



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía
Solar Integrada a través de un Sistema Automático de
Concentración Solar de Canal Parabólico”**

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

PRESENTA:

Ing. Juan Carlos Delgado Flores

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Paulino Vacas Jacques

Dr. Arturo Díaz Ponce

Pabellón de Arteaga, Ags., junio del 2024



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Tesis:

**“Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar
Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de
Canal Parabólico”**

Presenta:

Ing. Juan Carlos Delgado Flores

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Paulino Vacas Jacques

Dr. Arturo Díaz Ponce

Sinodales:

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

M. en C. Julio Acevedo Martínez

Pabellón de Arteaga, Ags., junio del 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, con su apoyo y colaboración, hicieron posible la realización de esta Tesis.

En primer lugar, agradezco a mis padres, Silvia Flores Cruz y Carlos Delgado de Luna, quienes, con su amor, paciencia y sacrificios constantes, han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias, mamá y papá, por creer en mí y por brindarme siempre su apoyo incondicional. Sus enseñanzas y consejos han sido mi guía a lo largo de este camino.

A mis hermanos, Roberto y Jenifer quienes, con su comprensión, apoyo y cariño, me han motivado a seguir adelante en los momentos más difíciles. Gracias por estar siempre a mi lado y por ser una fuente constante de inspiración.

Expreso también mi sincero agradecimiento a mi director de Tesis, el Dr. José Alonso Dena Aguilar, por su invaluable guía, paciencia y apoyo a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y consejos han sido cruciales para la realización de este trabajo. Agradezco profundamente a los miembros de mi comité tutorial, el Dr. Paulino Vacas Jacques y el Dr. Arturo Díaz Ponce, por sus valiosas observaciones y sugerencias que contribuyeron significativamente a mejorar el contenido y la calidad de este documento. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de Maestría, a la Ing. Michell, al Mtro. Moisés y al Ing. Diego, por su apoyo y camaradería durante estos años de estudio. Sus palabras de aliento y su colaboración han sido esenciales para superar los desafíos de este camino académico.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Esta Tesis no hubiera sido posible sin su apoyo y contribuciones.

Pabellón de Arteaga, Ags.,

24/mayo/2024

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

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Maestría titulada **"MANUFACTURA DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL CON ENERGÍA SOLAR INTEGRADA A TRAVÉS DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONCENTRACIÓN SOLAR DE CANAL PARABÓLICO"** del estudiante **JUAN CARLOS DELGADO FLORES** con numero de control M151050127 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizó los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

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

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. PAULINO VACAS JACQUES
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. ARTURO DÍAZ PONCE
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags.,

31/mayo/2024

ING. JUAN CARLOS DELGADO FLORES
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL M151050127

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **"MANUFACTURA DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL CON ENERGÍA SOLAR INTEGRADA A TRAVÉS DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONCENTRACIÓN SOLAR DE CANAL PARABÓLICO"**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su examen de grado.

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

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

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



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN**

RESUMEN

“MANUFACTURA DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL CON ENERGÍA SOLAR INTEGRADA A TRAVÉS DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONCENTRACIÓN SOLAR DE CANAL PARABÓLICO”

Por: ING. JUAN CARLOS DELGADO FLORES

Las máquinas extrusoras horizontales son una tecnología empleada ampliamente en la industria del plástico para llevar a cabo procesos de extrusión y fabricar diversos productos como tubos, perfiles, filamentos o material granular reciclado, entre otros. Esta tecnología consta de varios componentes que trabajan simultáneamente para lograr el proceso de extrusión. Típicamente, una máquina extrusora horizontal se conforma de una estructura de soporte en donde se fijan e instalan diversos componentes como lo son una tolva de alimentación, un barril o cañón, un husillo, una matriz o boquilla, un sistema de rotación y empuje mecánico y un sistema de calentamiento. En este contexto, estos equipos de extrusión convencionalmente utilizan como sistema de calentamiento un conjunto de elementos eléctricos calefactores, conocidos también como resistencias eléctricas calentadoras, para alcanzar las temperaturas requeridas para calentar, fundir y lograr extruir los materiales plásticos en nuevos artículos. En particular, las resistencias eléctricas calentadoras simbolizan uno de los costos mas representativos del total de la energía consumida en un proceso típico de extrusión. Motivo por el cual, un sistema de calentamiento por energía solar podría coadyuvar a reducir estos costos energéticos.

En este trabajo se presenta el diseño y la manufactura de una máquina extrusora horizontal con energía solar integrada a nivel prototipado para la extrusión de plásticos. Específicamente, se logró el desarrollo de los componentes (sistemas) de operación necesarios para la puesta en funcionamiento del equipo de extrusión integrando la energía solar dentro del prototipo. Para lo anterior, se diseñaron y fabricaron los sistemas de (1) concentración solar de canal parabólico y seguimiento solar, (2) extrusión, (3) transmisión de potencia por engranaje y cadena, (4) mando eléctrico, (5) estructura de soporte y, particularmente de (6) un sistema híbrido de calentamiento basado en (a) energía solar concentrada provista por un colector solar de canal parabólico con seguimiento solar y (b) energía eléctrica en forma de calor proporcionada por las resistencias eléctricas calentadoras. El prototipo logró ser funcional debido a que el husillo pudo ser rotado de manera controlada y el barril pudo ser calentado por la sola acción de (i) la energía solar concentrada, (ii) de las resistencias eléctricas calentadoras o (iii) empleando simultáneamente ambas fuentes de energía.

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Paulino Vacas Jacques

Dr. Arturo Díaz Ponce

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
1.6 GENERALIDADES.....	6
II. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 EXTRUSIÓN.....	7
2.2 COMPONENTES DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL.....	8
2.3 ENERGÍA SOLAR.....	9
2.4 TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR.....	10
2.5 COLECTOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO (CCP).....	13
2.6 SEGUIDORES SOLARES.....	14
2.7 SENSORES SOLARES.....	14
III. METODOLOGÍA.....	16
3.1 DISEÑOS MECÁNICOS CAD 3D DEL PROTOTIPO.....	16
3.2 TÉCNICAS DE MANUFACTURA DEL PROTOTIPO.....	16
3.3 SIMULACIÓN ÓPTICO-ENERGÉTICA.....	19
3.5 DISEÑO DE SEGUIMIENTO SOLAR.....	19
3.6 DISEÑOS EXPERIMENTALES.....	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
4.1 ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL PROTOTIPO.....	22
4.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA POR ENGRANAJE Y CADENA DEL PROTOTIPO.....	23
4.3 SISTEMA DE MANDO ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO.....	26
4.4 SISTEMA DE EXTRUSIÓN DEL PROTOTIPO.....	28

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

	Pág.
4.5 SISTEMA DE CONCENTRACIÓN Y SEGUIMIENTO SOLAR DEL PROTOTIPO.....	30
4.5.1 Simulación óptico-energética del CCP.....	30
4.5.2 Diseño y manufactura del CCP y del sistema mecánico de seguimiento solar.....	33
4.5.3 Diseño y manufactura del sensor solar.....	36
4.5.4 Algoritmo y programación de seguimiento solar.....	38
4.5.5 Hardware de seguimiento solar.....	40
4.5.6 Integración del sistema de concentración y seguimiento solar en el prototipo.....	41
4.6 SISTEMA HIBRIDO DE CALENTAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	43
4.6.1 Sistema de calentamiento por energía solar.....	43
4.6.2 Sistema de calentamiento por resistencias eléctricas calentadoras.....	44
4.7 VALIDACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	45
4.7.1 Caracterización experimental de velocidad de giro del husillo.....	45
4.7.2 Caracterización térmica experimental de calentamiento del receptor.....	47
4.7.2.1 Calentamiento por resistencias eléctricas calentadoras.....	49
4.7.2.2 Calentamiento por el CCP con seguimiento solar.....	50
4.7.2.3 Calentamiento por el sistema hibrido de precalentamiento.....	52
4.7.2.4 Calentamiento por el sistema hibrido total.....	54
4.7.2.5 Efecto de la eficiencia del calentamiento por el CCP con seguimiento solar por pérdidas geométricas del colector.....	54
4.8 ACTIVIDADES DE TESIS COLATERALES.....	56
4.8.1 Base de datos térmicos y de imágenes termográficas.....	56
4.8.2 Diseño de sistemas mecatrónicos de monitoreo y control.....	58
4.8.3 Diseño del sistema de control (algoritmo) de seguimiento solar.....	59
4.8.4 Unidad de giro horizontal.....	60
4.8.5 CCP con estructura de soporte externa.....	60
V. CONCLUSIONES.....	62
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXO 1. Productividad académica: patentamiento.....	71
ANEXO 2. Productividad académica: publicación científica.....	72

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema
Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

	Pág.
ANEXO 3. Formación de recursos humanos.....	73
ANEXO 4. Acceso universal al conocimiento: participación en congresos.....	74

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Representación genérica de un proceso de extrusión simple.....	7
2 Etapas del proceso de extrusión de termoplásticos.....	8
3 Esquema de una máquina extrusora horizontal y sus componentes principales.....	9
4 Extrusora de plástico WEG.....	9
5 Esquema del flujo de la radiación solar en la atmosfera.....	10
6 Sistema de concentración solar de tipo torre central.....	11
7 Sistema de concentración solar de tipo canal parabólico.....	12
8 Sistema de concentración solar de tipo disco parabólico.....	12
9 Sistema de concentración solar de tipo Fresnel de concentración lineal.....	12
10 Esquema representativo de un CCP y sus principales componentes.....	13
11 Representación del movimiento de seguimiento solar de un eje.....	14
12 Principio básico de funcionamiento de un sensor solar de fotorresistencias LDR.....	15
13 Dibujo técnico de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada.....	17
14 Diseño isométrico del sensor solar.....	19
15 Sistema de control del seguimiento solar.....	20
16 Puntos P1, P2, P3 y P4 de medición de temperaturas experimentales.....	21
17 Dimensiones de construcción de la estructura de soporte.....	23
18 Construcción de la estructura de soporte: vista completa.....	23
19 Diseño isométrico del sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena.....	24
20 Preensamble de engranaje, ejes y chumaceras en la caja reductora.....	24
21 Transmisión de potencia.....	25
22 Caja de engranes reductora.....	25
23 Esquema eléctrico del sistema de mando eléctrico del variador de frecuencia y del motor de potencia.....	26
24 Vista exterior del sistema de mando eléctrico.....	27
25 Vista interna del sistema de mando eléctrico.....	27
26 Diseño isométrico del sistema de extrusión.....	28
27 Sistema de extrusión completo.....	29
28 Matriz o boquilla de extrusión.....	29
29 Vista completa del husillo con alabes maquinados.....	30
30 Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 90°.....	31

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Figura	Pág.
31 Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un STE = 0°	31
32 Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 87.5°	32
33 Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un STE = 2.5°	32
34 Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 85°	32
35 Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un STE = 5°	32
36 Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 82.5°	33
37 Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un STE = 7.5°	33
38 Variaciones en el flujo promedio incidente ante cambios en la desviación angular de la DNI	33
39 Manufactura del CCP en vista frontal	34
40 Vista 1 (acercamiento) del sistema mecánico de seguimiento solar instalado	35
41 Vista 2 (acercamiento) del sistema mecánico de seguimiento solar instalado	35
42 Montaje del CCP y el sistema mecánico de seguimiento solar en la máquina extrusora	36
43 Diseño isométrico del sensor solar	37
44 Vista del sensor solar	37
45 Vistas del sensor solar fabricado	38
46 Sensor solar adaptado al barril de la máquina extrusora híbrida	38
47 Diagrama de flujo del sistema de control de seguimiento solar en lazo cerrado	39
48 Gabinete de control y monitoreo del sistema de seguimiento solar	41
49 Interfaz del sistema de monitoreo y control de seguimiento solar en modo automático	41
50 Vista posterior del sistema de concentración y seguimiento solar instalado en el prototipo	42
51 Vista lateral del sistema completo	42
52 Sistema híbrido de calentamiento del prototipo	43
53 Ubicación de las resistencias eléctricas calentadoras (R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ y R ₅) sobre el barril	44
54 Grafica de velocidades (rpm) de giro de las ruedas del tren de engranaje de la caja reductora	46
55 Tren de engranaje de la caja reductora	47
56 Grafica de velocidades (rpm) de giro del husillo según la frecuencia fijada en el variador	47
57 Temperaturas y consumo energético registrados el 09/11/2022 usando solo resistencias eléctricas	49
58 Temperaturas y consumo energético registrados el 03/04/2023 usando solo resistencias eléctricas	50

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Figura	Pág.
59 Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 27/10/2022 utilizando solo con el CCP con seguimiento solar.....	51
60 Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 11/05/2023 utilizando solo el CCP con seguimiento solar.....	52
61 Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 10/11/2022 utilizando un modo hibrido de precalentamiento.....	53
62 Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 30/05/2023 utilizando un modo hibrido de precalentamiento.....	54
63 Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 31/05/2023 utilizando un modo hibrido total.....	55
64 Perdidas geométricas del CCP durante el mes de octubre de 2022.....	55
65 Perdidas geométricas del CCP durante el mes de mayo de 2023.....	56
66 Lectura (punto rojo) de 151 °C de temperatura alcanzada en la superficie del barril (P2) por la sola acción del CCP con seguimiento solar.....	57
67 Lectura de 307 °C de temperatura alcanzada en la superficie del barril (P2) por la sola acción de las resistencias electricas calentadoras.....	57
68 Lectura >280 °C de temperatura alcanzada en la superficie del barril (P4) con la acción del sistema de calentamiento hibrido.....	57
69 Sistema mecatrónico de monitoreo de temperaturas de las resistencias eléctricas.....	58
70 Sistema mecatrónico preliminar de seguimiento solar.....	59
71 Sistema de control en lazo cerrado del sistema mecatrónico de seguimiento solar en su primera versión.....	59
72 Interfaz de condición con rotación en sentido anti horario (izquierda).....	60
73 Unidad de giro horizontal acoplada al eje de giro del CCP.....	61
74 Colector externo.....	61

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Maquinaria, equipo y materiales principales empleados para la construcción del prototipo.....	17
2	Parámetros de simulación óptico-energética del CCP.....	19
3	Características técnicas de las resistencias eléctricas calentadoras.....	44
4	Velocidades (rpm) de giro de las ruedas del tren de engranajes de la caja reductora.....	46
5	Resumen comparativo de la experimentación.....	48
6	Condiciones climatológicas en los días de experimentación con resistencias eléctricas calentadoras.....	50
7	Condiciones climatológicas en los días de experimentación con CCP y seguimiento solar.....	51
8	Productos académicos derivados del presente trabajo de Tesis.....	73
9	Congresos donde se presentaron avances del presente trabajo de Tesis.....	74

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

NOMENCLATURA

Abreviatura	Significado
CCP	Colector solar de canal parabólico.
DNI	Irradiación normal directa.
<i>GHI</i>	Irradiación global horizontal.
<i>GHI_m</i>	Irradiación global horizontal instantánea mínima.
STE	Error de seguimiento solar.
LDR	Fotorresistencia dependiente de la luz.
R_i	Resistencia eléctrica calentadora.
P_i	Punto de medición de temperatura.
CAD	Diseño asistido por computadora.
RPi	Tarjeta Raspberry Pi [®] .
OD	Diámetro exterior.
ID	Diámetro interior.
AC	Corriente alterna.
DC	Corriente directa.
F	Fase eléctrica.
LED	Diodo emisor de luz.
CNC	Control Numérico Computarizado.
HMI	Interfaz hombre-máquina.
cal.	Calibre.
med.	Medidas.
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (material de impresión 3D).
PET	Tereftalato de polietileno.
LDPE	Polietileno de baja densidad.

Variable	Significado
R_{dif}	Diferencia de voltaje generada entre las dos fotorresistencias dependientes de la luz del sensor solar.
R_{ef}	Valor de voltaje de referencia deseada del sistema de seguimiento solar.
e	Error del sistema de control de seguimiento solar.
u	Señal de control de seguimiento solar.
H	Histéresis.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Variable	Significado
θ_a	Ángulo de aceptación teórico.
M_{CW}	Movimiento de giro del colector solar de canal parabólico en sentido horario hacia el oeste.
M_{CCW}	Movimiento de giro del colector solar de canal parabólico en sentido antihorario hacia el este.
ω_{ent}	Velocidad del engrane piñón de entrada (engrane conductor).
ω_{sal}	Velocidad del engrane de entrada (engrane conducido).
N_{ent}	Número de dientes del engrane conductor.
N_{sal}	Número de dientes del engrane conducido.
R_v	Relación de engranajes.
rpm	Revoluciones por minuto.
ADC	Valor digital de intensidad luminosa ambiental.
mm	Milímetros.
W	Watts.
min	Minutos.
m	Metro.
°C	Grados Celsius.
°	Grados.
kWh	Kilowatts por hora.
W/m ²	Watts por metro cuadrado.
km/h	Kilómetros por hora.
min ⁻¹	Medida de frecuencia.
Hz	Hertz.
HP	Caballo de fuerza.
A	Amperes.
V	Volts.
%	Porcentaje.
“	Pulgadas.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los plásticos de desecho son materiales duraderos y no biodegradables que pueden ser sometidos a procesos de reciclaje para fabricar nuevos productos [1]. La extrusión es un proceso que consiste en la transformación de un material fundido en uno de diferente geometría haciéndolo pasar por un área de sección transversal constante [2]. En otras palabras, la extrusión es una tecnología de reciclaje de polímeros, cuya característica es que emplea una máquina extrusora cuyo objetivo es la de fundir el material y hacerlo pasar por una abertura hasta obtener un producto extruido [3], [4]. La acción de la temperatura permite fundir el material sólido y por medios mecánicos forzar su movimiento a través de una boca extrusora hasta obtener la forma deseada. Los plásticos de desecho se pueden reciclar por extrusión debido a que por este método se pueden procesar grandes cantidades de materiales por hora considerando la gran disponibilidad de estos desechos [5], en donde se estima que mundialmente cada año se producen 500 mil millones de botellas de plástico de un solo uso [6] y, en particular en México, los plásticos conforman el 10.9% de los residuos sólidos urbanos [7]. Aunado a lo anterior, México es líder en América en acopio y reciclaje de envases de Tereftalato de Polietileno (PET) con un 56% del total del PET reciclado [8].

Tecnológicamente, la extrusión se realiza en máquinas extrusoras que convencionalmente se integran de un sistema de rotación y empuje mecánico, de una tolva de alimentación, de un barril o cañón, de uno o dos husillos y de resistencias eléctricas calentadoras como medio de calentamiento, la cuales proveen el calor de trabajo necesario para alcanzar la temperatura de operación requerida para fundir entre 150 y 330 °C el material plástico deseado [9]. Específicamente, una máquina extrusora cuenta con un barril cilíndrico en cuyo interior gira uno o dos tornillos sin fin de Arquímedes mediante un mecanismo de rotación y de empuje y donde además el barril es calentado por medio de resistencias eléctricas calentadoras [10]–[12]. Razón por la cual esta tecnología ha sido empleada para la extrusión de termoplásticos para producir mangueras [10], elaborar materiales de aislamiento térmico [11] a partir de plásticos de recicle, fabricar pellets [13], obtener filamentos compuestos [14] o hasta para su uso en la industria de los alimentos [15], [16] u otras aplicaciones. Entre otras características técnicas, los equipos comerciales pueden contar con uno o dos husillos, tener motores de diversas capacidades de potencia o contar con cilindros de dimensiones de largo y diámetro variados, entre otras particularidades [17], [18]. No obstante, en la actualidad las máquinas extrusoras se han mejorado en su diseño y operatividad, de tal forma que, se investiga la optimización de su funcionamiento y adaptabilidad a los distintos polímeros existentes mediante la incorporación de nuevas piezas de ingeniería o a través del uso de técnicas de automatización o de control de las variables de operación [4]. Es por ello que se han reportado patentes y trabajos de investigación sobre el diseño y manufactura de máquinas extrusoras completas o de algunos de sus componentes [19]–[25]. Por ejemplo, el inventor de [19] patenta una máquina extrusora con la característica de que el barril cuenta con un orificio de salida de gases volátiles. El inventor de [20] patenta el diseño de un husillo extrusor dispuesto con 6 secciones (alimentación,

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

fusión, construcción de presión, escape, presión de reconstrucción y medición) en su geometría. El autor de [21] patenta una mejora a una máquina extrusora para la fabricación de bolsas de plástico consistente de una estación de sellado y punteado integrada a la misma. El autor de [22] presenta una investigación sobre diversos principios mecánicos del accionamiento de una máquina de extrusión de husillo. En [23] y [24], los autores reportan las ventajas de varios diseños de boquillas de extrusión bajo diversas configuraciones multi-orificios. Los autores de [25] describen una investigación sobre el diseño de un husillo con capacidades de giro de hasta 400 revoluciones por minuto (rpm). En este panorama, también se han reportado estudios sobre el desarrollo de prototipos de máquinas extrusoras hechas en instituciones educativas para determinados objetivos y con características técnicas variadas, pero con la similitud de que todos estos trabajos solo consideran el uso de resistencias eléctricas calentadoras como el único sistema de calentamiento de trabajo para lograr alcanzar las temperaturas de operación y fundir el material [26]–[31]. En este panorama, los autores de [26], [27] y [28], diseñan y construyen máquinas extrusoras para fabricar filamentos plásticos de 1.75, 3 o 6 mm de diámetro, consideran el uso de resistencias eléctricas de tipo banda, así como el empleo de un solo husillo con dimensiones de longitud entre 400 y 1200 mm y de diámetro entre 28 y 60 mm y manufacturado con 3 zonas de trabajo (alimentación, compresión, dosificación). Los autores de [29], [30] y [31], presentan el diseño de una máquina extrusora para la fabricación de filamentos plásticos, palitos y piezas de polipropileno y en donde también sugieren el uso de resistencias eléctricas tipo banda, así como el uso de un solo husillo con dimensiones entre 525.78 y 1250 mm de longitud y entre 50 y 76.2 mm de diámetro. Por lo que, en el estado de la técnica, hasta el momento, no se han reportado estudios donde se propongan otras tecnologías de calentamiento dentro de un proceso de extrusión llevado a cabo en una máquina extrusora horizontal.

En otro contexto, el cambio climático ocasionado por el uso de combustibles fósiles en la producción de electricidad es uno de los problemas de mayor interés para la sociedad ya que la producción y el uso de la energía representan 2/3 de las emisiones responsables del cambio climático [32] y en donde México, junto a los países de Argentina, Brasil y Venezuela, generan el 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la región [33]. Por lo que diversos estudios se han realizado para encontrar técnicas de generación de energía libre de carbón, es decir, producir energía eléctrica sin emplear combustibles fósiles como por ejemplo el uso de celdas de combustible [34] o la bioenergía [35]. Dentro de este panorama, la energía solar es una de las fuentes de energía libre de carbón que es abundante y está muy disponible, sin embargo, es una energía que no es constante y su efectividad es menor en los meses de invierno [36]. En particular, la energía solar permite generar energía eléctrica o térmica limpia a través de sistemas fotovoltaicos o concentradores de radiación solar como lo son paneles fotovoltaicos [37]–[39] o calentadores solares [40]–[42], respectivamente. Aunque la eficiencia de estas tecnologías es dependiente de la cantidad de radiación solar que inciden sobre ellas [43]. Particularmente, la energía solar puede ser aprovechada en forma de calor mediante dispositivos denominados colectores solares de canal parabólico (CCP), los cuales son equipos en forma de reflectores parabólicos que enfocan los rayos solares a un receptor ubicado en el punto focal de su parábola [44], [45]. No obstante, los CCP son dependientes de la irradiación normal directa (DNI), esto es,

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

de la radiación solar directa que reciben, aun y a pesar de que se logran alcanzar temperaturas que oscilan entre los 100 y 400 °C [46] durante su empleo. Es por ello, que se incorporan dispositivos de seguimiento solar a los CCP para lograr situar automáticamente los rayos solares hacia el receptor en la mayor parte del día según el movimiento aparente del Sol [47] e incrementar su potencia generada entre un 10% y ~40% [48]. Motivo por el cual diversos investigadores han demostrado la viabilidad de emplear los CCP con seguidores solares para lograr alcanzar temperaturas de operación de 130 °C [49], 180 °C [50] y hasta 185.5 °C [51] en determinados fluidos de transferencia de calor. Un seguidor solar es un dispositivo que se ha integrado a sistemas de energía solar térmicos para maximizar la cantidad de radiación solar que incide sobre ellos y por ende mejorar sus rendimientos y eficiencia [52]. La tecnología de seguimiento está compuesta de una parte mecánica (estructura de soporte y sistema de movimiento) y de una parte de control y automatización (tarjeta controladora) que permite obtener las coordenadas del sol en cualquier momento del día y optimizar la capacidad de captación de radiación solar [53]. Sin embargo, a la fecha, no se han realizado estudios de la integración y aprovechamiento de la energía solar, a través de un CCP con seguimiento solar, en una máquina extrusora horizontal como propuesta alterna de sistema de calentamiento.

