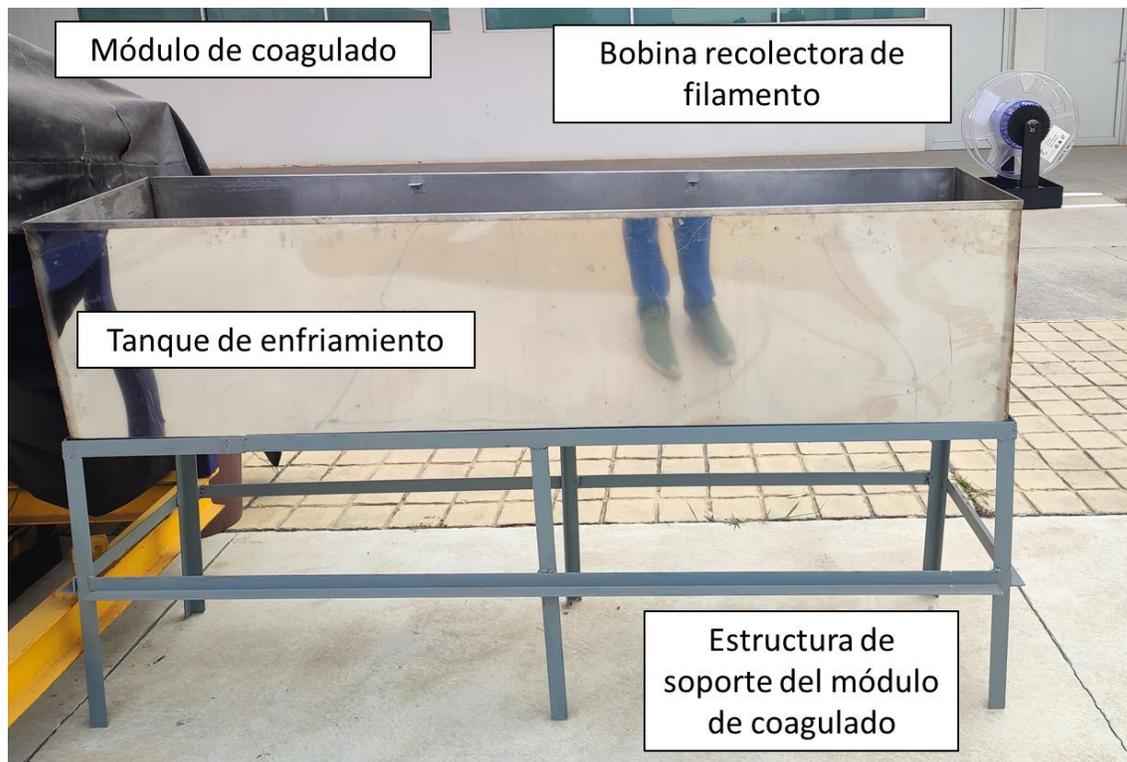


Figura 34. Sistema completo del módulo de coagulado.



Figura 35. Aspecto del filamento de plástico extruido y recolectado CON el uso del módulo de coagulado.



Figura 36. Registro de lecturas de irradiación solar durante del proceso de la corrida 2-hibrida.

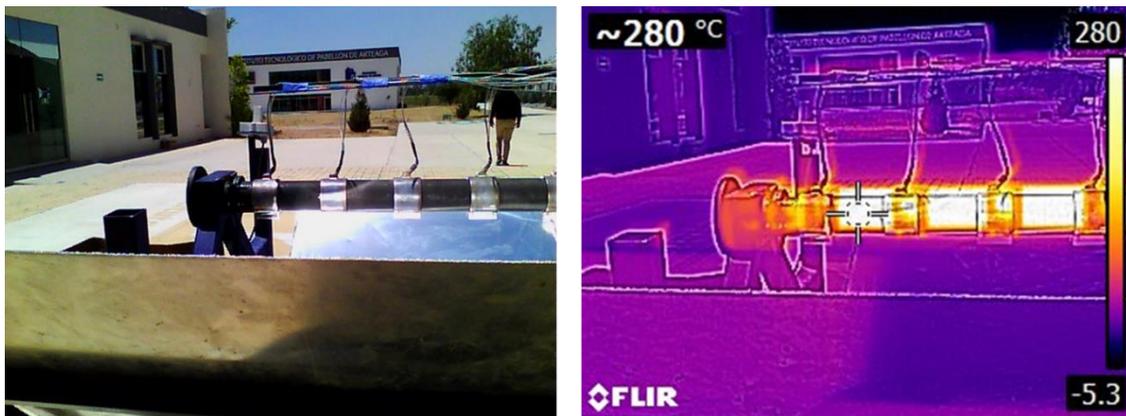


Figura 37. Registro de lecturas de temperatura durante del proceso de la corrida 2-hibrida.

A manera informativa, se presenta a continuación una grafica de tiempo (hora oficial) vs temperatura (°C) de la corrida 2-hibrida (demás graficas de otras corridas no son presentadas por razones de patentado, pero presentan comportamientos similares) en donde se puede apreciar el comportamiento del calentamiento en los 3 puntos del barril (P1, P2, P3) y en donde en particular en esta corrida hubo intervalos de apagado

de resistencias eléctricas y cielo parcialmente nublado, lo que explica la disminución de las temperaturas en el punto P1.