Debido a que la energía eléctrica es la principal fuente energética para poner en funcionamiento los equipos de procesamiento de plásticos [54] y que, en particular, los sistemas de calentamiento eléctricos representan parte del 50% del total de la energía eléctrica que se consume en los equipos de extrusión [55], resulta conveniente explorar el uso de la energía solar concentrada como un sistema de calentamiento dentro de un proceso convencional de extrusión –llevado a cabo en una máquina extrusora horizontal– para conseguir las temperaturas necesarias de trabajo y poder reducir los consumos energéticos.

Por lo tanto, el objetivo de esta Tesis es el diseño y la manufactura de una máquina extrusora horizontal de tornillo simple con energía solar integrada a través de un sistema automático de seguimiento y concentración solar de canal parabólico con características de diseño y manufactura propia para alcanzar una temperatura >200 °C empleando la energía solar concentrada como un sistema de calentamiento alterno.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y manufacturar una máquina extrusora horizontal con energía solar integrada y sus sistemas de operación a nivel prototipado mediante técnicas de la manufactura y de la mecatrónica bajo diseños propios para validar técnicamente la energía solar como un medio de calentamiento de extrusión.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar mecánicamente el prototipo mediante software de diseño mecánico CAD 3D para validar el funcionamiento y las dimensiones del equipo previo a su construcción.
- Construir el prototipo mediante técnicas de manufactura y de la mecatrónica y empleando materiales de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada, para su caracterización térmica experimental.
- Modelar el comportamiento térmico del colector solar de canal parabólico por medio de software especializado de trazado de rayos solares para caracterizar la eficiencia óptico-energética del dispositivo.
- Diseñar y construir un sistema de seguimiento solar mediante un sensor solar a base de fotorresistencias para controlar el movimiento de giro del colector solar de canal parabólico.
- Integrar todos los sistemas de operación por medio de técnicas de ingeniería para la puesta en operación del prototipo.
- Realizar la puesta en operación del prototipo mediante una caracterización térmica experimental para cuantificar las temperaturas alcanzadas en el receptor del equipo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La cadena de valor para el reciclaje de plásticos (envase posconsumo) involucra la participación de centros acopiadores [56]. En México, existen cerca de 100 centros recicladores de plástico autorizados y registrados en el directorio nacional de recicladores para el acopio de materiales provenientes de residuos [57]. Sin embargo, también se tiene conocimiento de la operación de centros de acopio no autorizados que operan sin procesos industriales adecuados pero que en cierta manera están agrupados en pequeñas cooperativas o asociaciones como la confederación nacional de industriales de metales y recicladores [58] que los podría acercar a esta tecnología. Tanto acopiadores autorizados como no autorizados pueden ser las áreas de oportunidad beneficiadas con el uso de la tecnología de extrusión solar propuesta. Aunado a lo anterior el proyecto podría insertarse en la cadena de valor del reciclaje de plásticos para reducir los costos de operación que una máquina extrusora convencional conlleva en relación a su consumo energético [54], [55].

Dentro de este contexto, las tarifas de energía eléctrica que aplica el Estado Mexicano [59] para la zona Bajío, en el Municipio de Aguascalientes, en el Estado de Aguascalientes, para el servicio de cargo por distribución, particularmente para la industria durante el mes de abril, donde aplica una tarifa de categoría gran demanda de baja tensión mayor a 25 kW-mes, fueron para los años del 2018 al 2022 de \$340.17, \$356.88, \$361.72, \$380.64 y \$405.39/kW, respectivamente, es decir, que las tarifas han venido incrementándose hasta un 19.2% desde el año 2018 al año 2022. Motivo por el cual, se establecieron precedentes para la ejecución de acciones dentro de las organizaciones para lograr poner en práctica medidas de ahorro de consumo energético sin que afecten sus operaciones ordinarias. Aunque las tarifas para los años subsecuentes se redujeron en un 5.4%, es decir para el año

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

2023 el costo fue de \$383.44/kW, mientras que en el año 2024 fue de \$383.90/kW, hoy en día se mantienen las políticas de ahorros energéticos en las organizaciones.

Por lo tanto, la presente propuesta puede ser una opción de ahorro energético para las industrias dedicadas al reciclaje y extrusión de plásticos de desecho para reducir su facturación eléctrica por el proceso de extrusión. Si se considera que una máquina extrusora convencional emplea un grupo de 5 resistencias eléctricas de 500 W cada una, representa un consumo de 2.5 kWh que, bajo la tarifa eléctrica de cargo por distribución del año 2024, por cada hora de operación se tendría un costo de \$959.75 lo que representa una importante inversión por este factor. Los autores de [60] reportan el consumo energético registrado durante la operación de resistencias eléctricas de abrazadera, 6.3A, 220V, conectadas en paralelo, en donde, en promedio, reportan un gasto energético de hasta 19.8A y 4356 W de potencia.

Por lo anterior, resulta conveniente explorar otros tipos de sistemas de calentamiento para procesos convencionales de extrusión de plásticos. La presente propuesta generaría una disminución en los costos de operación dentro de la industria de plásticos. Además, puede ser una opción para las pequeñas y medianas empresas dedicadas a la industria del reciclaje como una alternativa para dar valor agregado a sus actividades a través de la tecnología propuesta pues técnicamente se espera conseguir un proyecto funcional. Aunado a lo anterior, es importante señalar que México está entre los 5 países del mundo que más radiación solar recibe pero que la mayor parte de esta energía es desaprovechada [61]. Por tanto, el presente trabajo coadyuva a establecer procesos industriales que aprovechen la radiación solar recibida en una superficie. El alcance del proyecto es diseñar y construir una máquina extrusora horizontal de tornillo simple con energía solar integrada para la extrusión de plásticos que incorpore un sistema de calentamiento basado en tecnología de seguimiento y concentración solar para calentar el barril de la extrusora y poder alcanzar temperaturas de operación >200 °C. Lo anterior permitirá sustituir el uso de resistencias eléctricas calentadoras durante ciertos lapsos de operación de la máquina extrusora.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y construir una máquina extrusora horizontal de tornillo simple con energía solar integrada con sus sistemas de operación que permitan alcanzar temperaturas de operación mayores a los 200 °C en el barril para lograr la extrusión de plásticos y reducir el tiempo de uso de las resistencias eléctricas calentadoras empleadas.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Como alcance se tiene que:

El presente trabajo se enfocará únicamente en el diseño y manufactura de una máquina extrusora horizontal de tornillo simple con energía solar integrada.

Se estableció una caracterización térmica de temperaturas (bajo tres metodologías) y una caracterización de la velocidad de giro del husillo para validar la funcionalidad del prototipo.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Para la caracterización térmica se estableció una temperatura de 200 ± 15 °C como base de cálculo y tomando como referencia el primer punto superficial del barril en alcanzar dicha temperatura.

Como limitaciones se cita:

No se realizarán pruebas de extrusión de plásticos en este proyecto (trabajo a futuro).

Se estableció una geometría helicoidal unidimensional del husillo debido a las capacidades técnicas de manufactura comercialmente disponibles.

1.6 GENERALIDADES

El presente trabajo se deriva de los proyectos de convocatorias (1) 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”: (a) convocatoria 2021-ID 1086950, (b) convocatoria 2022(1)-ID 2708283_continuidad y (c) convocatoria 2022(1)_renovación 2023; (2) TecNM 9433.20-P; (3) INCYTEA (antes IDSCEA), IA-025-2019; y, (4) PRODEP/TecNM Fortalecimiento de CAs 2021, ITPA-CA-1.

El objeto fin del proyecto es contribuir con la soberanía tecnológica de la política científica de Estado y con la transición energética del programa nacional estratégico de energía y cambio climático a través de la propuesta del diseño y construcción de una máquina extrusora horizontal con energía solar integrada con características técnicas de diseño y manufactura propia, motivo por el cual el presente prototipo ha sido sometido a patentamiento y publicación especializada por lo que se resguardan los aspectos confidenciales que apliquen y se da crédito a los derechos de propiedad y autoría, respectivamente.

II. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta una breve revisión de conceptos generales y/o detalles técnicos sobre: extrusión; componentes de una máquina extrusora horizontal; energía solar; tecnologías de concentración solar; colector solar de canal parabólico y seguimiento solar de un eje. De cada tema se hace énfasis en aquellos conceptos involucrados en la parte medular de este trabajo.

2.1 EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso de transformación en el cual un material sólido contenido en un recipiente cilíndrico es plastificado por acción de la temperatura y por medio de un sistema de empuje mecánico es forzado a pasar por una boquilla o matriz de extrusión de área de sección transversal constante para adoptar una nueva geometría ya como producto extruido, ver Figura 1. Los metales, alimentos y los plásticos se pueden procesar mediante extrusión para producir, por ejemplo, marcos de ventanas de aluminio, pastas alimenticias y botellas, respectivamente. Técnicamente, el proceso de extrusión de un polímero implica las etapas de (i) transporte del sólido hacia la zona de fusión mediante el ingreso del material sólido a la zona de calentamiento; (ii) plastificación o fundición del material por calentamiento; (iii) transporte del material fundido hacia la zona de salida por medio de conducción hacia la matriz de extrusión; (iv) mezclado simultáneo del material fundido mientras avanza hacia la zona de salida y, (v) opcionalmente se pueden tener operaciones de desgasificado (cuando el equipo está equipado para ello) y de conformado en donde se le otorga al material extruido una geometría específica [9].

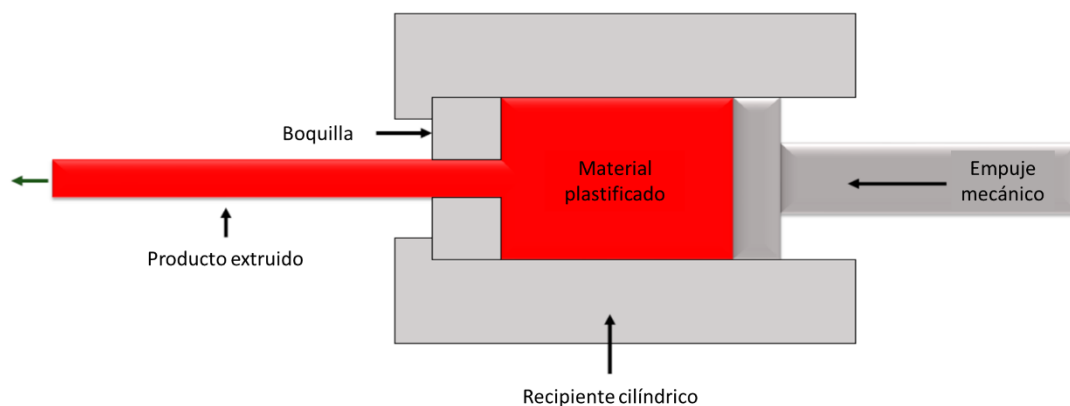


Figura 1. Representación genérica de un proceso de extrusión simple.

En particular, la extrusión orientada a los materiales termoplásticos permite obtener artículos de diferentes formas, tamaños, colores, texturas y propiedades, ya que el plástico puede fundirse y moldearse bajo un simple

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

proceso de extrusión consistente de operaciones de alimentación, plastificación, avance, moldeo y enfriamiento, ver Figura 2 [62].

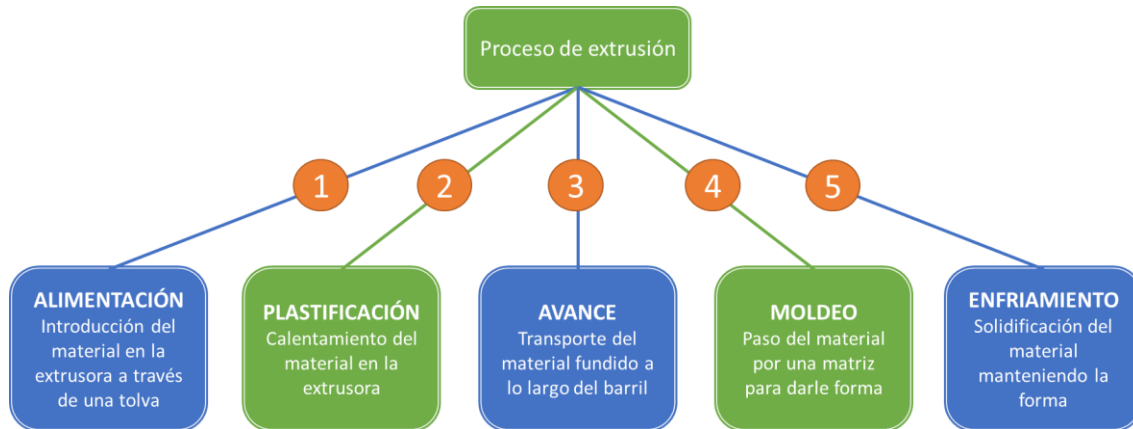


Figura 2. Etapas del proceso de extrusión de termoplásticos.

2.2 COMPONENTES DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA HORIZONTAL

La extrusión es un proceso que puede llevarse a cabo en equipos denominados máquinas extrusoras horizontales, las cuales proporcionan la suficiente presión y el calor necesario sobre el material para que pueda ser fundido y extruido. En general, la funcionalidad de una máquina extrusora horizontal consiste primeramente en la carga del material a extruir para enseguida ser transportado hacia adelante dentro de un contenedor cilíndrico y simultáneamente ser calentado (por medio de elementos calefactores), mezclado y comprimido hasta fundirlo y finalmente salir por un orificio de salida adoptando una forma geométrica determinada [9].

En general, las máquinas extrusoras horizontales cuentan con una serie de elementos integrados en varios sistemas como lo son [63], (1) un sistema de accionamiento integrado por un motor, una caja reductora de engranes y de un mecanismo de empuje y rotación; (2) un sistema de alimentación consistente de una tolva prevista con una garganta de alimentación y de una sección de alimentación del husillo; (3) un sistema de husillo, barril, calentadores, cabezal y matriz, que es la sección donde el material sólido es transportado hacia adelante, calentado, fundido, mezclado y forzado hacia el paso por el cabezal y la matriz y; (4) un sistema de control integrado de controles que permiten el manejo automático de la máquina extrusora horizontal. En la Figura 3, se muestra un esquema típico de una máquina extrusora horizontal. En la Figura 4, se presenta el aspecto de un equipo de extrusión comercial. En ambas Figuras, se aprecia la disposición espacial de sus principales componentes.

Particularmente, en una máquina extrusora horizontal, el sistema de calentamiento constituye la etapa más crítica del proceso de extrusión ya que una apropiada temperatura de trabajo coadyuva a reducir el consumo de potencia del motor de la máquina extrusora horizontal pero principalmente debido a que el plástico a extruir debe ser llevado a un rango de temperatura específico para lograr fundirlo, poder alcanzar una viscosidad adecuada para

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

facilitar la extrusión y conservar sus propiedades [64]. Por ejemplo, el polietileno de baja densidad (LDPE) tiene un rango de temperatura de extrusión entre 160 y 240 °C [65].

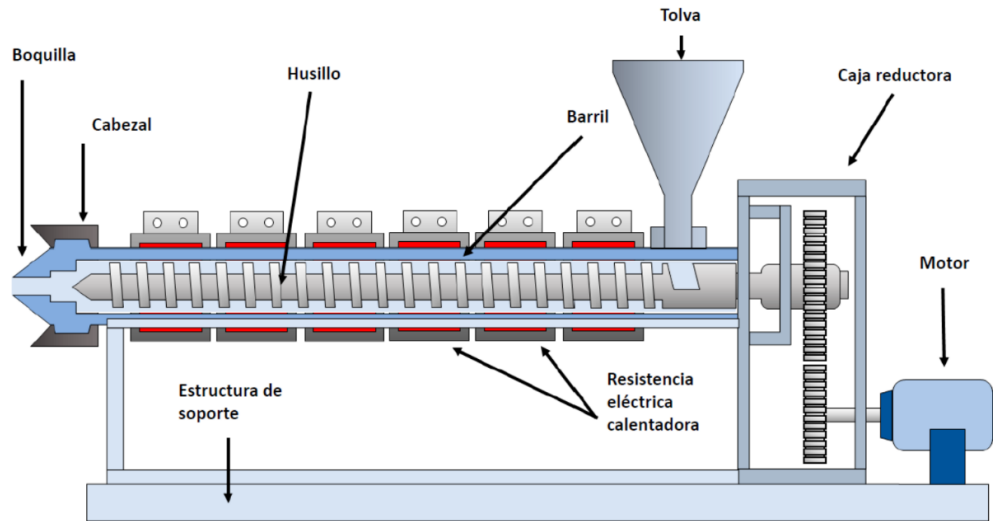


Figura 3. Esquema de una máquina extrusora horizontal y sus componentes principales.

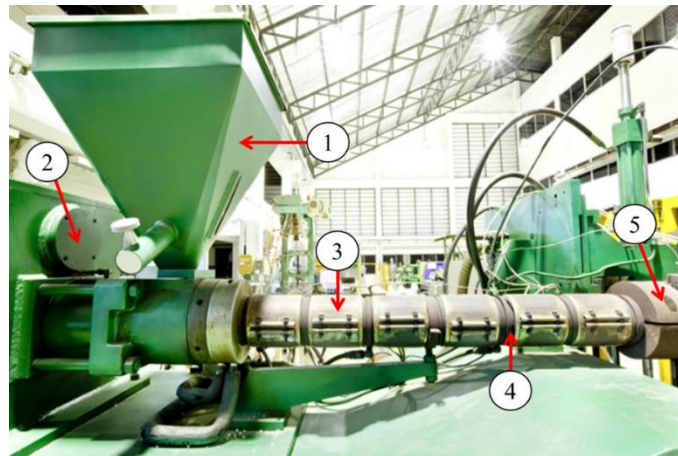


Figura 4. Extrusora de plástico WEG [66]. 1) Tolva de alimentación, 2) caja reductora de engranes, 3) resistencia eléctrica calentadora, 4) barril, 5) cabezal.

2.3 ENERGÍA SOLAR

Las energías renovables son energías que se restablecen a la misma velocidad de su consumo y contribuyen a resolver parcialmente el abastecimiento de energía requerida por la sociedad actual. El Sol, la gravedad, el calor interno de la Tierra son fuentes de energías renovables [67]. Específicamente, la energía solar se obtiene a partir de la radiación electromagnética del Sol, es ecológica, limpia, gratuita, eficiente, reduce el uso de combustibles fósiles y es adaptable debido a que se puede aprovechar (dependiendo del origen y procesamiento de la misma)

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

como energía solar térmica, energía solar fotovoltaica o energía solar pasiva para producir calor, electricidad, calentar agua o aire, producir luz o para otros fines de consumo [68]. En términos energéticos, la radiación solar es el fenómeno físico responsable de generar un aporte energético continuo al planeta de un valor de $1,367 \text{ W/m}^2$, siendo este valor denominado como constante solar. No obstante, y, debido a las capas altas de gases de la atmosfera, solo dos terceras partes de la energía solar llegan hasta la superficie terrestre ya que la energía restante es absorbida por la atmosfera o devuelta al espacio exterior [69]. Motivo por el cual, la constante solar se reduce a un máximo de $1,000 \text{ W/m}^2$ en el momento que la energía solar alcanza la superficie de la Tierra [70]. Aunado a lo anterior, la constante solar que llega a un determinado sitio terrestre, también es afectado por otros aspectos como la inclinación del planeta Tierra con respecto al Sol (23.5°), la hora del día, la estación del año y las condiciones atmosféricas como la presencia de nubosidad [69]. Tecnológicamente, se consigue usar directamente la radiación solar a través de colectores solares que convierten la energía del Sol en calor, la cual es medida en unidades de Sol cuyo valor es de $1 \text{ Sol} = 1,000 \text{ W/m}^2$ [70]. En la Figura 5, se muestra un esquema del flujo de absorción y reflexión de la radiación solar al paso por la atmosfera hasta su contacto con una superficie. Siendo importante resaltar que la radiación solar directa viaja en una línea recta y se puede enfocar con un lente o un espejo, mientras que la radiación solar difusa es la radiación reflejada por la atmosfera o la radiación dispersa y reflejadas por las nubes, polvo o gases contaminantes [70].

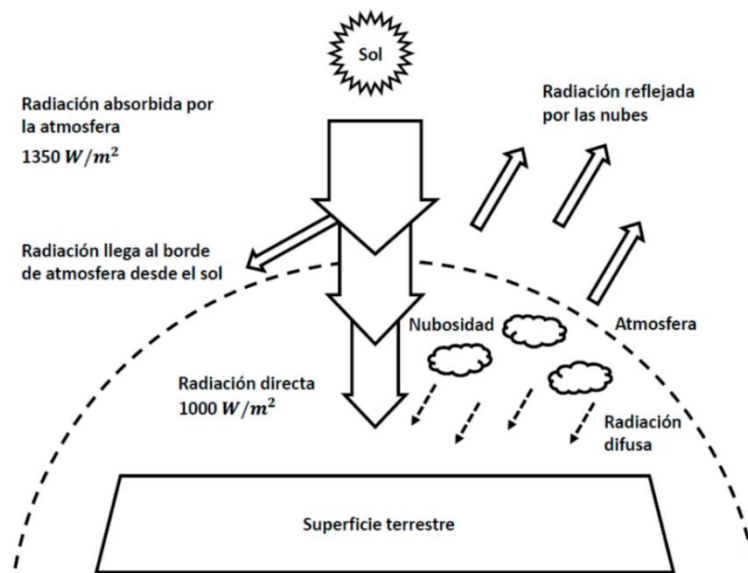


Figura 5. Esquema del flujo de la radiación solar en la atmosfera.

2.4 TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

Una de las tecnologías de aprovechamiento de la radiación solar son los sistemas de energía de concentración solar cuya característica principal es que concentran la irradiación normal directa (DNI) en un punto focal mediante lentes

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

o espejos para posteriormente aprovechar el calor generado en forma de energía térmica en operaciones posteriores acorde al tipo de tecnología considerada [71]. Los equipos de energía de concentración solar, en particular los de canal parabólico y de torre central son los que cuentan con una mayor madurez tecnológica por lo que son de los mas empleados en el mercado [72]. Se reconocen en la práctica cuatro tipos de sistemas de concentración solar [71]:

1. Torre central: los rayos solares se concentran sobre un receptor ubicado en la parte superior de una torre situada en el centro de un campo de heliostatos, los cuales son los encargados de concentrar la radiación solar provocando una alta concentración de energía solar sobre el receptor. En la Figura 6, se muestra un esquema de una torre central.
2. Canal parabólico: concentran los rayos solares sobre un receptor ubicado en su punto focal ya que emplea un espejo parabólico lineal. En la Figura 7, se presenta un esquema de un concentrador de canal parabólico.
3. Disco parabólico: emplean un espejo en forma de disco parabólico capaz de concentrar la radiación solar sobre un punto focal ubicado a una determinada distancia en relación a las dimensiones del disco. En la Figura 8, se aprecia un esquema de este tipo de dispositivos.
4. Fresnel: pueden ser de un diseño de concentración puntual o de concentración lineal. En los primeros, se emplea un lente concentrador fabricado convencionalmente de algún polímero para concentrar los rayos solares sobre un receptor puntual mientras que, en los segundos, los rayos solares se enfocan sobre un receptor longitudinal ubicado en la parte superior del dispositivo. En la Figura 9, se visualiza un equipo concentrador Fresnel de concentración lineal.

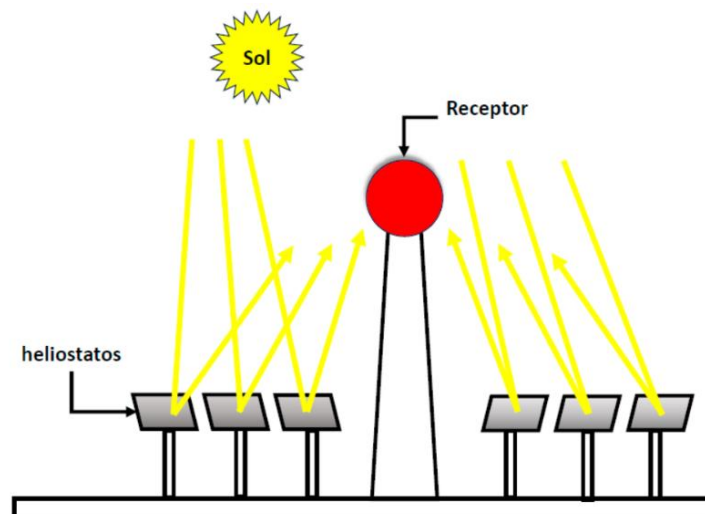


Figura 6. Sistema de concentración solar de tipo torre central.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

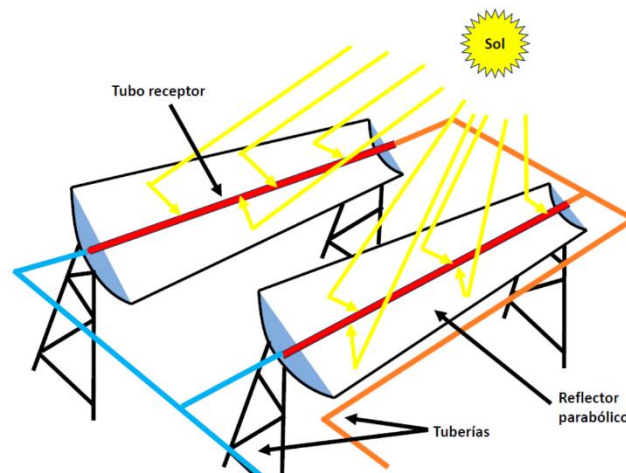


Figura 7. Sistema de concentración solar de tipo canal parabólico.

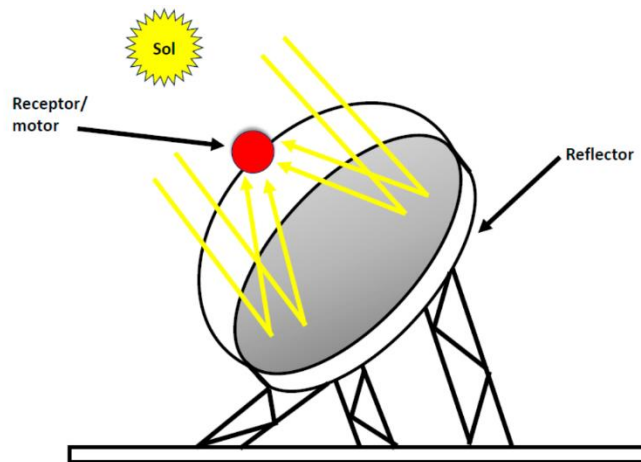


Figura 8. Sistema de concentración solar de tipo disco parabólico.

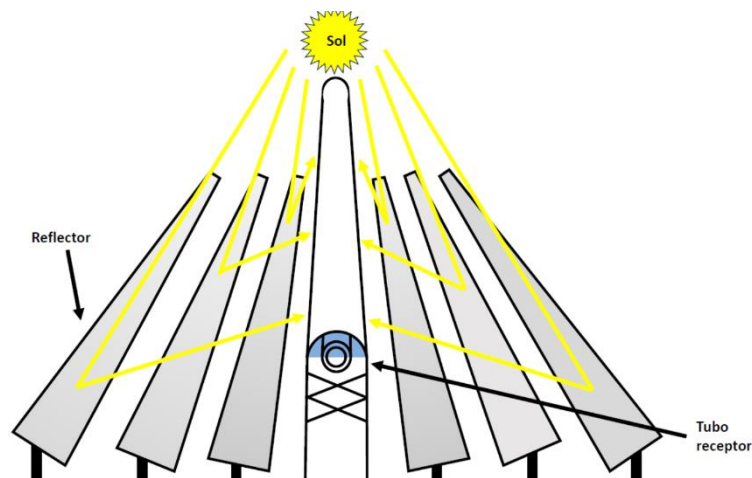


Figura 9. Sistema de concentración solar de tipo Fresnel de concentración lineal.

2.5 COLECTOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO (CCP)

Los colectores solares de canal parabólico (CCP) son una tecnología de concentración solar que capturan y concentran los rayos solares transformándolos en energía térmica gracias a que estos dispositivos aprovechan la irradiación norma directa (DNI) y la transfieren hacia un receptor ubicado en la línea focal del CCP para calentarlo [73]. Los CCP tienen la capacidad de concentrar la luz hasta 80 veces su intensidad normal y alcanzar temperaturas entre 150 y 400 °C gracias a que estos dispositivos utilizan lentes, espejos parabólicos o cualquier material con acabado superficial tipo espejo para concentrar la radiación solar por lo que son comúnmente empleados para calentar fluidos de transferencia de calor o producir electricidad y en donde adicionalmente se les incorporan sistemas de seguimiento solar para incrementar su eficiencia [74]. En la Figura 10, se muestra un esquema representativo de un CCP con los componentes principales que lo integran, como lo son: (a) reflector parabólico.- concentran los rayos solares en su línea focal y están hechos de materiales reflectantes de alta calidad de tipo espejo, plateado o revestido con aluminio pulido [75]; (b) receptor.- es un tubo absorbente situado en la línea focal del reflector parabólico siendo el elemento que recibe la concentración de la radiación solar. Convencionalmente, el receptor esta recubierto con un material selectivo que maximiza la absorción de la radiación solar y minimiza la emisión de radiación térmica y en cuyo interior circula un fluido de transferencia de calor transportando el calor generado hacia un sistema de almacenamiento [76]; (c) sistema de seguimiento solar.- es un sistema electromecánico que permite a los CCP seguir el movimiento del Sol durante el día. Estos sistemas pueden ser de un eje (con orientación de este a oeste) o de dos ejes (con orientación de este a oeste y de norte a sur). (d) estructura de soporte: es el elemento mecánico encargado de mantener la estabilidad y la alineación del reflector parabólico y del receptor, y, (e) sistema de control y monitoreo.- es un sistema que incluye sensores, actuadores y una unidad de control central que supervisa y ajusta la posición del CCP dando un óptimo rendimiento [76].

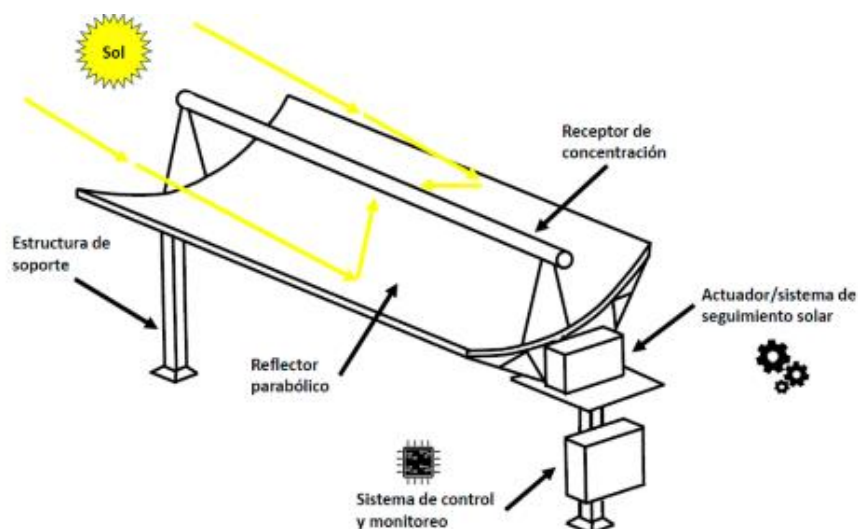


Figura 10. Esquema representativo de un CCP y sus principales componentes.

2.6 SEGUIDORES SOLARES

Los CCP pueden ser diseñados con sistemas de seguimiento solar, también llamados seguidores solares, para maximizar su capacidad de captación de la radiación solar. Un seguidor solar intenta reproducir el comportamiento de los girasoles, de manera tal que, mantiene el colector todo el tiempo de forma perpendicular al Sol para aumentar su eficiencia de captación [77]. Este tipo de dispositivos de seguimiento solar están conformados por una parte fija y una parte móvil cuyo objetivo es mantener una superficie de captación lo más perpendicular a los rayos del Sol durante el día y dentro de su rango de movimiento [78]. Los seguidores solares se pueden clasificar de uno o dos ejes de acuerdo a los grados de libertad de seguimiento que posean. Los seguidores solares de un eje son de un grado de libertad y solo pueden seguir el azimut solar (de este a oeste), mientras que los seguidores de dos ejes pueden seguir tanto el azimut solar como la altitud solar (de norte a sur) por sus dos grados de libertad [79]. Los seguidores de uno o dos ejes cumplen con la función de optimizar el rendimiento de los sistemas de captación solar, mas, sin embargo, aunque los de dos ejes ofertan un seguimiento más preciso tienden a ser más costosos, por otro lado, los seguidores de un eje, aunque son de menor costo tienen un seguimiento solar impreciso, pero aun así ofrecen mejores ventajas que los sistemas fijos [78]. En la Figura 11, se observa un esquema representativo de un CCP con seguidor solar de un eje. El movimiento del seguimiento va desde la salida del Sol hasta su puesta en sentido de este a oeste.

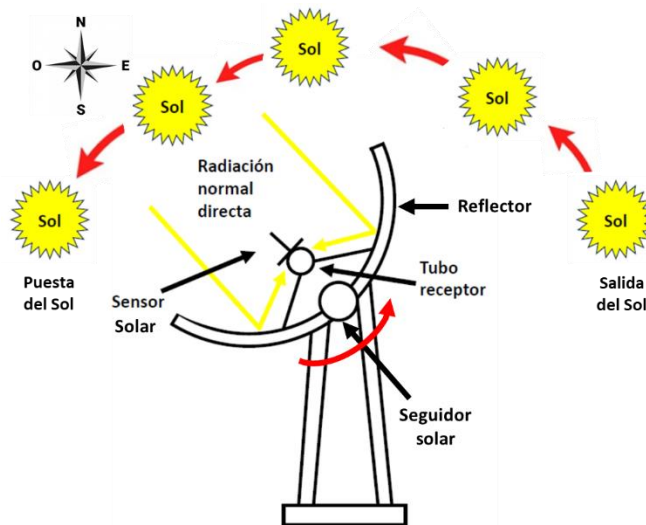


Figura 11. Representación del movimiento de seguimiento solar de un eje.

2.7 SENSORES SOLARES

Un sensor solar es un dispositivo que detecta la posición aparente del Sol durante el día con respecto a la posición del sensor permitiendo: (1) reducir las pérdidas de energía en un sistema solar, (2) alinear perpendicularmente la superficie en la dirección de los rayos del Sol y (3) maximizar el uso efectivo de la radiación solar. Es por ello que

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

los sistemas de seguimiento solar comúnmente emplean sensores solares para detectar la radiación solar que reciben y electrónicamente emitir señales e instrucciones (por medio de un código programable de seguimiento) para activar el sistema mecánico de seguimiento solar empleado (conjunto integrado de motores, engranes y cables) para mover los colectores solares y estén siempre orientados de manera perpendicular a los rayos solares. En particular, los sensores de posición solar basan su principio de funcionamiento en la evaluación de la luz y sombra incidente sobre fotorresistencias, así como del cálculo de las diferencias de corriente entre ellas realizada por medio de un sistema mecatrónico de control [80]. En la Figura 12, se ejemplifica el concepto básico de un sensor solar de fotorresistencias. En específico se representa como dos fotorresistencias dependientes de la luz (LDR) orientan el sentido de giro de acuerdo a la radiación que recibe uno u otro fotorresistor.

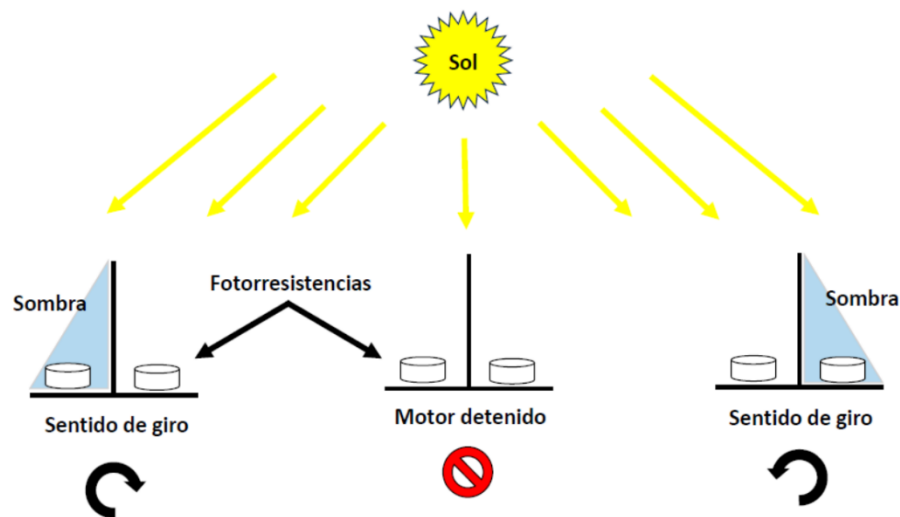


Figura 12. Principio básico de funcionamiento de un sensor solar de fotorresistencias LDR.

III. METODOLOGÍA

En esta sección se describe de manera general las técnicas y metodologías que fueron empleadas para el desarrollo de este trabajo. En la primera parte se narran las técnicas de diseño mecánico utilizadas. En la segunda parte se detallan los materiales y métodos usados para la manufactura del prototipo. Dentro de la tercera parte se describe el estudio de simulación óptico-energética realizada. La cuarta parte se refiere a la estrategia de seguimiento solar desarrollada. En la última parte se encuentra la descripción del diseño experimental realizado.

3.1 DISEÑOS MECÁNICOS CAD 3D DEL PROTOTIPO

Todos los diseños mecánicos para la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada y sus sistemas fueron elaborados en el software de diseño CAD 3D SolidWorks®. Los diseños permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento de los elementos de cada sistema de operación previo a su construcción. Se definió un diseño propio para la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada y sus sistemas de operación bajo la consulta de diversa literatura donde se reporta el diseño y/o construcción de máquinas extrusoras horizontales y/o algunos de sus componentes [9]–[31]. En la Figura 13, se aprecia el diseño mecánico, en vista de dibujo técnico, del concepto del prototipo propuesto y sus principales sistemas de operación. Demás diseños, de cada sistema, se presentan en vista isométrica sin dimensiones por cuestiones de patentado, pero mostrando de manera general los elementos que los integraron. La parte novedosa del diseño es que se consideró la integración de la energía solar por medio de un sistema de concentración y seguimiento solar, además de que se seleccionó una longitud del barril de 1.2 m –el cual es 20% más largo que la mayoría de los modelos comerciales existentes a nivel industrial– y que, a partir del mismo, se dimensionaron los demás sistemas de operación del prototipo. En cada diseño, de cada sistema, se puede apreciar de manera general los elementos y componentes empleados para su fabricación.

3.2 TÉCNICAS DE MANUFACTURA DEL PROTOTIPO

Los elementos y componentes de cada sistema de operación que conformaron la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada fueron contruidos mediante procesos de manufactura avanzada realizadas manualmente y/o con apoyo de máquinas especializadas de control numérico computarizado (CNC) ubicadas en el taller de manufactura de la institución sede del presente trabajo. Por mencionar algunas técnicas se realizaron procesos de taladrado, fresado, soldadura, corte, torneado y esmerilado, entre otros. En general, se elaboraron piezas y cajas de soporte, ejes y engranes, bases, soportes y piezas de sujeción, entre otros elementos. Por condiciones de patentado no se especifican las cantidades de las piezas y elementos manufacturados. En la Tabla 1, se enlistan las principales máquinas, equipos y materiales empleados en la manufactura del prototipo.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

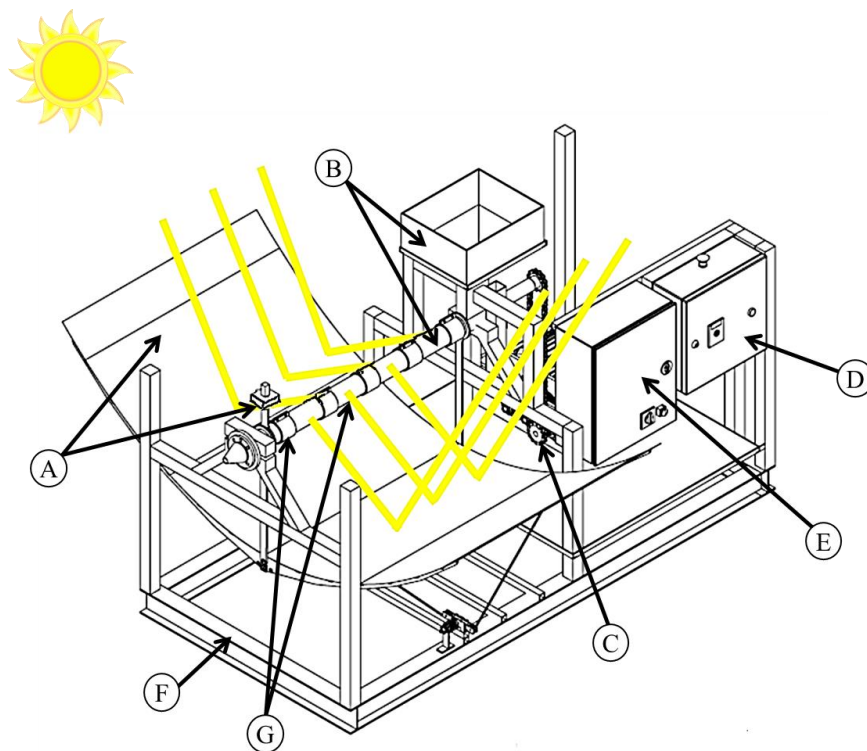


Figura 13. Dibujo técnico de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada. A) Sistema de concentración solar de canal parabólico y seguimiento solar: colector solar de canal parabólico y sensor solar; B) sistema de extrusión: barril, husillo, tolva de alimentación; C) sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena; D) sistema de mando eléctrico; E) sistema de seguimiento solar: gabinete de control; F) estructura de soporte; G) sistema híbrido de calentamiento: energía solar concentrada y energía eléctrica en forma de calor por resistencia eléctrica calentadora.

Tabla 1. Maquinaria, equipo y materiales principales empleados para la construcción del prototipo.

MAQUINARIA	FUNCIÓN (empleada para)
Máquina soldadora de Micro alambre marca Lincoln Electric.	Unión de piezas de la estructura de soporte.
Fresadora CNC universal vertical modelo XK7130A con procesador GSK.	Mecanizado de piezas (ranuras de ejes) del sistema de transmisión de potencia.
Cortadora de plasma Lincoln Electric 4400.	Corte de lámina de acero para la estructura de soporte y sistema de extrusión; corte de engranes para el sistema de transmisión de potencia.
Torno CNC DMTG CKE 6150Z.	Mecanizado de piezas (desbastar, cilindrar) del sistema de transmisión de potencia.
Taladro de banco universal.	Agujerear piezas del sistema de transmisión de potencia y estructura de soporte.
MATERIALES	FUNCIÓN (construir o integrar)
Perfiles de acero al carbón med. 1 1/2 x 1 1/2, 2x2, cal. 14.	Piezas horizontales y verticales de sujeción de la estructura de soporte
Ángulos de acero al carbón med. 3/4 x 1/8, 1/2 x 1/8.	Piezas horizontales y verticales de sujeción de la estructura de soporte
Viga de acero H 4" cal. 10.	Base principal de la estructura de soporte.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Placas de acero med. 4140 1/2", 1/4", lámina negra cal. 14, lámina anti-derrapante cal. 10.	Bases, caja reductora, engranes del sistema de transmisión de potencia, estructura de soporte y sistema de extrusión
Rodamientos montados, chumacera de pared tipo brida cuadrada 25mm c/opresores 1/4 x 6.	Caja reductora de engranaje del sistema de transmisión de potencia.
Piñones med. 3/4 12 dientes tipo BS c/cadena paso 3/4 53 morse 60.	Caja reductora de engranaje del sistema de transmisión de potencia.
Ruedas dentadas (engranes) de 65 (2 pzas), 55 dientes (1 pza) y 25 dientes (3 pzas).	Caja reductora de engranaje del sistema de transmisión de potencia.
Aceros redondos en barra redonda de acero 4140T y barra redonda perforada de acero 8630.	Sistema de extrusión: husillo y barril.
Resistencias eléctricas calentadoras de tipo banda 500W 220V 3".	Elementos calefactores del sistema híbrido de calentamiento.
Lámina de aluminio natural acabado espejo c/armazón parabólico.	Elementos reflejantes del sistema de concentración solar.
Sensor solar a base de fotorresistencias LDR GL5516 con carcasa.	Sistema de seguimiento solar:
Tarjeta Raspberry Pi® mod 3B 2GB RAM con fuente de poder 5V 3A; tarjeta Arduino® Mega 2560 con fuente de poder 5V 1A; HMI-Pantalla Touch NX8048T070 7"; driver TB6560 5A 42V para motor a pasos.	Sistema mecatrónico de seguimiento solar:
Gabinete metálico 50x40x20; cable eléctrico c.12; canaleta ranurada y riel metálico perforado; interruptor de corriente eléctrica 220V.	Sistema de mando eléctrico.
Filamento ABS 1.75 mm.	Sensor solar.
EQUIPO	FUNCIÓN (utilizado para)
Motor 3F, 2HP, 1740 min ⁻¹ de trabajo	Equipo de potencia del sistema de transmisión de potencia.
Contactador en gabinete Tesys 9A.	Equipo de potencia del sistema de transmisión de potencia.
Variador 2HP 2F 240V Schneider Electric	Caracterización de la velocidad de giro del husillo.
Fototacómetro dual DT-2236 marca Lutron.	Caracterización de la velocidad de giro del husillo.
Cámara termográfica FLIR E5xt.	Caracterización térmica experimental.
Medidor PZEM-022 100A AC.	Medición de parámetros de consumos energéticos del prototipo.
Medidor Fluke IRR1 de irradiancia solar.	Medición de la irradiancia solar.
Anemómetro digital RZ GM816.	Medición de la velocidad del viento.
Motor NEMA 23 modelo OK57H18112A de 4.2A, 3Nm, DC.	Control de giro del sistema mecánico de seguimiento solar.
Motorreductor de engranaje de relación de transmisión 50:1.	Control de giro del sistema mecánico de seguimiento solar.
Impresora 3D MakerBot Replicator 2x ABS.	Impresión de sensor solar.