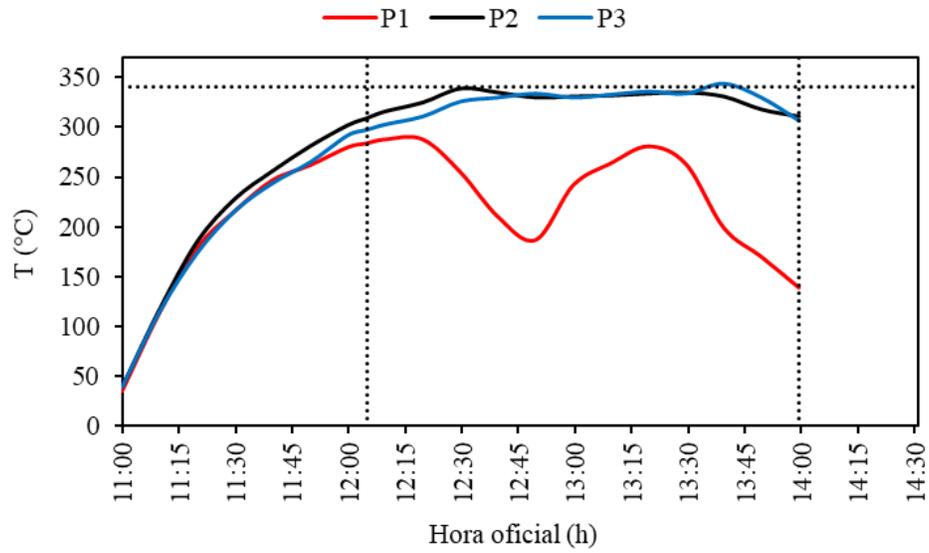


Figura 38. Grafica de extrusión (T vs t) de la corrida 2-hibrida.

V. CONCLUSIONES

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

Se logró realizar pruebas de obtención de filamentos de plástico extruido con el uso del módulo de coagulado diseñado e implementado en una máquina extrusora híbrida bajo un diseño ortogonal experimental.

La manufactura del módulo de coagulado permitió obtener un sistema funcional para su puesta en operación.

De la implementación del módulo de coagulado por medio de la puesta en operación del módulo se definió la capacidad de extrusión de la máquina extrusora siendo de 0.645 kg/h bajo las condiciones de operación y el diseño experimental establecido.

El proyecto de residencia me permitió validar los conceptos teóricos y prácticos aprendidos durante mi estadía como estudiante de la carrera de Ingeniería Mecatrónica en proyectos de desarrollo tecnológico a nivel planta piloto. Para llevar a cabo este proyecto se pusieron en práctica los conocimientos y habilidades a lo largo de la carrera, diseño, procesos de fabricación, manufactura, estadística, entre otras materias importantes.

También se aplicó la investigación y redacción, ya que, al ser un proyecto de esta índole, se necesitan las herramientas básicas para tener un proyecto de calidad, eficiente y eficaz a su vez.

En particular aprendí a adaptarme a trabajos por objetivos. Además de siempre buscar la solución más factible mediante la aplicación de un método analítico y científico para eliminar los problemas desde raíz. Mi tiempo de residencia profesional interactuando con temas de desarrollo tecnológico, investigación e innovación fue una de las mejores experiencias profesionales que he vivido y donde aprendí lo importante que es llegar a establecer soluciones viables y resolver el problema raíz de la manera más factible.

VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS

1. Aplique metodologías de la Ingeniería Mecatrónica con base en las necesidades del proyecto de investigación científica de estudio para incrementar sus diversos indicadores de operación.
2. Aplique técnicas de manufactura, estadística y fundamentos y taller de investigación.
3. Implementé métodos innovadores de solución de problemas de investigación a través de la experimentación a nivel laboratorio, los cuales pueden ser replicados a escala industrial.
4. Gestioné la generación del conocimiento específico para evidenciar la capacidad de acción de la Ingeniería Mecatrónica, 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 científica.
6. Utilice las nuevas tecnologías de información y comunicación de la institución, para el estado del arte del proyecto y contar con información actualizada para la mejora de los procesos de estudio y el desarrollo de la metodología del proyecto.
7. Promoví el desarrollo de la ciencia e investigación, con el fortalecimiento de las líneas de investigación de la institución.
8. Aplique métodos de investigación para desarrollar e innovar sistemas y/o procesos industriales.
9. Actúe como agente de cambio para facilitar la mejora continua en los procesos de aprendizaje de la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la institución.
10. Aplique métodos, técnicas y herramientas para la solución de problemas presentados durante la fase de ejecución del proyecto.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] Reciclaje. (2024). Gardner Business Media, Inc. Recuperado de <https://www.pt-mexico.com/temas/reciclaje-de-plasticos>
- [2] Areyour. (10/11/2020). La extrusión en el reciclaje de residuos plásticos. Areyour. Recuperado de <https://www.areyour.org/es/2020/11/09/la-extrusion-en-el-reciclaje-de-residuos-plasticos/>
- [3] Ecoembes. (12/08/2024). Extrusión de plásticos y medioambiente. Ecoembes Reduce Reutiliza y Recicla. Recuperado de <https://reducereutilizarecicla.org/extrusion-plastico/>
- [4] Pellets de plástico: que son, para qué sirven y cuáles son sus riesgos. (16/07/2024). DKV Seguros. Recuperado de <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/pellets-de-plastico-que-son#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20pellet%20de,para%20uso%20industrial%20y%20m%C3%A9dico.>
- [5] Sierra Saavedra, A. S., and Sánchez Suárez, D. X. (2023). Desarrollo de una máquina extrusora de plástico reciclado para la construcción de perfiles sintéticos (Bachelor's thesis).
- [6] Hernández García, A. (2022). Diseño de la automatización del proceso de extrusión de filamento para impresoras 3D.
- [7] Umesal. (21/06/2021). *Qué es el mecanizado CNC*. Umesal. Recuperado de: <https://umesal.com/que-es-el-mecanizado-cnc/>
- [8] ¿Qué es la soldadura?. (s. f). Kemppi. Recuperado de: <https://www.kemppi.com/es-ES/asistencia/fundamentos-de-soldadura/que-es-la-soldadura/>
- [9] Cortes de metales: procesos y objetivos dentro de la industria. (23/09/2020). Metalmind. Recuperado de: <http://metalmind.com.co/2020/09/22/cortes-de-metales-procesos-y-objetivos-dentro-de-la-industria/>
- [10] Hernández, A. B., De la Paz-Guillon, M., and García, L. A. (2015). La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad. *Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, 23(37), 65-83. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/11986>

- [11] Naranjo-Palacios, F., Rios-Lira, A. J., Pantoja-Pacheco, Y. V., and Tapia-Esquivias, M. (2020.) Diseños ortogonales de Taguchi fraccionados. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(2), 1-12. Doi: <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2020.21n2.011>
- [12] Dena-Aguilar, J. A., Díaz-Ponce, A., Delgado-Flores, J. C., Olvera-González, J. E., Escalante-García, N., and Velasco-Gallardo, V. M. (2023). Design and construction of a solar electric plastic extruder machine based on a parabolic trough collector. *IEEE Access*, 11, 124570-124583. Doi: 10.1109/ACCESS.2023.3328910
- [13] 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/>

ANEXO 1

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



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

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, **26/agosto/2024**
Oficio No. DEPI055/2024

Asunto: Carta de aceptación de Residencias Profesionales

ANGIE JOHANNA ZAMORA LÓPEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el(la) **C. DARÍO ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ**, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, con número de control 201050142, ha sido aceptado(a) para realizar en esta Institución su Residencia Profesional a través de proyecto interno de carácter local en el ámbito de Investigación, denominado **"Manufactura e implementación de un modulo de coagulado de filamentos de plástico obtenidos de una máquina extrusora híbrida horizontal"** durante el periodo de agosto-diciembre 2024, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 09:00 a 16:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de los investigadores Edgar Zacarías Moreno (asesor externo) y José Alonso Dena Aguilar (asesor interno). El proyecto será realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía del área de Posgrado de nuestro plantel.

El presente proyecto de residencia profesional se deriva del proyecto de Estancias Posdoctorales por México, modalidad 1, CONAHCYT, "Diseño y construcción de una máquina extrusora solar horizontal de tornillo simple con calentamiento mayor a 200 °C mediante un sistema automático de concentración solar para su implementación en la industria del reciclaje de plásticos": convocatoria 2022(1)_renovación 2023.

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

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

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

ccp. Archivo.
EZM/jada



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



ANEXO 2

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



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

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, 26/diciembre/2024
Circular No. DEPI081/2024
Asunto: Carta de conclusión de Residencias Profesionales

ANGIE JOHANNA ZAMORA LÓPEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el(la) C. **DARÍO ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ**, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, con número de control 201050142, concluyó satisfactoriamente en esta Institución su Residencia Profesional a través de proyecto interno de carácter local en el ámbito de Investigación, denominado **"Manufactura e implementación de un modulo de coagulado de filamentos de plástico obtenidos de una máquina extrusora hibrida horizontal"** durante el periodo de agosto-diciembre 2024, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 09:00 a 16:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de Edgar Zacarías Moreno (asesor externo) y José Alonso Dena Aguilar (asesor interno). El proyecto fue realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía del área de Posgrado de nuestro plantel.

El presente proyecto de residencia profesional se deriva del proyecto de Estancias Posdoctorales por México, modalidad 1, CONAHCYT, "Diseño y construcción de una máquina extrusora solar horizontal de tornillo simple con calentamiento mayor a 200 °C mediante un sistema automático de concentración solar para su implementación en la industria del reciclaje de plásticos": convocatoria 2022[1]_renovación 2023.

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

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica-
"Tierra Siempre Fértil"®

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

ccp. Archivo
EZM/jada



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



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