3.3 SIMULACIÓN ÓPTICO-ENERGÉTICA

Se empleó el software de trazados de rayos solares Tonatiuh® –el cual emplea el método Monte Carlo para simular ópticamente los sistemas de concentración solar– con el objetivo de definir los parámetros físicos del colector solar de canal parabólico (CCP) y del receptor (barril) de trabajo. Adicionalmente se estimó la concentración solar máxima y promedio (distribución de flujo incidente) en el receptor y, se calculó el ángulo de aceptación del sistema propuesto. En la Tabla 2, se especifican los parámetros de simulación definidos.

Tabla 2. Parámetros de simulación óptico-energética del CCP [81].

Parámetro	Valor
Tipo de Sol	Pill Box
Irradiancia solar	$1 \times 10^3 \text{ W/m}^2$
Theta máxima	0.00465°
Cantidad de rayos	1×10^6
Ángulos de elevación solar	82.5, 85.0, 87.5 y 90°

3.4 DISEÑO DE SEGUIMIENTO SOLAR

El sensor solar consistió de un sistema mecatrónico integrado principalmente de 2 fotorresistencias dependientes de la luz (LDR) GL5416 soldados a una tarjeta electrónica de circuito impreso. En la Figura 14, se muestra un diseño en vista isométrica de la disposición de las LDR en el sensor solar. El sensor solar logró registrar la diferencia de voltaje generada por las LDR.

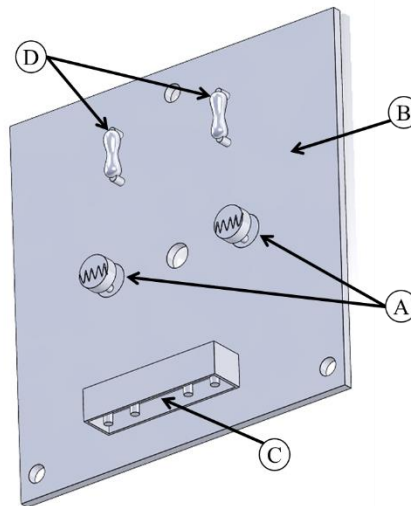


Figura 14. Diseño isométrico del sensor solar. A) Fotorresistencias LDR, B) tarjeta electrónica de circuito impreso, C) bornera de cableado, D) resistencias óhmicas.

Con el objetivo de que el colector solar de canal parabólico (CCP) aprovechará la mayor parte de la irradiación normal directa (DNI) a lo largo del día, se diseñó y construyó un sistema de seguimiento solar en un

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

eje, el cual empleó un algoritmo de control on-off en lazo cerrado con histéresis (H) y en donde el control fue retroalimentado por un sensor solar construido para este estudio. En la Figura 15, se muestra el control del seguimiento solar basado en el algoritmo de control on-off con histéresis propuesto. Donde R_{dif} es la diferencia de voltaje generada entre las 2 LDR del sensor solar, esto es $R_{dif} = LDR_1 - LDR_2$; Ref es el valor de referencia deseada, la cual se estableció como $Ref = 0$; el error del sistema de control (e) se calculó mediante $e = Ref - R_{dif}$; y, u es la señal de control.

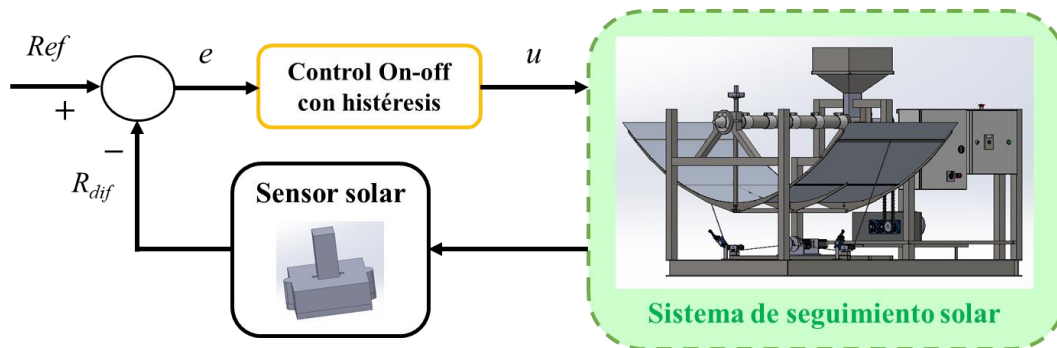


Figura 15. Sistema de control del seguimiento solar [81].

Adicionalmente, se empleó una tarjeta Raspberry Pi® 3B (RPI) como la tarjeta de control principal por lo que el algoritmo de seguimiento solar fue desarrollado en lenguaje de programación Phyton 3. Básicamente, el seguimiento solar se programó de tal manera que la respuesta de salida (rotación horario o antihorario del motor de seguimiento) este constantemente ajustándose según las respuestas de entrada (señal de las fotorresistencias LDR) del sensor solar para lograr el objetivo de que los rayos solares se concentren perpendicularmente sobre el receptor durante el día. Un gabinete se empleó para alojar el sistema mecatrónico de control de seguimiento solar del colector solar de canal parabólico (CCP). Mecánicamente, el sistema de seguimiento solar contempló una parábola reflectora como el elemento reflectante, la cual se fijó sobre un armazón que le permitió mantener su geometría parabólica y permanecer equilibrada. El foco lineal de la parábola se ubicó a 500 mm de radio focal, lugar donde se instaló el barril (receptor) de la máquina extrusora y en donde se concentraron los rayos solares durante el día. Un par de guías (soportes flotantes) verticales integradas al armazón permitieron asegurar que el foco lineal se mantuviera constante a la distancia focal. La rotación del CCP fue regulado por el programa de seguimiento solar desarrollado mediante un sistema mecánico de seguimiento solar integrado por un motor DC, un motorreductor y un adaptador de malacate con cable y guías.

3.6 DISEÑOS EXPERIMENTALES

La validación de la funcionalidad de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada fue establecida mediante una caracterización de la velocidad del husillo y por medio de una caracterización térmica de

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

temperaturas. Para la caracterización de la velocidad de giro del husillo se utilizó un fototacómetro dual DT-2236 marca Lutron para medir las revoluciones por minuto (rpm) de velocidad de giro del husillo según la potencia regulada por el variador de frecuencia instalado. La caracterización térmica de temperaturas fue establecida bajo tres metodologías y considerando como la variable de respuesta deseada en cada experimentación la temperatura de 200 ± 15 °C –temperatura promedio de extrusión del polietileno de baja densidad (LDPE) [82]-[83]– alcanzada en un punto del receptor. Las mediciones térmicas se realizaron empleando una cámara termográfica FLIR E5xt y se seleccionaron 4 puntos P1, P2, P3 y P4 de medición sobre el barril (receptor), ver Figura 16. En la primera metodología, se emplearon solo las resistencias eléctricas calentadoras para alcanzar la temperatura de cálculo. En la segunda metodología, se usó exclusivamente la radiación solar (a través del CCP). En la tercera metodología, el sistema se operó en modo híbrido bajo dos modalidades: (a) la primera modalidad consistió de un modo híbrido con precalentamiento (primeramente, uso de energía solar en un determinado tiempo y posteriormente encendido de las resistencias eléctricas calentadoras) y (b) en la segunda modalidad, el prototipo se operó en un modo híbrido total (uso simultaneo de la energía solar y encendido de las resistencias eléctricas calentadoras). En cada metodología se buscó alcanzar o rebasar la temperatura objetivo y consecuentemente analizar la posibilidad de apagar temporalmente las resistencias eléctricas calentadoras durante el proceso de extrusión, lo que permitiría un ahorro de consumo de energía eléctrica. Ninguna prueba de extrusión fue realizada (trabajo a futuro).

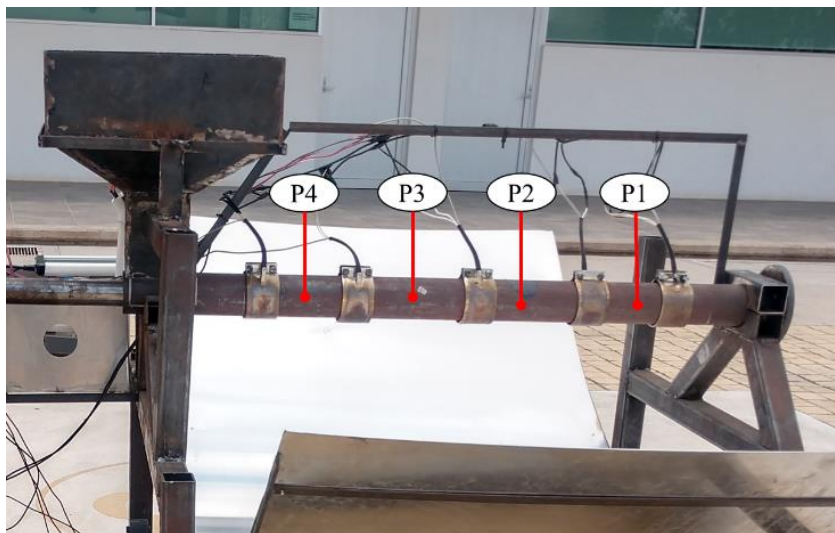


Figura 16. Puntos P1, P2, P3 y P4 de medición de temperaturas experimentales [81].

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada. Para una facilidad de comprensión de los mismos, los resultados son expresados por sistema de operación.

En la primera parte, se describe el sistema de la estructura de soporte. En la segunda parte, se enuncia el sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena. En la tercera parte, se detalla el sistema de mando eléctrico. En la cuarta parte, se explica la conformación del sistema de extrusión. En la quinta parte, se especifica el sistema de concentración solar de canal parabólico y seguimiento solar. En la sexta parte, se presenta el sistema híbrido de calentamiento basado en energía solar concentrada y energía eléctrica en forma de calor. En la última parte se redacta la caracterización experimental realizada bajo las metodologías propuestas. En cada parte y, según aplique, se presentan los diseños mecánicos, las fases de la manufactura y/o el aspecto final de cada sistema.

Adicionalmente, se hace mención de demás trabajos desarrollados durante la evolución de este estudio, los cuales no se integraron al prototipo final, pero sientan las bases de pruebas de concepto para establecer demás trabajos de investigación a futuro.

4.1 ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL PROTOTIPO

La estructura de soporte se diseñó y manufacturó con unas dimensiones generales de largo x ancho x alto de 2030 x 1040 x 1030 milímetros (mm), ver Figura 17.

La estructura de soporte se empleó para el montaje y sujeción de todos los sistemas de operación de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada. Todos los elementos horizontales, verticales y las bases que conformaron la estructura de soporte fueron elaborados con materiales en acero al carbón comercial de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada.

En la Tabla 1 se describen los principales materiales de construcción utilizados. En este estudio no se contempló la instalación de piezas y elementos de seguridad personal por lo que el diseño de la estructura de soporte únicamente consideró el armazón principal en donde se fijaron los demás sistemas de operación.

Por cuestiones de patentado, ningún diseño isométrico o técnico de la estructura de soporte es presentado. En la Figura 18, se muestra una vista de la estructura de soporte concluida.

Ningún análisis de esfuerzos fue realizado.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico



Figura 17. Dimensiones de construcción de la estructura de soporte (unidades en mm).



Figura 18. Construcción de la estructura de soporte: vista completa.

4.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA POR ENGRANAJE Y CADENA DEL PROTOTIPO

Se diseñó y construyó un sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena para reducir la velocidad de giro de fábrica del motor de potencia de trabajo empleado y consecuentemente lograr que el husillo gire dentro del barril de manera controlada a un determinado número de revoluciones por minuto (rpm) y conseguir –aunado al diseño del husillo– que el material avance hacia la punta del husillo. El sistema de transmisión de potencia se conformó de una caja reductora (caja de engranes), un motor AC de potencia y una cadena de potencia. Como motor AC de potencia se empleó un motor Siemens trifásico AC, 2HP, 230V, 5.6A, 60 Hz, 1740 min^{-1} (1740 rpm) de velocidad angular de trabajo. Como cadena de potencia se empleó una cadena de paso 60 medida 3/4. La caja

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

reductora constó de una carcasa (medidas de 482 x 127 x 177 mm) que fue elaborada con placa de acero 4140 1/2" con orificios suficientes, en cantidad y dimensiones, para la sujeción de los ejes, engranes y chumaceras de sujeción. Los ejes fueron elaborados con acero 1045 cold roll 1". Los engranes fueron manufacturados mediante corte de plasma utilizando placa de acero 3/8" y en donde cada engrane posee un módulo de 2 mm. Para la sujeción de la caja de engranes a la base principal se le soldaron placas de fijación de acero 1/4". La caja reductora se diseñó y manufacturó con un tren de engranaje ordinario compuesto por 3 engranes de 25 dientes cada uno (OD 55 mm), 2 engranes de 65 dientes cada uno (OD 140 mm), 1 engrane de 55 dientes (OD 120 mm) y 3 ejes de giro de 1". La sujeción y soporte de los ejes y engranes fue a través de chumaceras de pared tipo brida cuadrada de 25 mm UCF205-100 además de cuñeros y bujes con opresores de 1/4. Las chumaceras fueron colocadas sobre las paredes de la carcasa. La caja de engranaje se instaló en la sección posterior de la máquina extrusora sobre el área de la lámina antiderrapante y alineada al husillo. La comunicación con el husillo se realizó por medio de la cadena de potencia y una catarina 60B13 3/4. En la Figura 19, se muestra un diseño isométrico del sistema de transmisión de potencia. En la Figura 20, se observa una etapa parcial de la construcción de la caja reductora. En la Figura 21, se aprecia una vista completa de la caja reductora fijada a la estructura de soporte. En la Figura 22, se presenta el arreglo del tren de engranaje de la caja reductora.

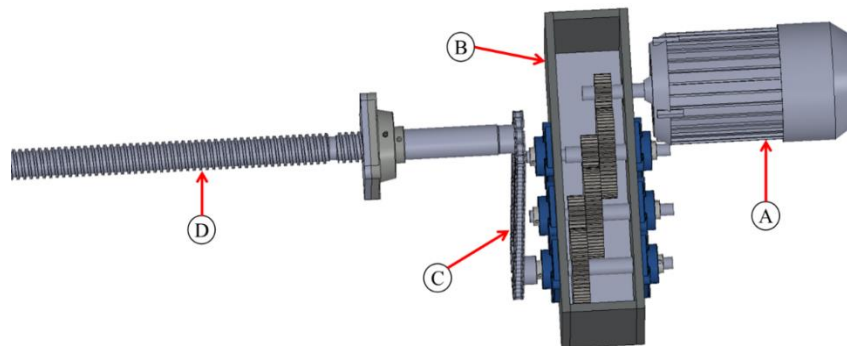


Figura 19. Diseño isométrico del sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena. A) Motor AC de potencia, B) caja reductora, C) cadena de potencia, D) husillo.



Figura 20. Preensamble de engranaje, ejes y chumaceras en la caja reductora.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

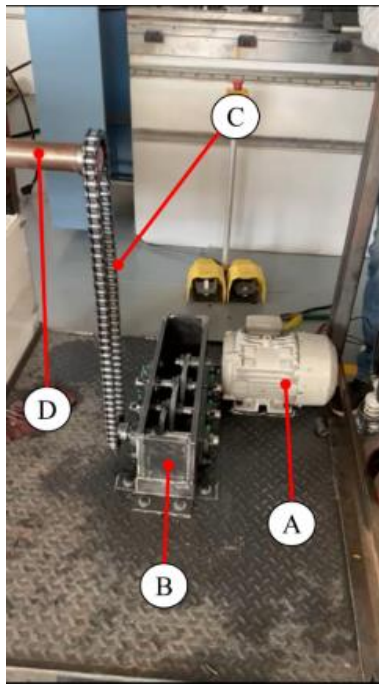


Figura 21. Transmisión de potencia. A) Motor, B) caja reductora, C) cadena, D) husillo.

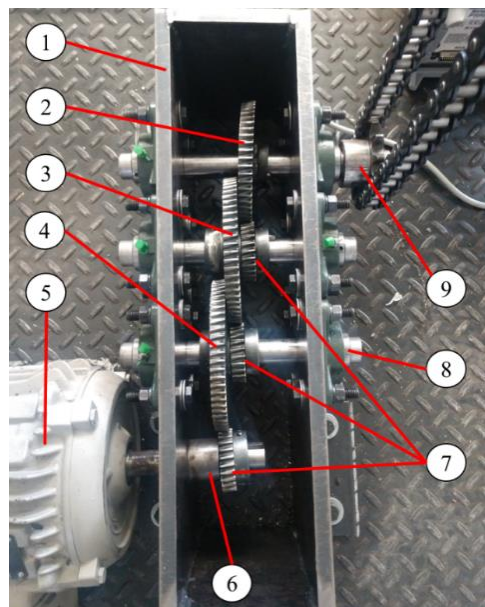


Figura 22. Caja de engranes reductora. 1) Carcasa, 2) engrane de 55 dientes como el eje útil, 3) engrane de 65 dientes, 4) engrane de 65 dientes, 5) motor de potencia, 6) cople de sujeción del eje motriz; 7) engranes de 25 dientes, 8) eje de engrane y chumacera de pared, 9) catarina de comunicación al husillo adjunto al eje útil.

4.3 SISTEMA DE MANDO ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO

Se estableció un sistema de mando eléctrico por medio de un variador de frecuencia 2HP 2F 240V 0-60Hz Schneider Electric y un contactor electromagnético 9A 3F 220V AC Tesys Schneider Electric para reducir –aunado al funcionamiento efectivo de la caja de engranaje– la velocidad de giro de fabrica del motor trifásico de 1740 rpm a rangos entre 0 y 200 rpm. Los controles se hospedaron en un tablero de control previsto con botoneras de encendido, apagado y paro de emergencia. El variador de frecuencia permitió controlar la velocidad de giro del motor mediante el ajuste de su frecuencia, expresada en unidades de Hertz (Hz). El motor es alimentado con 220V a una frecuencia de 60 Hz para su funcionamiento. En la Figura 23, se visualiza el diagrama eléctrico (esquema) del circuito eléctrico del variador de frecuencia. El disyuntor fue colocado como medida de seguridad para abrir/cerrar el circuito eléctrico cuándo llegará a ocurrir una falla en el equipo, esto es, el paro de emergencia. El interruptor de encendido principal permitió realizar el on-off del circuito. El indicador diodo emisor de luz (LED) permitió visualizar cuando el circuito está en funcionamiento. En las Figuras 24 y 25, se presentan vistas del sistema de mando eléctrico construido.

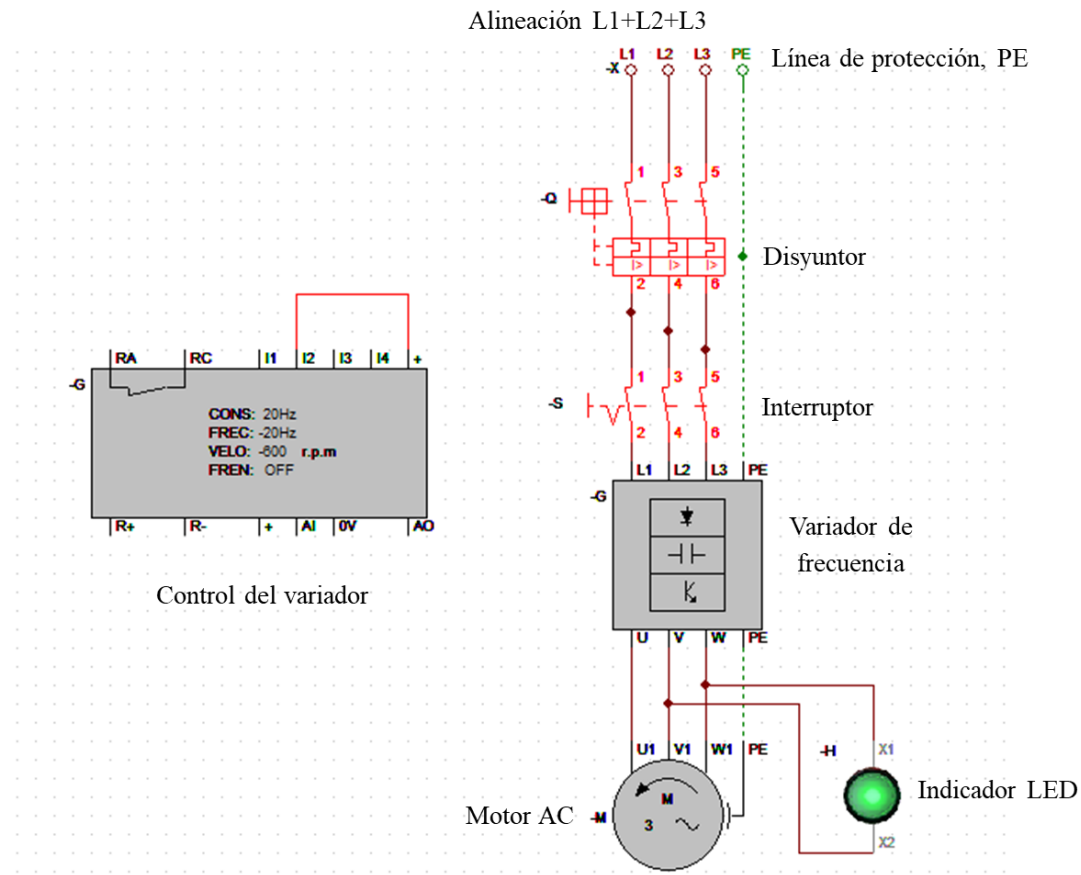


Figura 23. Esquema eléctrico del sistema de mando eléctrico del variador de frecuencia y del motor de potencia.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

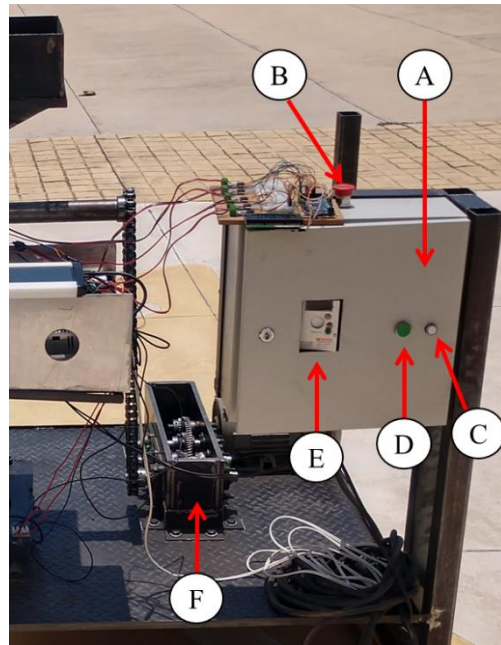


Figura 24. Vista exterior del sistema de mando eléctrico. A) Tablero de control, B) botón de paro de emergencia, C) pulsador LED de indicador de encendido, D) interruptor de encendido principal, E) variador de frecuencia, F) caja reductora.

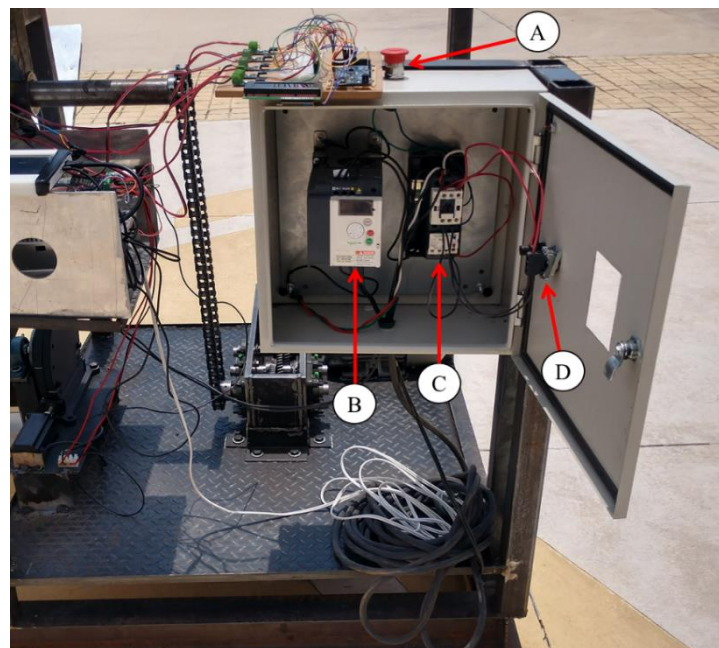


Figura 25. Vista interna del sistema de mando eléctrico. A) Botón de paro de emergencia, B) variador de frecuencia, C) contactor electromagnético, D) botón de encendido principal.

4.4 SISTEMA DE EXTRUSIÓN DEL PROTOTIPO

El sistema de extrusión del prototipo se integró de una tolva de alimentación, un barril de extrusión, un husillo, una matriz o boquilla de extrusión y de un conjunto de resistencias eléctricas calentadoras. En la Figura 26, se aprecia un diseño isométrico del sistema de extrusión y sus componentes.

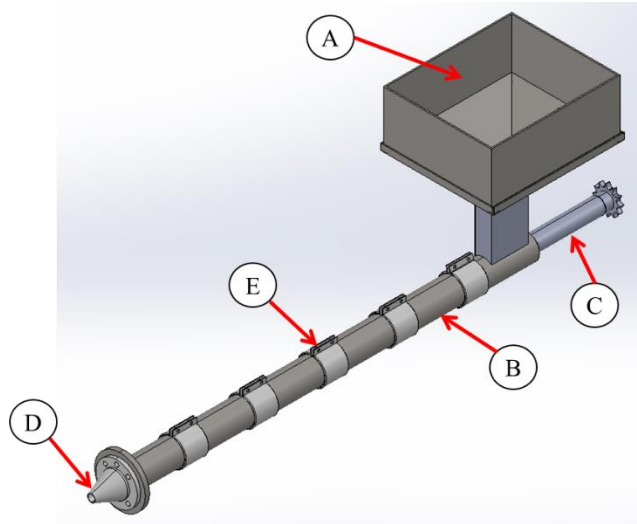


Figura 26. Diseño isométrico del sistema de extrusión. A) Tolva de alimentación, B) barril, C) husillo, D) boquilla o matriz de extrusión, E) resistencia eléctrica calentadora.

El barril se construyó a partir de una barra perforada cilíndrica (ID 50 mm, OD 75 mm) de acero 8630 de 1500 mm de largo, el cual fue sometido a un proceso de corte para adoptar una longitud de trabajo final de 1200 mm. El barril fue el elemento utilizado como el dispositivo receptor del presente trabajo. En la punta frontal del barril se le soldó una placa redonda de acero de 1/4" de OD 150 mm con orificios de sujeción para su fijación a la estructura de soporte y poder adaptarle la boquilla de extrusión. La tolva de alimentación se fabricó utilizando lámina negra de acero cal. 14 y consta de una sección superior rectangular (medidas de 375 x 315 x 150 mm), de una sección convergente inferior piramidal invertida truncada (dimensiones de 119 mm de altura x 118125 mm² de base mayor x 5500 mm² de base menor) y de un cuello rectangular dosificador (proporciones de 110 x 50 x 158 mm). La boquilla de extrusión se diseñó y manufacturó como el elemento de extrusión de área de sección transversal constante utilizado para forzar el paso del material fundido a través de él y otorgarle al producto final una geometría cilíndrica de salida. La boquilla posee una base redonda de placa de acero 1/4" OD 150 mm con orificios de sujeción para acoplarse a la placa frontal del barril prevista de una terminación frontal tipo cónica con una base mayor de 1" de diámetro (con un orificio de OD 3/4" $\approx$ 19 mm), una base menor de 3/4" (con un orificio de OD 10 mm) y de una altura de 15 mm. El orificio de la boquilla se estableció de 10 mm de diámetro y funge como la salida final del material extruido. Por lo que el material resultante se fuerza a un paso de reducción inicial de 50 (ID del barril) a 19 mm (OD posterior de la boquilla) y a 10 mm (OD anterior de la boquilla). El husillo es

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

el elemento clave del sistema de extrusión ya que debe contar con una geometría de cuerda helicoidal para realizar –al momento de estar girando– el avance y empuje del material fundido hacia la salida del barril. En el trabajo de [84] se describe a más detalle el diseño y la manufactura del husillo de trabajo empleado en esta Tesis. El husillo se fabricó a partir de una barra redonda de acero 4140T de 2000 mm de longitud y OD 50 mm, la cual se sometió primeramente a un proceso de cizalla para adoptar un largo final de 1500 mm y después a una operación de desbaste para adoptar un OD 47 mm final. En la Figura 27, se visualiza el sistema de extrusión instalado en el prototipo. En la Figura 28, se muestra la boquilla de extrusión manufacturada. En la Figura 29, se observa el aspecto del husillo con cuerda helicoidal fabricado.

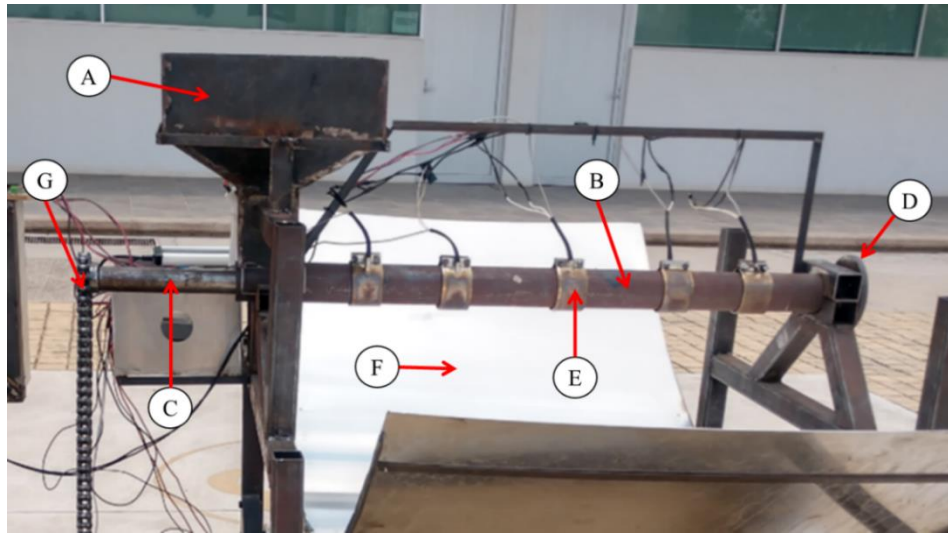


Figura 27. Sistema de extrusión completo. A) Tolva de alimentación, B) barril, C) husillo, D) boquilla de extrusión, E) resistencia eléctrica calentadora, F) CCP, G) cadena del sistema de transmisión de potencia.

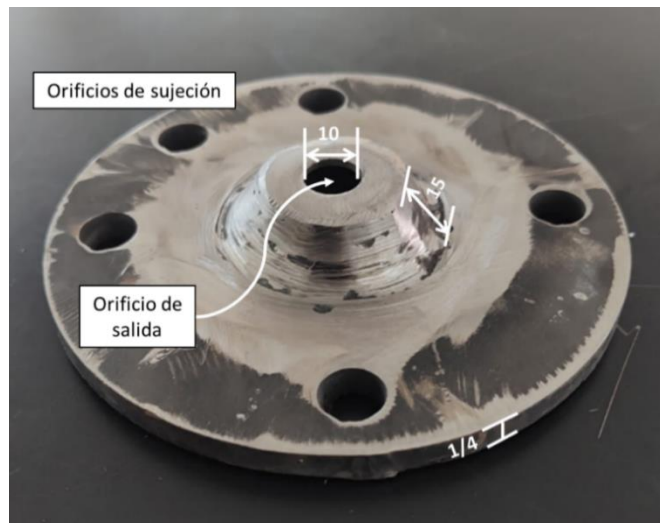


Figura 28. Matriz o boquilla de extrusión.



Figura 29. Vista completa del husillo con alabes maquinados [84].

4.5 SISTEMA DE CONCENTRACIÓN Y SEGUIMIENTO SOLAR DEL PROTOTIPO

En esta sección se describe la simulación óptico-energética del colector solar de canal parabólico (CCP), así como también se detalla el diseño y la manufactura del CCP, del sensor solar y del sistema mecánico de seguimiento solar. De igual manera, se enuncia el algoritmo de programación de seguimiento solar desarrollado. Finalmente, se presenta la integración del CCP a la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada.

4.5.1 Simulación óptico-energética del CCP

En [81] se reporta con más detalle la técnica de simulación óptico-energética del CCP empleada. En este documento se describen los resultados principales. Primeramente, se propuso para este estudio unas dimensiones del CCP de 2000 mm de lado recto, 960 mm de ancho y 500 mm de foco de parábola ya que fueron las dimensiones máximas permisibles y acordes a la geometría espacial disponible para colocar el CCP en el prototipo. El análisis óptico permitió validar que las dimensiones seleccionadas del CCP fueron las pertinentes ya que se logró un adecuado flujo energético del concentrador hacia el receptor. Empleando el software de trazado de rayos solares Tonatiuh[®] bajo los parámetros especificados en la Tabla 2, se alcanzó un nivel de concentración solar máximo en el receptor de hasta 10030 W/m² con una concentración solar promedio de 3.85x (3.85 Soles, 1 Sol = 1000 W/m²) cuando la radiación incidente fue perpendicular a la superficie normal del concentrador con un error de seguimiento solar (STE) igual a 0°, por lo que se validaron las dimensiones propuestas del CCP. En la Figura 30, se muestra el mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de incidencia es de 90° y un STE igual a 0° y en donde se apreció que los rayos solares incidieron completamente sobre el receptor. En la Figura 31, se presenta la distribución de flujo incidente cuando el STE es igual a 0° y en donde se observó que la energía solar es completamente homogénea a lo largo del receptor. En las Figuras 32, 34 y 36, se visualizan los mapas de flujo de fotones cuando el ángulo de

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

radiación incidente y la normal de la superficie son de 87.5° , 85° y 82.5° , respectivamente y en donde se obtienen concentraciones solares promedio de $3.84x$, $3.26x$ y $1.48x$, respectivamente. Por otra parte, en la Figuras 33, 35 y 37, se aprecian las distribuciones de flujo incidente en el receptor cuando el STE es igual a 2.5° , 5° y 7.5° , respectivamente y, en donde se obtienen niveles de concentración solar máximas en el receptor de 13549 W/m^2 , 17294 W/m^2 y 7191 W/m^2 , respectivamente. Los valores anteriores son consistentes entre sí, por lo que también permitieron validar que las dimensiones propuestas del CCP fueron las adecuadas para el prototipo desarrollado. Adicionalmente, se calculó el ángulo de aceptación teórico (θ_a) que es el ángulo de un concentrador cuando las pérdidas de concentración solar promedio son del orden de los 2° [85]. En la Figura 38, se muestra cuando θ_a es igual a $\pm 4.2^\circ$. El valor anterior indicó que el STE es igual a 4.2° y por tanto se garantizó que el flujo solar promedio sea del 98%. Después de este ángulo, la concentración promedio cae drásticamente. Debido a lo anterior, se concluyó que el sistema de seguimiento solar debe tener una precisión mayor a $\pm 4.2^\circ$, lo que representó una tolerancia de seguimiento amplia. Con base a esto, se seleccionaron los actuadores, sensores solares, controlador, algoritmo de control, sistema de transmisión mecánica, entre otros.

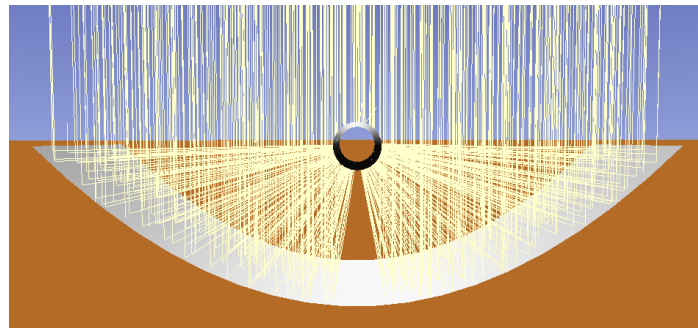


Figura 30. Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 90° [81].

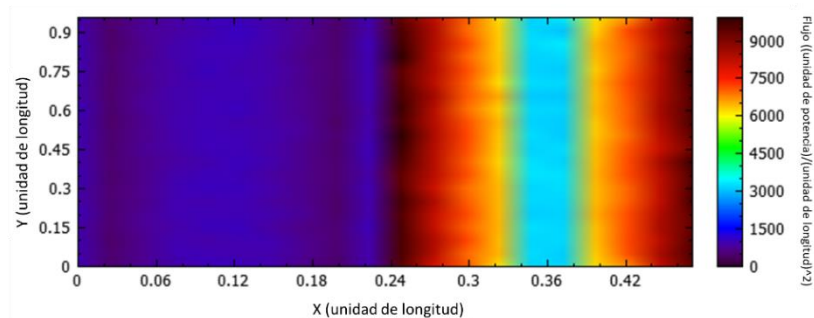


Figura 31. Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un STE = 0° [81].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

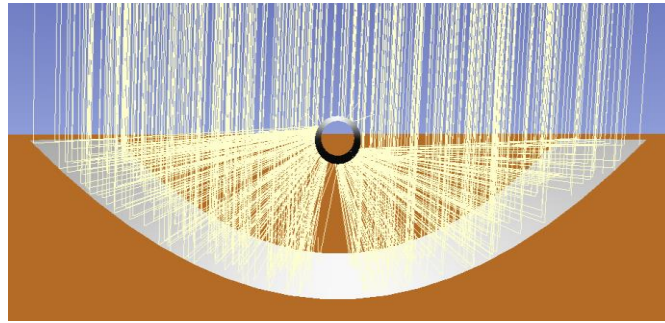


Figura 32. Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 87.5° [81].

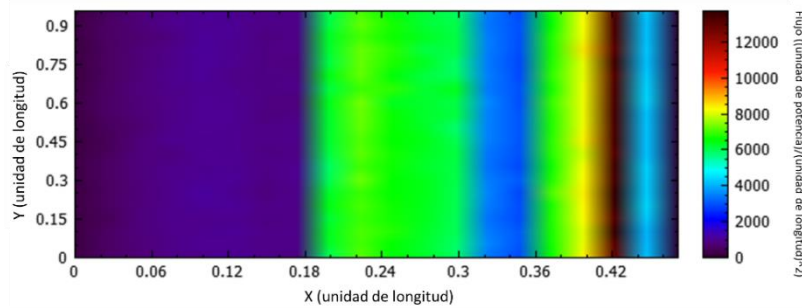


Figura 33. Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un $STE = 2.5^\circ$.

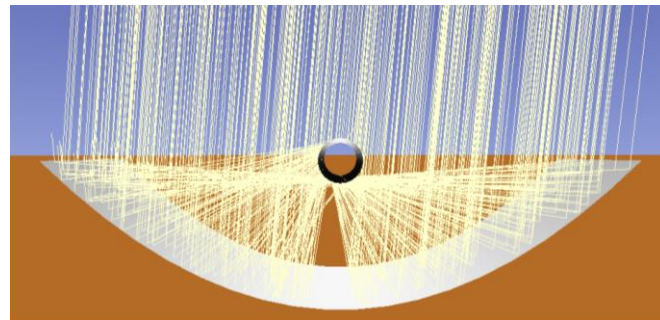


Figura 34. Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 85° [81].

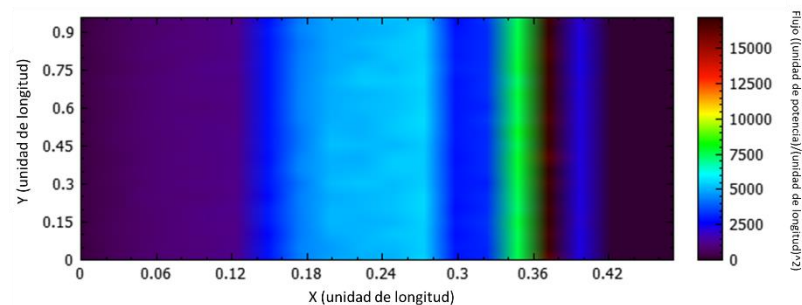


Figura 35. Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un $STE = 5^\circ$.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

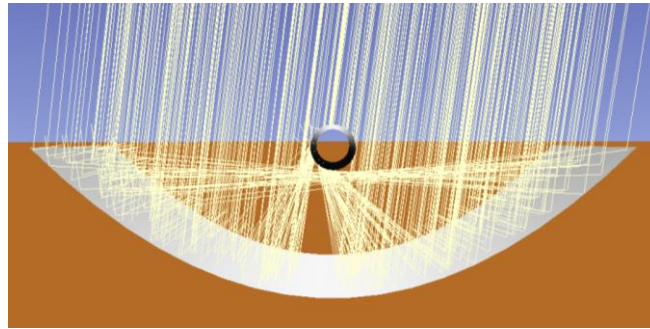


Figura 36. Mapa de flujo de fotones cuando el ángulo de radiación incidente y la normal de la superficie es de 82.5° [81].

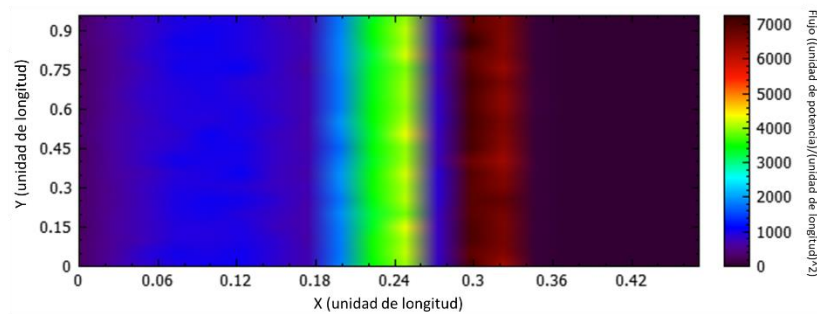


Figura 37. Distribución de flujo incidente en el tubo receptor con un $STE = 7.5^\circ$.

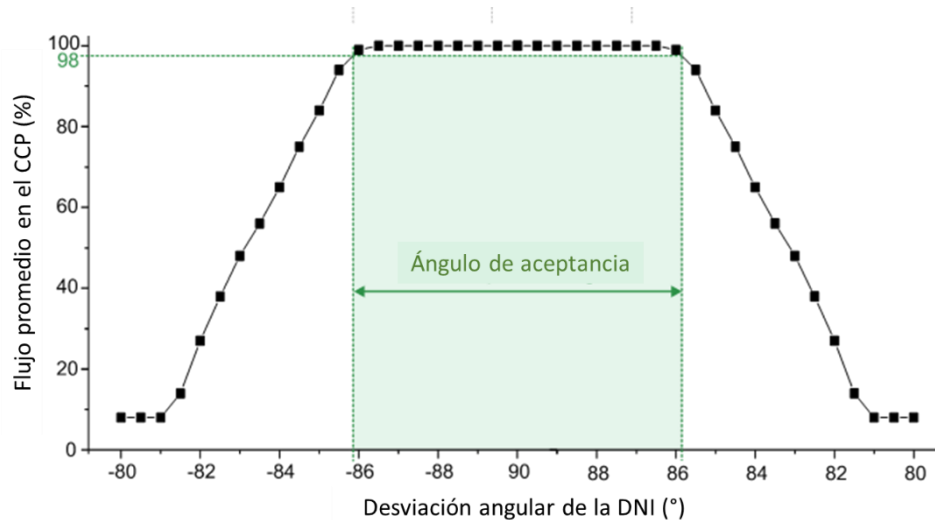


Figura 38. Variaciones en el flujo promedio incidente ante cambios en la desviación angular de la DNI [81].

4.5.2 Diseño y manufactura del CCP y del sistema mecánico de seguimiento solar

El CCP se diseñó con una geometría parabólica y se fijó sobre una estructura (armazón) metálica en forma de arco para mantener su curvatura parabólica y poder permanecer equilibrada en el prototipo por medio de un sistema de

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

soportes flotantes adaptados al armazón y así poder girar sobre el barril mediante un sistema de movimiento mecánico de seguimiento solar diseñado para este estudio. Por cuestiones de patentado no se presenta ningún diseño del CCP ni del sistema de movimiento mecánico. El armazón y los soportes flotantes fueron manufacturados con acero al carbón comercial, pero de resistencia comprobada. El sistema de movimiento mecánico de seguimiento solar se construyó para realizar un seguimiento solar en un eje en una dirección de este a oeste (siguiendo el movimiento aparente del Sol desde su amanecer hasta su ocaso). Para lo anterior, se utilizaron componentes y elementos de electrónica modular y de izaje mecánico. En particular, los soportes flotantes sirvieron de guías verticales que permitieron asegurar que el foco lineal de la parábola (ubicado a 500 mm de radio focal) se mantuviera constante a la distancia focal ya que cuentan con terminales circulares adaptables al barril y los cuales se integraron al armazón por medio de tornillería de sujeción. El CCP es el dispositivo concentrador y el elemento óptico reflejante y fue fabricado con una lámina de aluminio natural con acabado tipo espejo cal. 18 de 2000 mm de largo y 90 mm de ancho. Específicamente, el armazón se compone por 3 arcos de acero de 1/4" (2 arcos de 2 m de lado recto y 1 arco de 1 m de lado recto) y 4 elementos secundarios de soporte de solera de acero 1/8 x 3/4". El sistema mecánico de seguimiento solar se integró con un motor NEMA23 OK57H18112A, 4.2A, 3Nm, un motorreductor de engranaje de relación de velocidad 50:1, de un malacate con cables de acero 3/32" y de 2 guías tipo carretilla doble embalada corrediza. En la Figura 39, se muestra una vista frontal del CCP durante su etapa de construcción. En las Figuras 40 y 41, se presentan vistas en acercamiento del sistema mecánico de seguimiento solar puesto en el prototipo. En la Figura 42, se observa el CCP y el sistema mecánico de seguimiento solar integrados en la máquina extrusora.

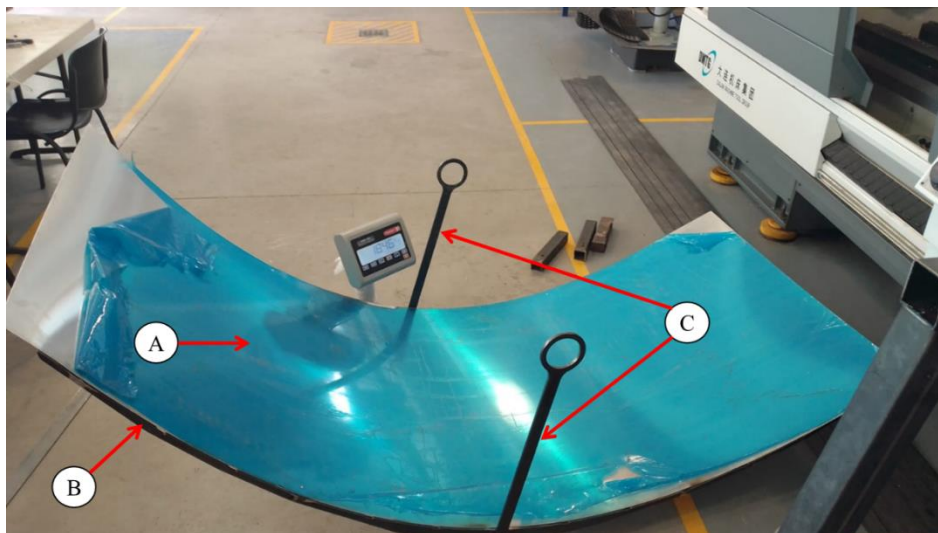


Figura 39. Manufactura del CCP en vista frontal. A) Parábola, B) armazón, C) soportes verticales flotantes.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

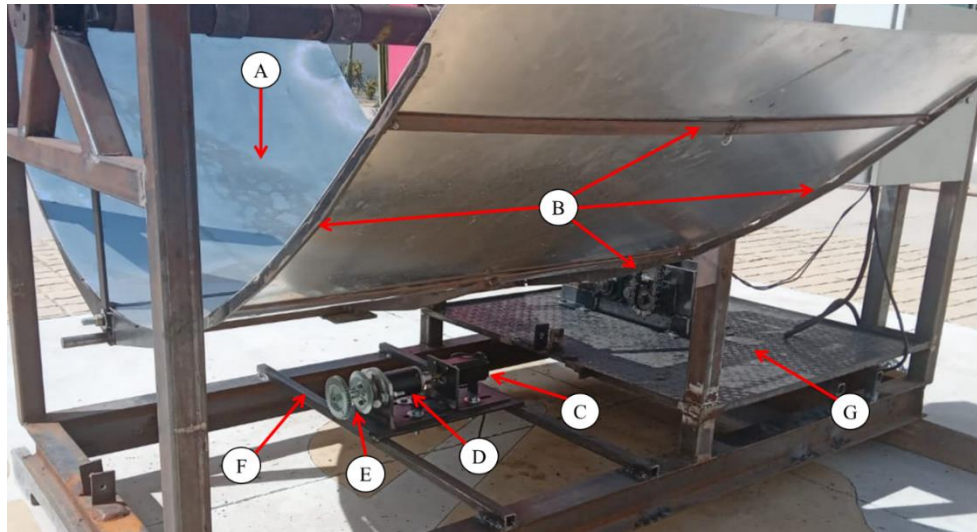


Figura 40. Vista 1 (acercamiento) del sistema mecánico de seguimiento solar instalado. A) Parábola, B) armazón, C) motorreductor, D) motor DC, E) malacate sin guías ni cable de soporte, F) base del sistema mecánico de seguimiento solar, G) estructura de soporte de la máquina extrusora.

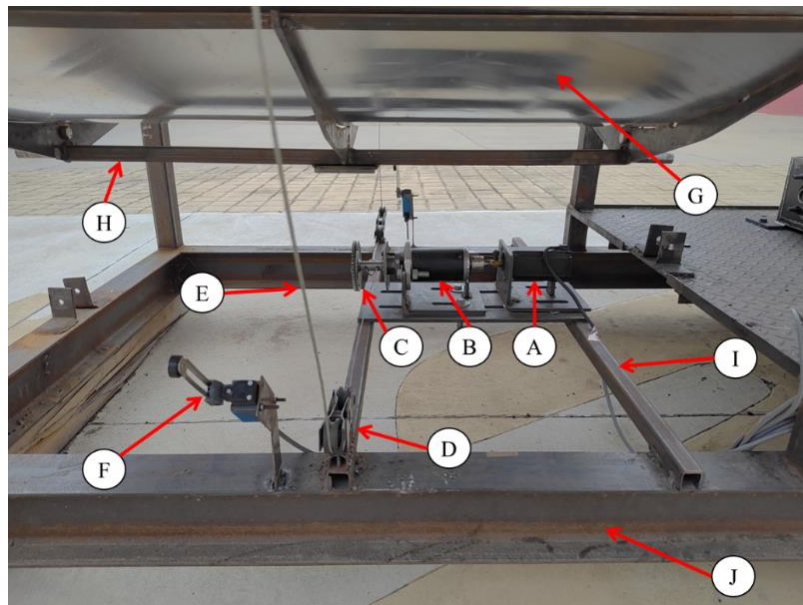


Figura 41. Vista 2 (acercamiento) del sistema mecánico de seguimiento solar instalado. A) Motorreductor, B) motor DC, C) malacate, D) guía tipo carretilla doble embalada corrediza, E) cable de soporte, F) sensor ME-8108 de fin de carrera, G) parábola, H) armazón, I) base del sistema mecánico de seguimiento solar, J) estructura de soporte de la máquina extrusora.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico



Figura 42. Montaje del CCP y el sistema mecánico de seguimiento solar en la máquina extrusora.

4.5.3 Diseño y manufactura del sensor solar

El sensor solar se diseñó considerando una base tipo carcasa en cuyo interior se alojó la parte de hardware del sensor. El diseño de la carcasa constó de una sección superior y de una inferior. En particular, la carcasa superior es una base cuadrada de 71 x 71 x 22.5 mm con 2 orejeras de sujeción y que en su parte central se colocó un divisor rectangular tipo obelisco (med. 20 x 20 x 45 mm) y a un costado de éste, se consideraron 2 orificios de 5 mm de diámetro cada uno. Los orificios sirvieron como ventanas que permitieron que la radiación solar incidiera directamente sobre las fotorresistencias dependientes de la luz (LDR) modelo GL5516 empleadas. El obelisco divisor proporcionó un sombreado sobre uno u otro fotorresistor de acuerdo a la posición aparente del Sol durante el día, es decir, el obelisco divisor proyectó la sombra sobre una u otra fotorresistencia de manera tal que la mayor radiación solar que recibe uno u otro fotorresistor oriente el movimiento de giro del CCP en un eje para mantener el foco lineal del CCP sobre el receptor en la mayor parte del día. La carcasa inferior también es una base plana cuadrada de 71 x 71 x 6 mm con 2 orejeras de sujeción para su acople a la parte superior y con un orificio de salida para un conector glándula de cableado de comunicación. La carcasa del sensor se fabricó mediante impresión 3D con material ABS en color blanco utilizando una impresora MakerBot Replicator 2x. En la Figura 43, se presenta un diseño isométrico de la vista externa del sensor solar y en donde se describen sus principales componentes. En la Figura 44, se muestra el aspecto de acabado final de la carcasa del sensor solar manufacturado en impresión 3D. El hardware del sensor solar se constituyó de una placa electrónica de circuito impresa fabricada para este estudio y en la cual se soldaron los 2 fotorresistores LDR denominados LDR₁ y LDR₂. Para el montaje del sensor solar sobre la máquina extrusora se fijó la carcasa del sensor solar en una base vertical de acero de 134 mm de alto con un fondo circular de 50 mm de radio para adaptarse a la circunferencia del barril. En la Figura 45, se aprecian vistas

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

de la parte superior de la carcasa (vista izquierda), del hardware del sensor solar consistente principalmente de los fotorresistores LDR soldados en la placa electrónica (vista central) y de la puesta en operación del sensor (vista derecha). En la Figura 46, se muestra el sensor solar colocado en la máquina extrusora.

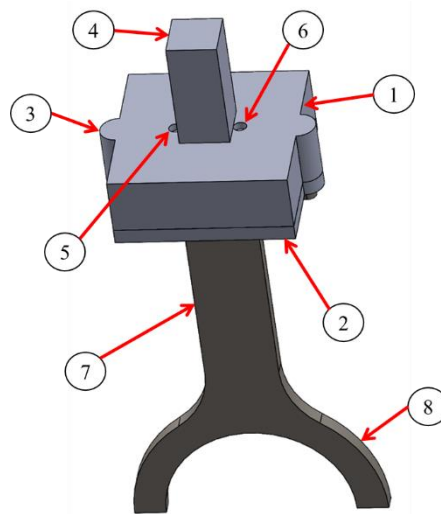


Figura 43. Diseño isométrico del sensor solar. 1) Carcasa parte superior, 2) carcasa parte inferior, 3) orejeras de sujeción, 4) obelisco divisor, 5) orificio de ventana para el LDR₁, 6) orificio de ventana para el LDR₂, 7) cuello de la base vertical de montaje al barril, 8) fondo circular de montaje al barril.

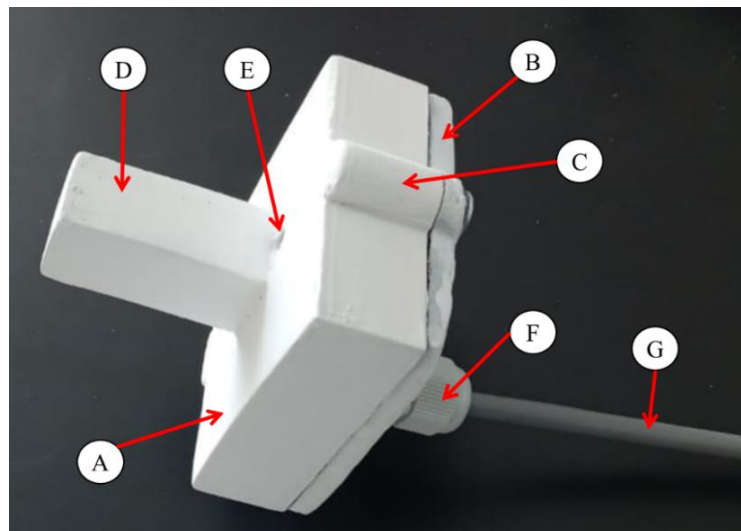


Figura 44. Vista del sensor solar. A) Carcasa parte superior, B) carcasa parte inferior, C) orejeras de sujeción, D) obelisco divisor, E) orificio de ventana para el LDR₂, F) conector glándula, G) cableado de comunicación.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

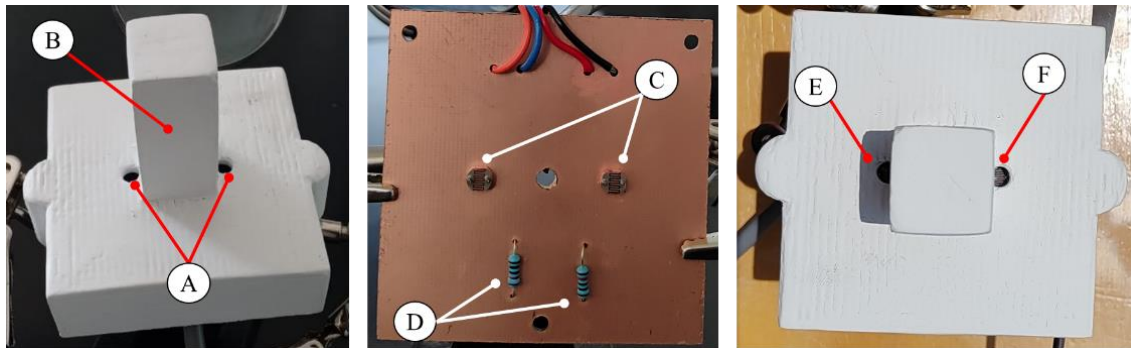


Figura 45. Vistas del sensor solar fabricado [81]: carcasa parte superior (izquierda), hardware del sensor solar (centro), sensor puesto en operación (derecha). A) Ventanas de los fotorresistores, B) columna de sombreado, C) fotorresistores LDR en la tarjeta electrónica, D) resistencias 10K ohm, E) sombreado sobre LDR₁, F) luminosidad sobre LDR₂.

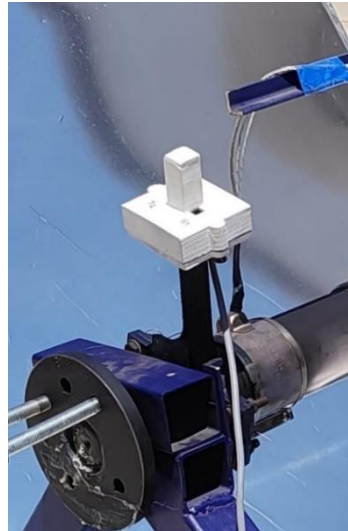


Figura 46. Sensor solar adaptado al barril de la máquina extrusora híbrida.

4.5.4 Algoritmo y programación de seguimiento solar

En el trabajo de [81] se reporta con más detalle el algoritmo y la programación de seguimiento solar desarrollado por lo que en esta Tesis solo se describe de manera resumida los resultados principales. El código completo de programación no es presentado en este documento. El control del seguimiento solar se realizó para un seguimiento en un eje por lo que el movimiento del CCP fue en una orientación de este a oeste mediante el algoritmo de control on-off con histéresis (H) mostrado en la Figura 15. Principalmente, el algoritmo de control logró emitir la señal de control (u) para activar el sistema mecánico de seguimiento solar y provocar que el CCP logre girar hacia el oeste cuando se activa el giro en sentido horario (M_{CW}), en caso contrario, el giro será hacia el este cuando se activa el giro en sentido antihorario (M_{CCW}). En la Figura 47, se presenta un diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento solar desarrollado. En resumen, se desarrolló un algoritmo de control on-off en lazo cerrado con histéresis en donde

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

el control fue retroalimentado por el sensor solar construido para este estudio. Primeramente, se registró el valor del voltaje generado por LDR_1 y LDR_2 y en donde se digitalizaron dichas señales y se compararon con el valor digital producido por la irradiación global horizontal instantánea mínima (GHI_m) requerida para realizar el seguimiento solar. En este estudio se estableció experimentalmente un valor de $GHI_m = 3V$ (voltaje que se genera cuando la radiación global es de 500 W/m^2). Cuando LDR_1 y LDR_2 son mayores a GHI_m , el seguidor solar inicia su rutina de seguimiento, en caso contrario, permanece inmóvil hasta que la radiación solar sea la mínima permisible. Enseguida, se calculó la diferencia $R_{dif} = LDR_1 - LDR_2$ y, cuando $|R_{dif}| \geq H$ el seguidor está desorientado y necesita que su posición sea corregida, caso contrario, cuando $|R_{dif}| < H$, el seguidor está posicionado correctamente y el motor del sistema mecánico de seguimiento solar permanece apagado (M_{off}). Para este estudio, se estableció un valor de $H = 2V$. Finalmente, cuando $R_{dif} > 0$, el CPP girará en M_{CW} hacia el oeste y cuando $R_{dif} \leq 0$, el CCP girará en M_{CCW} hacia el este.

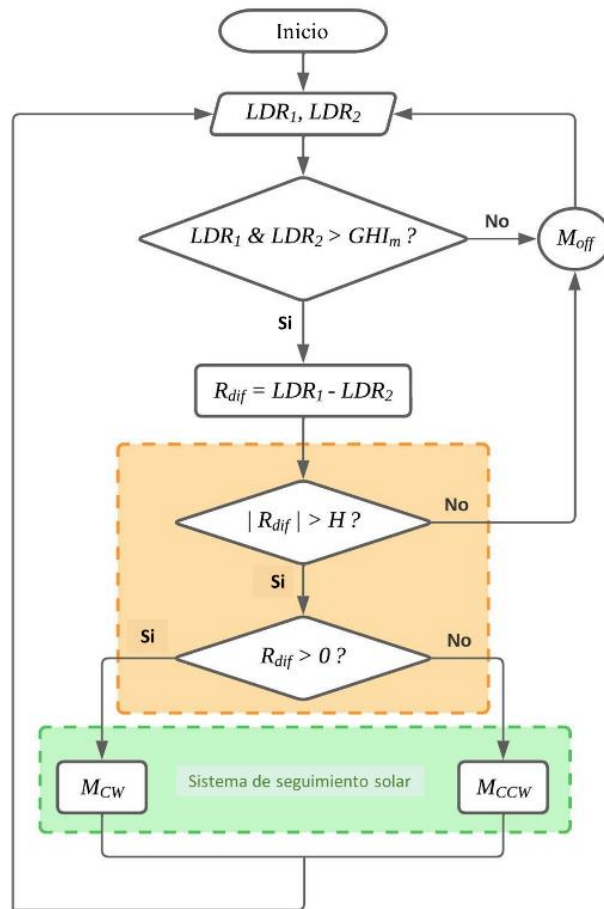


Figura 47. Diagrama de flujo del sistema de control de seguimiento solar en lazo cerrado [81].

4.5.5 Hardware de seguimiento solar

En [81] se reporta con más detalle los elementos y componentes de electrónica modular que conformaron el hardware de control de seguimiento solar en un eje desarrollado. Todos los elementos y componentes del hardware solar se alojaron en un gabinete de control que se muestra en la Figura 48.

En esta Tesis solo se describe de manera general el funcionamiento del sistema mecatrónico de seguimiento solar desarrollado para este trabajo. La tarjeta Raspberry Pi® 3B (RPI) se estableció como la tarjeta de control principal, la cual se comunicó con diversos periféricos, así como con una placa Arduino® Mega 2560 para la adquisición de los datos de seguimiento solar.

Se desarrolló una interfaz hombre-máquina (HMI) para programar el funcionamiento del sistema de seguimiento solar en modo manual o en modo automático, así como establecer demás configuraciones de operación. La interfaz se diseñó en lenguaje Python utilizando la librería de gráficos Tkinter. En la Figura 49, se observa la interfaz y los comandos que pueden visualizarse u operarse en modo automático (en modo manual no es presentado).

En general, todos los demás componentes del seguidor solar lograron cumplir las funciones de alimentación de voltaje, de corriente y de protección. Por mencionar algunos de ellos, el selector de 2 posiciones permitió la alimentación de corriente 110V AC a todo el sistema, el relevador hizo la tarea de bloquear el paso de corriente al drive del motor de seguimiento cuando los sensores de fin de carrera son activados, los interruptores 5SL6106 y 5SL6104 cumplieron la función de proteger al equipo completo en caso de un corto circuito y las fuentes de poder lograron entregar la energía de corriente directa requerida en el sistema, entre otros. Adicionalmente, el hardware de seguimiento solar se integró también con elementos de protección eléctrica y un par de sensores de fin de carrera para limitar el giro del CCP.

El funcionamiento del hardware del sistema de seguimiento solar se basó primeramente en recabar las señales de las fotorresistencias LDR por medio de una tarjeta Arduino® Mega 2560 para posteriormente ser alimentadas a la tarjeta RPi. La tarjeta RPi, recibe las señales, las procesa y emite la señal de control de salida hacia la interfaz, a la tarjeta Arduino® y al driver TB6560 para poner en movimiento el CCP de manera automática y orientarlo hacia M_{CW} o M_{CCW} manteniendo en todo momento el foco lineal directamente sobre el receptor.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

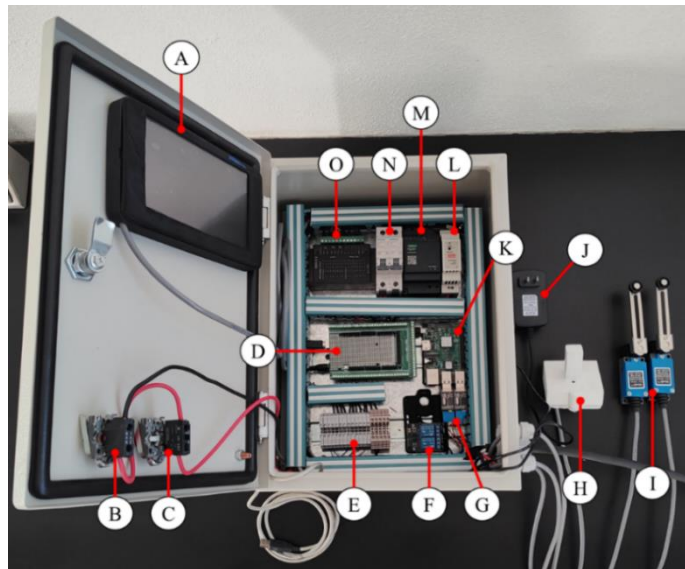


Figura 48. Gabinete de control y monitoreo del sistema de seguimiento solar [81]. A) Pantalla de interfaz HMI, B) pulsador On-off, C) selector On-off, D) tarjeta Arduino® Mega 2560 con módulo de bloque, E) terminales DIN 5V-12V, F) relevadores SDR-05V, G) módulo CH340G, H) sensor solar, I) sensor ME-8108 de fin de carrera, J) fuentes de poder 5V-1A y 5V-3A RPi, K) tarjeta RPi 3B, L) fuente de poder 100-240VAC 5V 2.4A, M) fuente de poder 100-240AC 24V 2.5A, N) interruptores SSL6106 y SSL6104, O) driver TB6560.

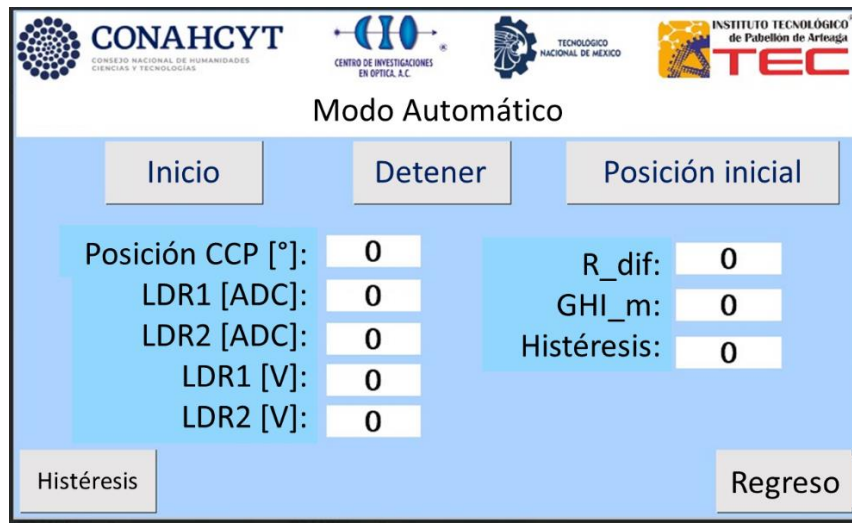


Figura 49. Interfaz del sistema de monitoreo y control de seguimiento solar en modo automático [81]. La interfaz señala la posición del CCP, así como los valores R_{dif} , GHI_m , H y los valores ADC y de voltaje de las fotorresistencias.

4.5.6 Integración del sistema de concentración y seguimiento solar en el prototipo

El sistema de concentración solar (representado por el CCP) y el sistema de seguimiento solar (representado por el sistema mecánico y mecatrónico de seguimiento solar) se lograron instalar en la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada, ver Figuras 42, 50 y 51.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico



Figura 50. Vista posterior del sistema de concentración y seguimiento solar instalado en el prototipo.

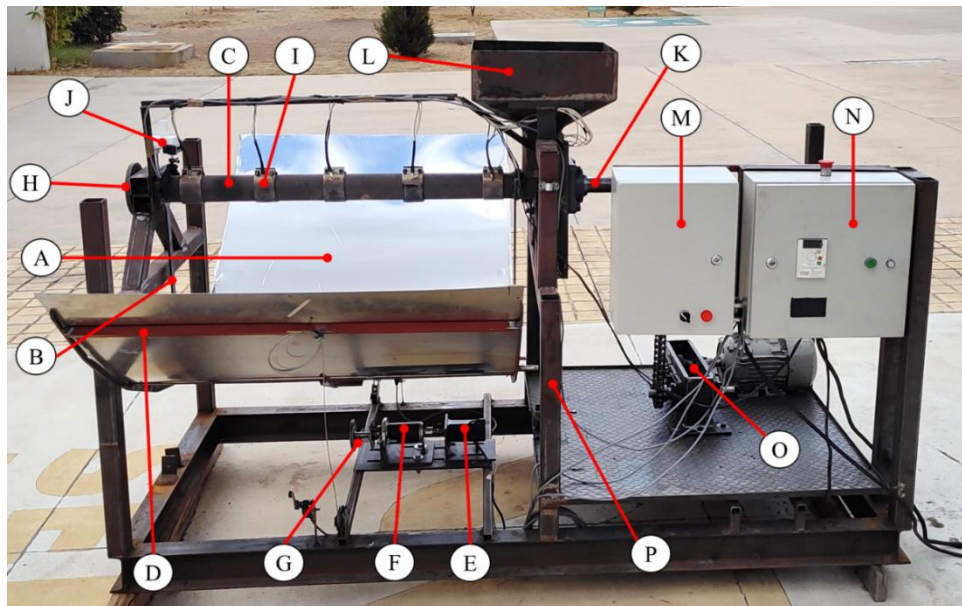


Figura 51. Vista lateral del sistema completo [81]. A) CCP, B) soporte vertical flotante, C) barril, D) armazón de la parábola, E) motor DC, F) motorreductor, G) polea, H) boquilla de extrusión, I) resistencia eléctrica, J) sensor solar, K) husillo, L) tolva, M) centro de control de seguimiento solar, N) centro de control del sistema de mando eléctrico, O) caja de engranaje, P) estructura de soporte.

4.6 SISTEMA HIBRIDO DE CALENTAMIENTO DEL PROTOTIPO

El sistema híbrido de calentamiento de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada fue diseñado y construido considerando: (a) el uso de la energía solar concentrada provista por un sistema de concentración y seguimiento solar y (b) el empleo de la energía eléctrica en forma de calor proporcionada por un sistema de calentamiento por resistencias eléctricas calentadoras. En la Figura 52, se ilustra el sistema híbrido de calentamiento integrado en la máquina extrusora. El objetivo principal de esta Tesis, consistió en validar técnicamente el uso de la energía solar como un medio de calentamiento dentro de un proceso convencional de extrusión de plásticos enfocado a lograr disminuir los consumos energéticos de las resistencias eléctricas calentadoras durante ciertos periodos de funcionamiento propiciando un ahorro en los gastos de operación de este tipo de procesos. Operativamente, el sistema híbrido de calentamiento logró trabajar en dos modalidades. La primera modalidad consistió en un modo híbrido con precalentamiento en donde primeramente se empleó únicamente la energía solar para precalentar el barril y posteriormente se utilizó la energía eléctrica en forma de calor para complementar las temperaturas de trabajo. En la segunda modalidad, se utilizó al mismo tiempo, tanto la energía eléctrica en forma de calor como la energía solar para alcanzar las temperaturas de trabajo.

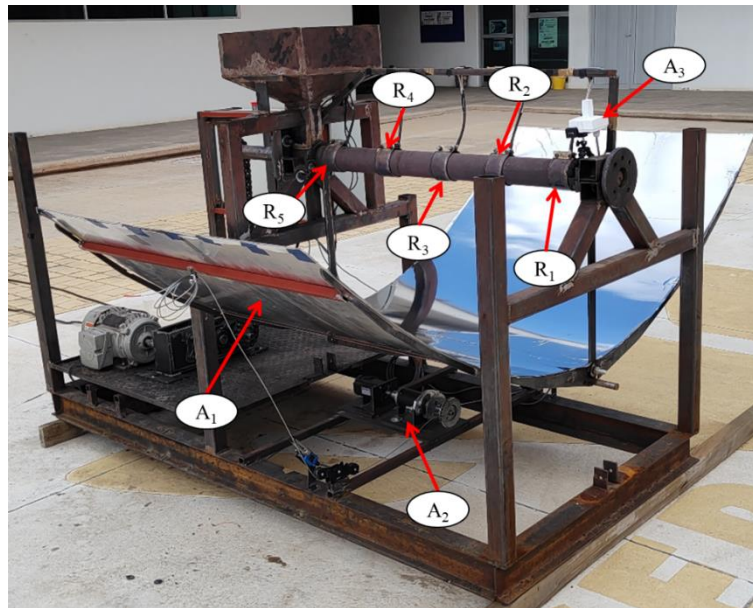


Figura 52. Sistema híbrido de calentamiento del prototipo. A₁) CCP, A₂) sistema mecánico de seguimiento solar, A₃) sensor solar, R₁, R₂, R₃, R₄, R₅) resistencias eléctricas calentadoras.

4.6.1 Sistema de calentamiento por energía solar

En la sección 4.5, se describió las particularidades y características técnicas del sistema de calentamiento por energía solar expresado en términos del sistema de concentración y seguimiento solar propuesto. Siendo este

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

sistema, el principal medio de aporte de energía –expresada en calor y temperatura– necesaria para lograr la fundición y consecuentemente la extrusión del material plástico de estudio.

4.6.2 Sistema de calentamiento por resistencias eléctricas calentadoras

Para el presente estudio, se considera como un medio de calentamiento complementario al sistema de calentamiento por resistencias eléctricas calentadoras propuesto. Este sistema está compuesto por un conjunto de 5 resistencias eléctricas calentadoras (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5) con termopar tipo K integrado, las cuales fueron adquiridas en Casman LK Cia. En la Tabla 3, se describen las características técnicas de las resistencias electricas calentadoras. En la Figura 53, se observan las resistencias adaptadas a la circunferencia del barril, las cuales se instalaron de manera equidistante entre sí, de manera tal que, se dejaron espacios superficiales libres para que los rayos solares incidieran directamente sobre el barril. El encendido de las resistencias eléctricas calentadoras se realizó desde el sistema de mando eléctrico.

Tabla 3. Características técnicas de las resistencias eléctricas calentadoras.

Característica	Valor	Característica	Valor
Modelo	B10044	Diámetro interno	3"
Accesorios	Termopar tipo K	Largo	6 cm
Material	Acero inoxidable	Tensión	220 V
Cierre	Ceja	Potencia	500 W

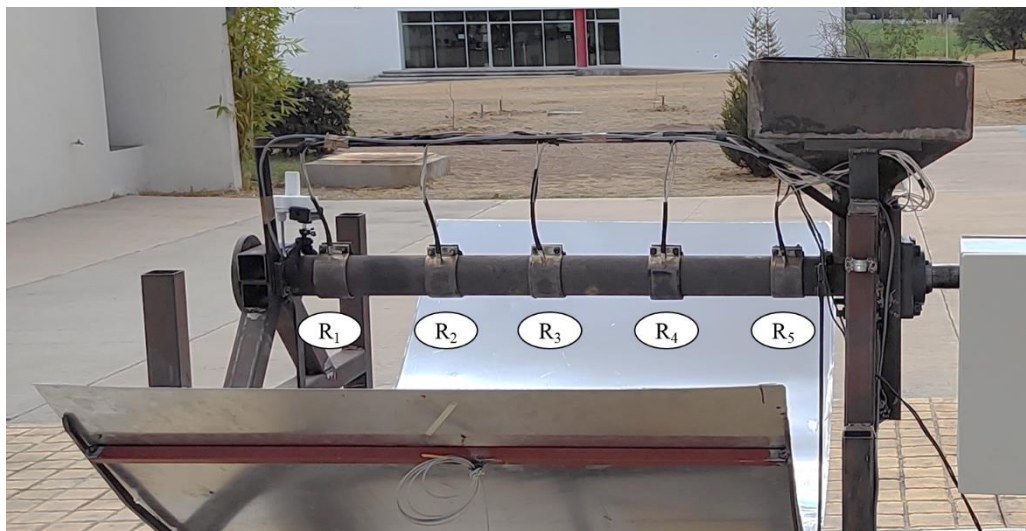


Figura 53. Ubicación de las resistencias eléctricas calentadoras (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 y R_5) sobre el barril.

4.7 VALIDACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

Mediante la puesta en operación de los sistemas de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada se logró la validación técnica de funcionamiento del prototipo. En particular, (1) se determinó el rango de control de la velocidad de rotación del husillo mediante la puesta en operación simultánea del sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena y del sistema de mando eléctrico; y principalmente, (2) se realizó una caracterización térmica mediante pruebas experimentales de calentamiento del barril de la extrusora bajo las siguientes metodologías: (i) empleando únicamente las resistencias eléctricas calentadoras, (ii) utilizando exclusivamente el CCP con seguimiento solar (radiación solar), (iii) usando solo el sistema híbrido con precalentamiento y finalmente (iv) empleando únicamente el sistema híbrido total. Las pruebas experimentales de calentamiento se realizaron en dos diferentes estaciones del año para comparar el impacto del nivel de radiación solar en el sistema. En las pruebas de calentamiento se midieron los tiempos en que al menos un punto del receptor alcanzó la temperatura deseada de 200 ± 15 °C.

4.7.1 Caracterización experimental de velocidad de giro del husillo

Empleando las ecuaciones reportadas por [86]–[88], se calculó la magnitud de la relación de transmisión del tren de engranajes, la cual se determinó en relación a la razón de velocidad de rotación (de los dos engranajes que entran en contacto) y la razón de engrane (considerando el número de dientes del engranaje conductor y del engranaje conducido). Con la ecuación (1) se calculó el tren de engranajes de la caja reductora del sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena del prototipo. Lo anterior, permitió definir la velocidad de salida del tren de engranaje, esto es, conocer a qué velocidad (expresada en rpm) se logró reducir la velocidad de giro del motor de potencia mediante un arreglo de engranes. Por otro lado, la ecuación (2) permitió calcular la relación de engranajes del sistema, es decir, calcular la relación de velocidad. Lo anterior, permitió conocer cuánto se reduce la velocidad de salida del sistema en relación a la velocidad de entrada total del tren de engranajes.

$$\frac{\omega_{sal}}{\omega_{ent}} = \frac{N_{ent}}{N_{sal}} \quad (1)$$

$$R_v = \frac{N_{sal}}{N_{ent}} \quad (2)$$

donde ω_{ent} es la velocidad del engrane piñón de entrada (engrane conductor), ω_{sal} es la velocidad del engrane de entrada (engrane conducido), N_{ent} es el número de dientes del engrane conductor, N_{sal} es el número de dientes del engrane conducido y R_v es la relación de engranajes.

En la Tabla 4, se muestran los valores resultantes del análisis del tren de engranaje. En la Figura 54, se muestran gráficamente dichos resultados correlacionados con la disposición espacial del orden de los engranes dentro de la caja reductora. En la Figura 55, se especifica el orden de los engranes del análisis en cuestión. En

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

resumen, la velocidad de giro del motor de potencia se logró reducir de 1740 rpm a 117 rpm con una relación de engranajes de $117/1740 = 1/14.8$, lo cual significa que el tren de engranaje va de $14.8 \approx 15$ veces más lento a la salida que a la entrada, por lo que efectivamente se disminuyó la velocidad. Los resultados anteriores fueron consistentes entre sí, ya que, al reducir la velocidad del engranaje del eje útil, se aumenta en par motor (momento de la fuerza) para lograr girar el husillo adecuadamente durante las pruebas de rotación en vacío o en extrusión.

En la literatura se recomienda una velocidad de giro del husillo de 40 a 150 rpm [89], [90]. Motivo por el cual, se integró al prototipo un variador de frecuencia para controlar la frecuencia del motor de potencia. Para lo anterior, se realizó la puesta en operación –simultáneamente– del sistema de transmisión de potencia por engranaje y cadena y del sistema de mando eléctrico a diferentes valores (Hz) de frecuencia. En la Figura 56, se muestran los valores de giro del husillo obtenidos. Como era de esperarse, al ir disminuyendo los Hz de corriente se va deteniendo el motor. Para medir el giro del husillo se empleó un Fototacómetro dual DT-2236 marca Lutron.

Tabla 4. Velocidades (rpm) de giro de las ruedas del tren de engranajes de la caja reductora.

Engrane	No. Dientes	Velocidad (rpm)	Observaciones
G1	25	1740	Eje motriz (velocidad de entrada)
G2	65	669	
G3	25	669	Rueda compuesta. Adopta la velocidad de G2 por estar en el mismo eje
G4	65	257	
G5	25	257	Rueda compuesta. Adopta la velocidad de G4 por estar en el mismo eje
G6	55	117	Eje útil (velocidad de salida)

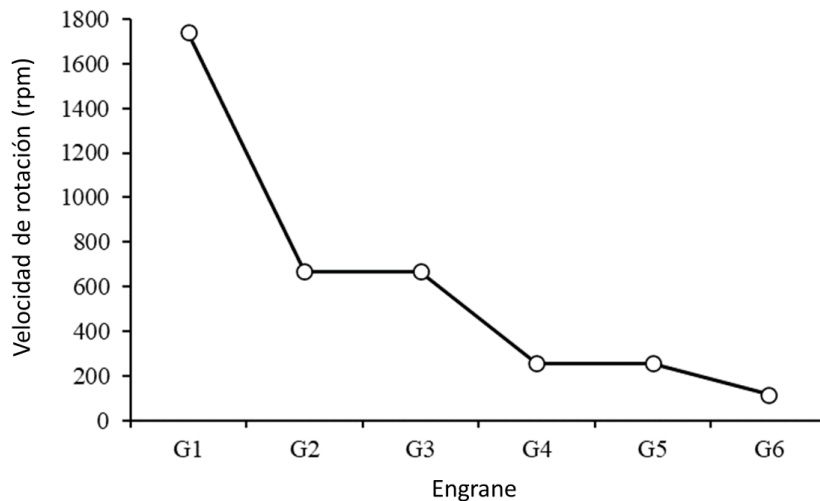


Figura 54. Grafica de velocidades (rpm) de giro de las ruedas del tren de engranaje de la caja reductora.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

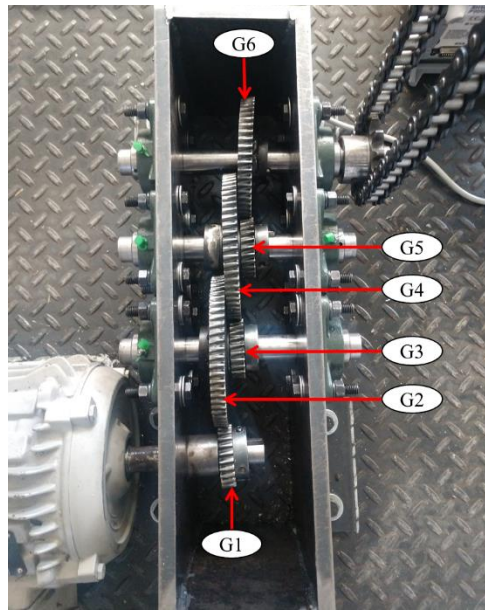


Figura 55. Tren de engranaje de la caja reductora.

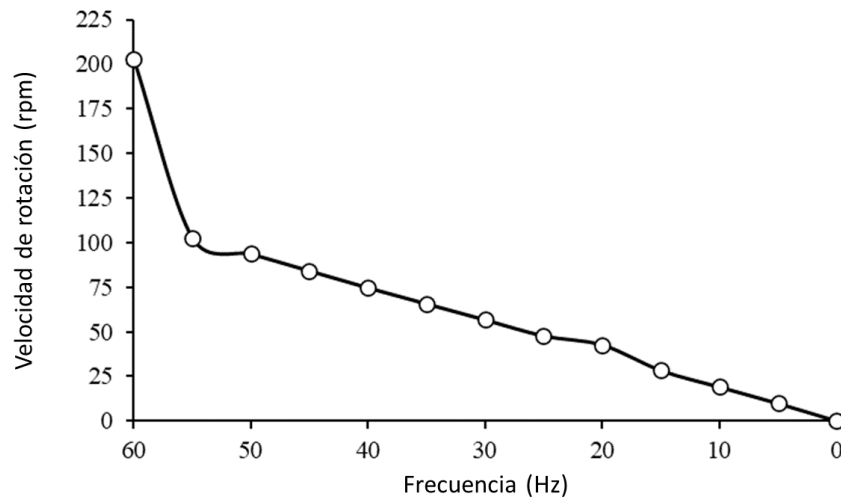


Figura 56. Grafica de velocidades (rpm) de giro del husillo según la frecuencia fijada en el variador.

4.7.2 Caracterización térmica experimental de calentamiento del receptor

Los ensayos de calentamiento del receptor por acción del calor proporcionado por (a) las resistencias eléctricas calentadoras, (b) por el CCP con seguimiento solar o (c) por el sistema de calentamiento híbrido (en sus dos modalidades), fueron realizados en diferentes temporalidades del año para comparar la injerencia de una mayor irradiación solar en las mediciones registradas. En específico, las temporalidades abarcaron principalmente las estaciones de primavera y otoño.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

En [81] se especifica con más detalle los resultados de la caracterización térmica experimental logrados. Por la relevancia de estos ensayos, en este documento se presentan los resultados íntegros del artículo referenciado. La experimentación se realizó con apoyo de una cámara termográfica marca Flir E5-XT y se midió la temperatura alcanzada por el barril (receptor) y los tiempos en alcanzar el estado estable de la temperatura, la cual se estableció en 200 ± 15 °C como referencia deseada para todos los experimentos. En cada experimento se consideraron los mismos puntos de monitoreo térmico (P1, P2, P3, P4) sobre el receptor, ver Figura 16. Adicionalmente, se registró el nivel de radiación solar (W/m^2) instantáneo, la velocidad del viento (km/h) y el consumo de energía eléctrica (kWh) de las resistencias eléctricas calentadoras. Los datos de irradiación solar se obtuvieron de un medidor Fluke FLK-IRR1-SOL. Para la velocidad del viento se empleó un anemómetro digital RZ GM816 y para el consumo de energía se utilizó un medidor de corriente alterna Morning Group PZEM-022. Cabe mencionar que la caracterización térmica del sistema se realizó sin la extrusión de material para no afectar los resultados y poder realizar una comparativa equitativa del rendimiento térmico entre los modelos experimentales definidos.

En la Tabla 5, se resumen los resultados más importantes obtenidos en la experimentación. Considerando la temperatura base de 200 ± 15 °C: (a) en el modo híbrido con precalentamiento, el receptor de la extrusora alcanzó la temperatura deseada de una manera más rápida y con menor consumo eléctrico que con el uso exclusivo de las resistencias eléctricas calentadoras, permitiendo un ahorro del 25.97 y del 73.68% para los días del 10/11/2022 y del 30/05/2023, respectivamente; (b) similarmente, en el modo híbrido total se observó un ahorro de energía del 68.42% para el día 31/05/2023, el cual fue similar al obtenido en la experimentación híbrida con calentamiento del día 30/05/2023 (día con un nivel de radiación similar), por lo que se pudo concluir que ambos modos híbridos producen un resultado semejante de ahorro energético. Es importante mencionar que los porcentajes de ahorro pueden variar por el nivel de la irradiación global horizontal (GHI), velocidad de viento y temperatura ambiente.

Tabla 5. Resumen comparativo de la experimentación [81].

Metodología	Fecha	Tiempo (min) para alcanzar las temperaturas °F			Consumo eléctrico (kWh) para alcanzar las temperaturas (°C)			Disminución del consume para alcanzar 200 °C
		185	200	215	185	200	215	
Resistencias	09/11/2022	70	77	≈120	2.30	2.55*	3.90	
Modo híbrido de precalentamiento	10/11/2022	41	57	81	1.35	1.89	2.63	25.97%
Resistencias	03/04/2023	80	95	≈129	2.65	3.15**	3.90	
Modo híbrido de precalentamiento	30/05/2023	18	25	49	0.60	0.83	1.48	73.68%
Modo híbrido de total	31/05/2023	27	30	43	0.89	0.99	1.30	68.42%

* Valor empleado como referencia y comparación, 10/11/2022.

** Valor usado como referencia para comparación con 30/05/2023 y 31/05/2023.

4.7.2.1 Calentamiento por resistencias eléctricas calentadoras

Para las pruebas experimentales de calentamiento por resistencias eléctricas, el CCP no fue empleado. Las pruebas se llevaron a cabo en los periodos del 25/10/2022 al 16/11/2022 y del 16/03/2023 al 12/04/2023. Las resistencias se acoplaron sobre el cuerpo del barril y se colocaron en funcionamiento. Para estas pruebas se estableció un tiempo máximo de 2 horas de funcionamiento de las resistencias en un horario de las 11:00 a las 13:00 horas (horario local). En las Figuras 57 y 58, se muestran los resultados experimentales del calentamiento típico obtenido mediante el uso exclusivo de las resistencias eléctricas en los días del 09/11/2022 y del 03/04/2023, respectivamente. En ambos días, observó un comportamiento similar de: (1) una velocidad del viento menor a 7 km/h; (2) la temperatura inicial del receptor fue de 19.4 y 28.5 °C (temperatura ambiente), respectivamente; (3) las resistencias eléctricas calentadoras, al momento de ser encendidas, comenzaron a calentar rápidamente el receptor hasta llegar a una estabilidad térmica dentro del rango de calentamiento deseado; (4) para los días presentados, los 185 °C fueron alcanzados entre los 70 y 80 minutos de operación, mientras que los 200 °C se lograron a los 77 y 95 minutos de encendido; (5) la diferencia de tiempos que se observó para alcanzar las temperaturas de 185 y 200 °C –entre los días presentados– se debió principalmente a la disminución natural de la eficiencia (vida útil) de las resistencias y a la desventaja observada en este tipo de sistemas de calentamiento; (6) durante el tiempo de la experimentación, en ningún caso se superó la temperatura de 215 °C, pero se induce que de seguir el calentamiento se hubiera rebasado este nivel. Del mismo modo, durante los días de experimentación se realizó la medición del consumo de corriente del arreglo de resistencias. En el día 09/11/2022, se registró un consumo energético aproximado de 2.3 y 2.55 kWh para alcanzar las temperaturas de 185 y 200 °C, respectivamente. Similarmente, en el día 03/04/2023, los valores de 185 y 200 °C, se alcanzaron con un consumo eléctrico de 2.65 y 3.15 kWh. Cabe mencionar que estos valores de consumo fueron obtenidos durante las 2 horas de funcionamiento de las resistencias. En la Tabla 6, se describen las condiciones climatológicas imperantes en los días de estudio.

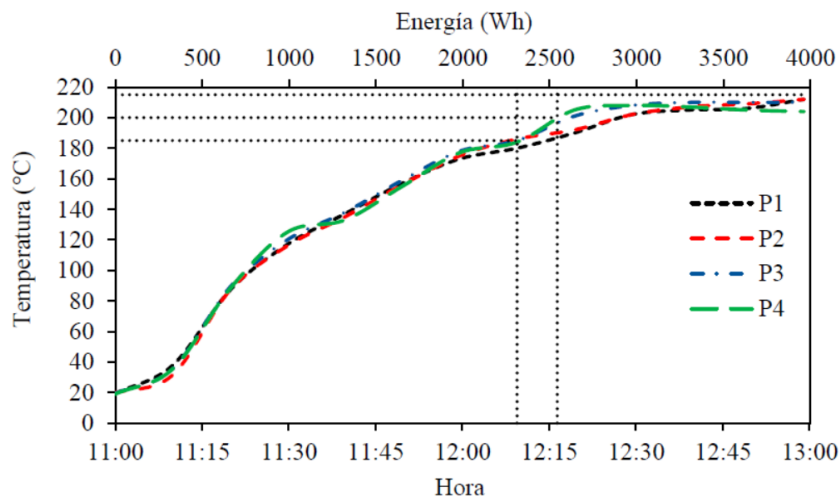


Figura 57. Temperaturas y consumo energético registrados el 09/11/2022 usando solo resistencias eléctricas.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

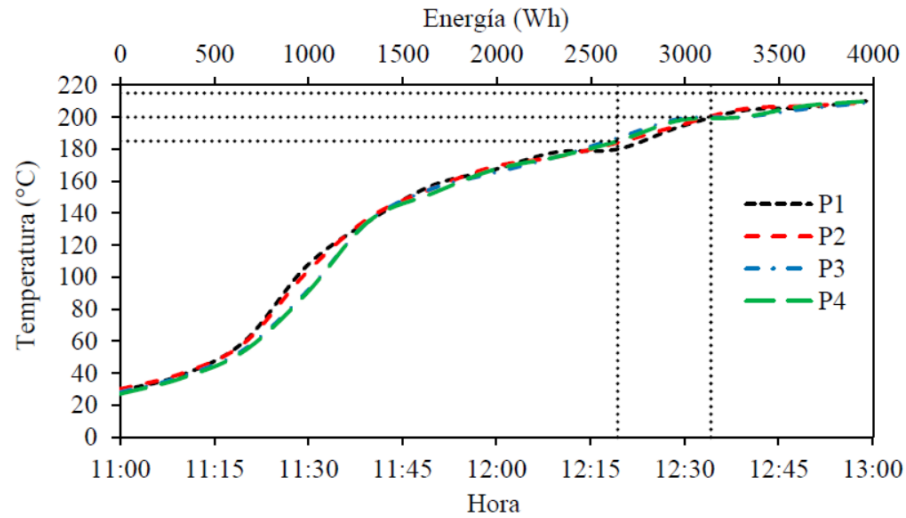


Figura 58. Temperaturas y consumo energético registrados el 03/04/2023 usando solo resistencias eléctricas.

Tabla 6. Condiciones climatológicas en los días de experimentación con resistencias eléctricas calentadoras.

PARÁMETRO	FECHA	
	09/11/2022	03/04/2023
Temperatura del aire (°C)	21.9	27.0
Radiación solar (W/m ²)	792.5	1012
Rapidez del viento (km/h)	3.8	2.8
Nubosidad (%)	0-20, cielo despejado	0-20, cielo despejado
Posición del Sol	44.74-50.28° altitud 147.94-190.16° azimuth	58.1-73.17° altitud 117.51-186.59° azimuth

4.7.2.2 Calentamiento por el CCP con seguimiento solar

Para esta metodología, el prototipo se colocó a la intemperie en un área soleada. Los ensayos se realizaron en los periodos del 30/09/2022 al 28/10/2022 y del 12/04/2023 al 15/05/2023 en un horario de las 11:00 a las 14:00 horas (horario local). En particular, se describen los resultados conseguidos en dos días de seguimiento solar donde hubo un día claro y con velocidades del viento menores a 7 km/h. En la Tabla 7, se describen las condiciones climatológicas imperantes en estos días de estudio. El calentamiento por el CCP con seguimiento solar permitió concentrar la radiación solar directa sobre el barril de la extrusora sin ningún aporte de calor por parte de las resistencias eléctricas calentadoras, esto es, que en ningún momento se encendieron las mismas.

En las Figuras 59 y 60, se pueden observar, respectivamente, las temperaturas alcanzadas por el receptor el día 27/10/2022 y el día 11/05/2023. En general, en ambos días se apreció un incremento de la temperatura del receptor conforme avanzó el tiempo de concentración solar. La temperatura máxima que se alcanzó en el punto P4 del receptor, el día 27/10/2022, fue de 96 °C, partiendo de una temperatura inicial promedio de 22 °C en el receptor. Sin embargo, la temperatura del punto P1 solo alcanzó una temperatura máxima de 56 °C debido a las pérdidas geométricas causadas por el final de colector, lo cual se analizará más adelante.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Adicionalmente, las bajas temperaturas alcanzadas en el receptor durante el día 27/10/2022 se atribuyeron a que, en la fecha en que se realizó la experimentación, la irradiación global horizontal (*GHI*) fue baja, pues en ningún momento se rebasó los 1000 W/m^2 . Por otro lado, gracias al alto nivel de *GHI* presentado el día 11/05/2023 (radiación mayor de 1000 W/m^2), se obtuvo un amplio gradiente de temperatura, iniciando en 40°C y llegando hasta un máximo de 159°C , ver Figura 60. Es importante mencionar que la temperatura inicial del receptor de este día no fue igual a la temperatura ambiente debido a que el receptor recibió radiación solar antes de iniciar con la prueba, aumentando así su temperatura.

Es de resaltar, que en ambos días de experimentación no se alcanzó la temperatura deseada de $200 \pm 15^\circ\text{C}$ con el solo uso de la radiación solar concentrada por el CCP, por lo que se tendría que completar el calor de trabajo necesario con el auxilio complementario de las resistencias eléctricas calentadoras en un sistema de calentamiento híbrido.

Tabla 7. Condiciones climatológicas en los días de experimentación con CCP y seguimiento solar.

PARÁMETRO	FECHA	
	27/10/2022	11/05/2023
Temperatura del aire ($^\circ\text{C}$)	21.9	27.0
Radiación solar (W/m^2)	792.5	1012
Rapidez del viento (km/h)	3.8	2.8
Nubosidad (%)	0-20, cielo despejado	0-20, cielo despejado
Posición del Sol	44.74-50.28° altitud 147.94-190.16° azimuth	58.1-73.17° altitud 117.51-186.59° azimuth

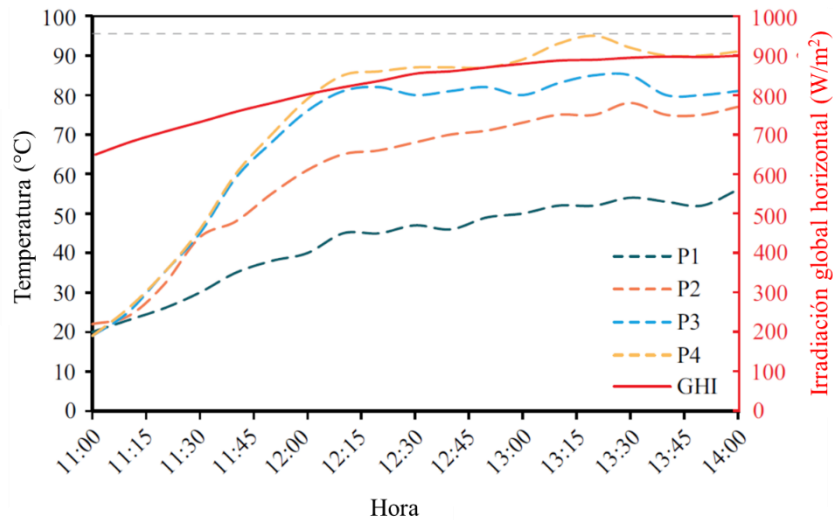


Figura 59. Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 27/10/2022 utilizando solo con el CCP con seguimiento solar [81].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

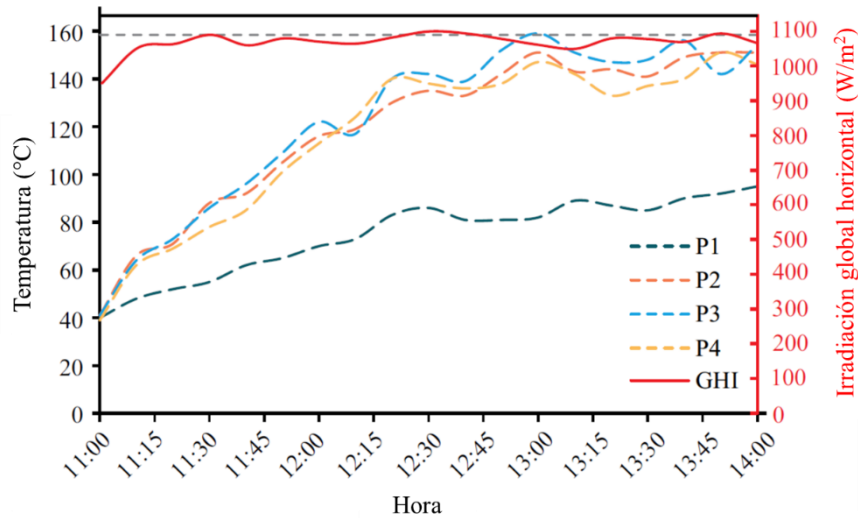


Figura 60. Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 11/05/2023 utilizando solo el CCP con seguimiento solar [81].

4.7.2.3 Calentamiento por el sistema híbrido de precalentamiento

En esta modalidad, el CCP se empleó como un sistema de precalentamiento inicial y, después de un lapso de tiempo, las resistencias eléctricas calentadoras se prendieron para completar la temperatura de extrusión deseada. Las pruebas de calentamiento por el sistema híbrido de precalentamiento se realizaron a la intemperie en un área soleada y se llevaron a cabo en los periodos del 25/10/2022 al 16/11/2022 y del 15/05/2023 al 31/05/2023 en un horario de las 11:00 a las 16:00 horas (horario local). En específico, se reportan los resultados obtenidos en funcionamiento híbrido, durante días claros y con velocidades del viento menores a 7 km/h.

Primeramente, se colocó en funcionamiento exclusivamente el CCP con seguimiento solar durante un tiempo de 180 min (de las 11:00 a las 14:00 horario local); concluido este tiempo, se activaron las resistencias eléctricas calentadoras durante 120 minutos (de las 14:00 a las 16:00 horario local).

La Figura 61, presenta las temperaturas alcanzadas en el receptor (barril) el día 10/11/2022, estación del año en el que la radiación solar no es alta ($GHI < 1000 \text{ W/m}^2$ a lo largo del día). En este caso, el precalentamiento alcanzó una temperatura de hasta 79 °C en el punto P4 después de los 180 min (zona naranja de la Figura 61); después, las resistencias eléctricas se accionaron y el sistema híbrido tardó aproximadamente 41 min en alcanzar los 185 °C y 57 min para lograr una temperatura de 200 °C, esto es, 41.4 y 25.97% menos tiempo del requerido para el calentamiento exclusivo con resistencias eléctricas. Es de resaltar que, inmediatamente cuando se entra en el modo híbrido (zona verde de la Figura 61), existe un escalón en el incremento de temperatura en todos los puntos del receptor. Asimismo, es importante notar que en aproximadamente 81 min se alcanzó los 215 °C, valor no logrado en 120 min de calentamiento con las resistencias eléctricas (ver sección 4.7.2.2).

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

Similarmente, la Figura 62, muestra el comportamiento de las temperaturas en el receptor del día 30/05/2023, siendo un día particularmente con un alto nivel de *GHI*. En este día se alcanzó una temperatura de 147 °C durante el precalentamiento (utilizando solo con el CCP, ver zona naranja de la Figura 62) y, tan solo 18 min después de accionar las resistencias eléctricas, se registró una temperatura máxima en un punto del receptor de 185 °C y en tan solo 25 min se llegó a los 200 °C.

Lo anterior significó una reducción de 77.50 y 73.68% del tiempo empleado por las resistencias eléctricas calentadoras, respectivamente. Finalmente, el receptor alcanzó un máximo de 215 °C en tan solo 49 min. De la misma manera que en el caso de calentamiento exclusivo por el CCP, el punto P1 fue afectado por las pérdidas por final del colector en los días de analizados; sin embargo, cuando el sistema funcionó en su modo híbrido, las resistencias compensaron este problema, logrando incrementar la temperatura de dicho punto por encima de los 185 °C.

Los resultados experimentales mostraron una importante reducción del tiempo de operación de las resistencias eléctricas para alcanzar las temperaturas deseadas y, por consiguiente, se tuvo una disminución de los costos del gasto energético consumido, lo que indicó que la integración de energía solar dentro de un proceso de extrusión resultó ser viable.

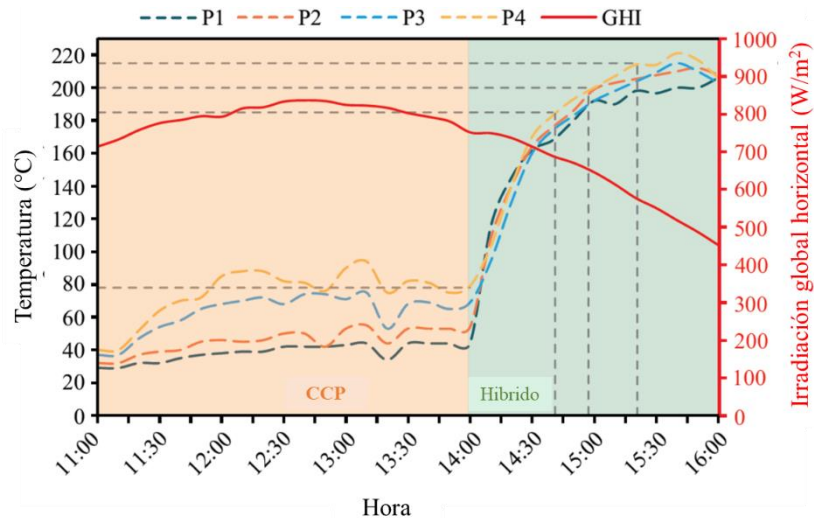


Figura 61. Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 10/11/2022 utilizando un modo híbrido de precalentamiento [81].

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

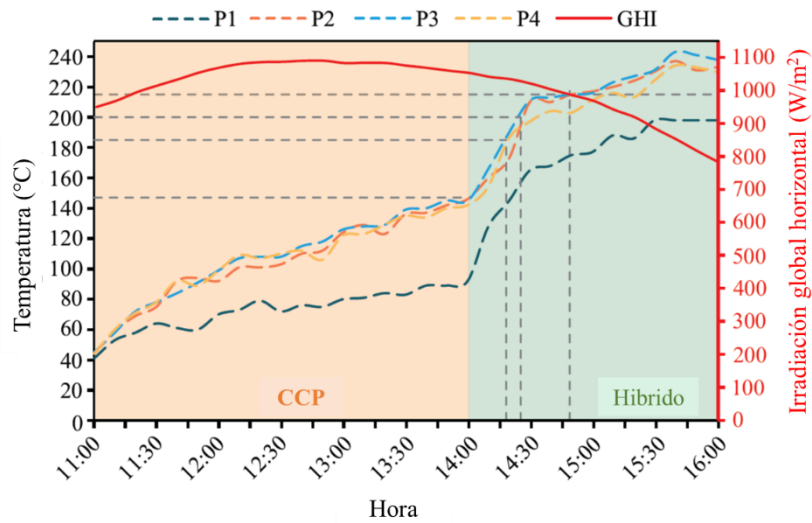


Figura 62. Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 30/05/2023 utilizando un modo híbrido de precalentamiento [81].

4.7.2.4 Calentamiento por el sistema híbrido total

En el sistema híbrido total se accionó simultáneamente las resistencias eléctricas calentadoras y el CCP con seguimiento solar. En la Figura 63, se muestran los resultados del día 31/05/2023 bajo este modo de calentamiento. Partiendo de una temperatura inicial de 39 °C (receptor expuesto a la intemperie previo a las pruebas), se registraron tiempos de 27, 30 y 43 min para alcanzar los 185, 200 y 215 °C, respectivamente. Comparando estos resultados contra los obtenidos por el uso exclusivo de resistencias eléctricas (ver Figura 58), se logró una disminución del 66.25 y 68.42% en los tiempos de operación de las resistencias para alcanzar las temperaturas de 185 y 200 °C, respectivamente. Esta metodología, resultó ser la mejor opción de calentamiento. A la par de que se logró aumentar la temperatura en el receptor, también se alcanzó a disminuir el tiempo de encendido de las resistencias eléctricas calentadoras. Mediante este método, se registró temperaturas mayores a los 260 °C en el receptor, siendo algo no logrado con los otros modos de calentamiento.

4.7.2.5 Efecto de la eficiencia del calentamiento por el CCP con seguimiento solar por pérdidas geométricas del colector

Los CCP están típicamente expuestos a las pérdidas geométricas por final de colector [91]–[93]. Las Figuras 64 y 65, muestran cómo estas pérdidas se hicieron presentes en la experimentación en los meses de octubre de 2022 y de mayo de 2023, respectivamente. Las pérdidas geométricas por final de colector se manifestaron por la presencia de un sombreado muy notorio en las secciones longitudinales frontales del receptor, lo que se traduce en que dichas secciones no recibieron la radiación solar de manera constante a lo largo del día y por ende afectando considerablemente la temperatura en dichas secciones. Las pérdidas geométricas no fueron cuantificadas en este estudio. No obstante, en promedio, las pérdidas geométricas propiciaron que los puntos del receptor sujetos a esta

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

pérdida no alcancen ni los 100 °C (ver Figuras 59 y 60 para el punto P1). El grado de pérdidas geométricas generalmente varió de acuerdo a la fecha de la experimentación y de la latitud del lugar. Regularmente, el porcentaje de pérdidas suele disminuirse incrementando el largo de colector.

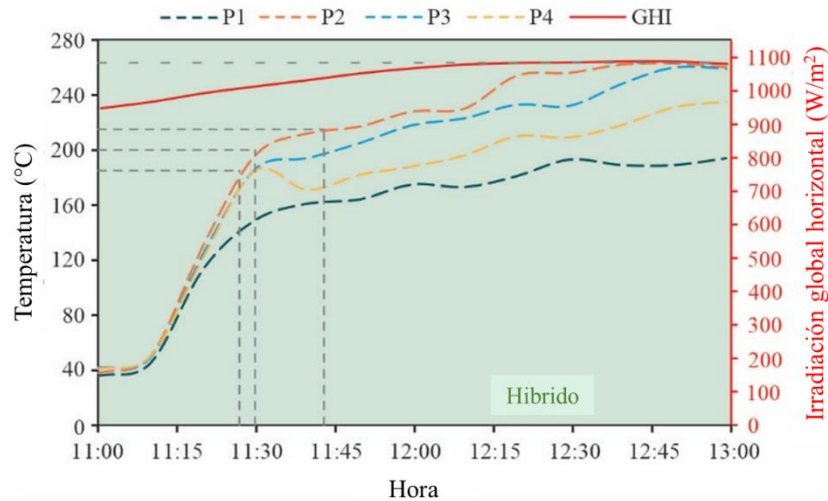


Figura 63. Temperaturas alcanzadas en el receptor y su consumo energético en el día 31/05/2023 utilizando un modo híbrido total [81].

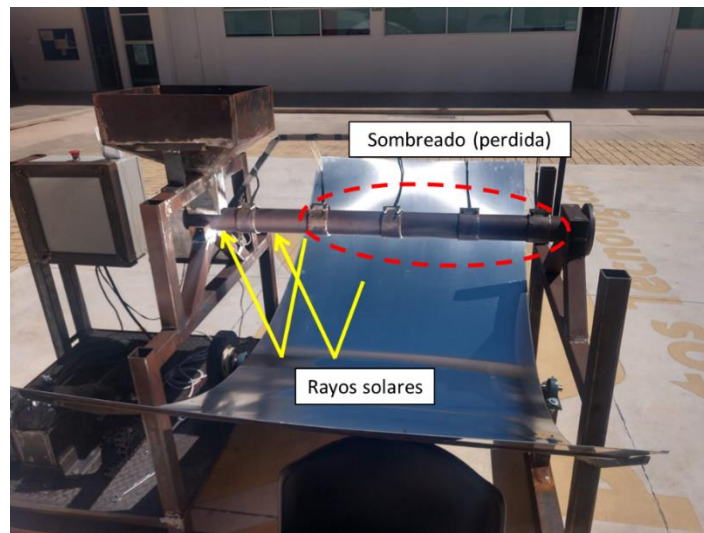


Figura 64. Pérdidas geométricas del CCP durante el mes de octubre de 2022.

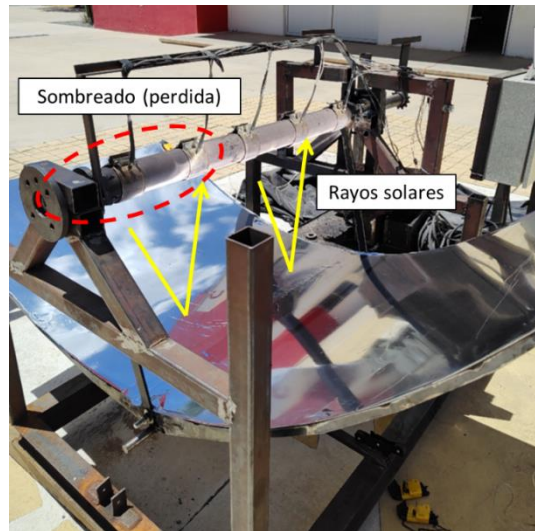


Figura 65. Perdas geométricas del CCP durante el mes de mayo de 2023.

4.8 ACTIVIDADES DE TESIS COLATERALES

A través del desarrollo de la presente investigación, se exploraron diversas propuestas de solución para dar cumplimiento a los objetivos planteados. En esta sección únicamente se hace una breve revisión y mención de los trabajos alternos que fueron inicialmente planteados como una medida de respuesta al objetivo principal del proyecto. Al final, estas propuestas de solución únicamente fueron presentadas como pruebas de concepto y no fueron integradas en el prototipo final. No obstante, estos trabajos permitieron establecer demás proyectos de investigación como trabajo a futuro.

4.8.1 Base de datos térmicos y de imágenes termográficas

El monitoreo y la validación de la eficiencia de cada sistema de calentamiento estudiado fue realizado mediante la toma de lecturas de las temperaturas alcanzadas en la superficie del barril (receptor). Para lo anterior, se utilizó una cámara termográfica de infrarrojos marca Flir E5-XT. Con este procedimiento se logró construir una base de datos térmicos que permitió obtener resultados concluyentes de la viabilidad de utilizar la energía solar como un medio de calentamiento, ver Figuras de la 57 a la 63. La base de datos térmicos puede ser empleada para su modelación mediante técnicas de inteligencia artificial y predecir el comportamiento de los sistemas híbridos de extrusión.

Así mismo, se logró también conformar una base de datos de imágenes termográficas que cotejan las temperaturas alcanzadas por la acción de los sistemas de calentamiento propuestos. Esta base de datos puede ser empleada para su caracterización digital o análisis de procesamiento de imágenes térmicas para determinar la transferencia de calor del sistema. En las Figuras 66, 67 y 68, se presentan algunas imágenes termográficas resultantes de los ensayos del presente estudio.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

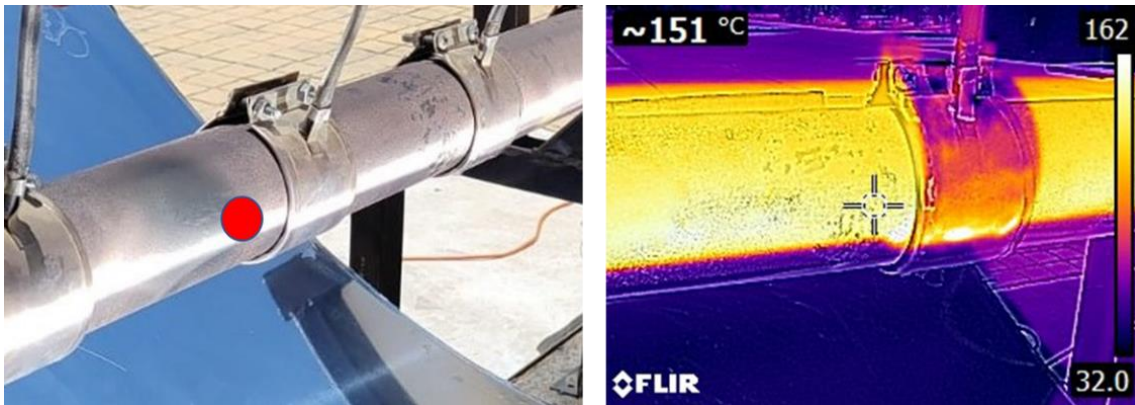


Figura 66. Lectura (punto rojo) de 151 °C de temperatura alcanzada en la superficie del barril (P2) por la sola acción del CCP con seguimiento solar. Prueba realizada en el mes de mayo de 2023.

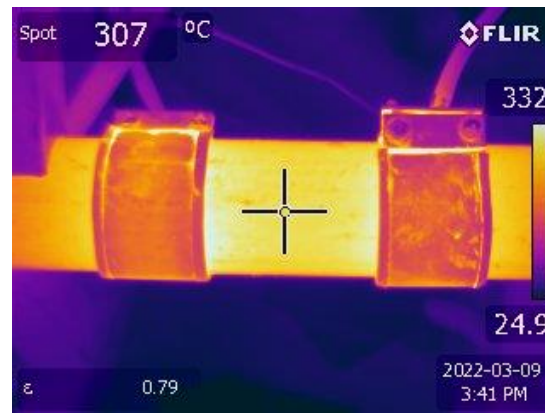


Figura 67. Lectura de 307 °C de temperatura alcanzada en la superficie del barril (P2) por la sola acción de las resistencias electricas calentadoras. Prueba realizada en el mes de marzo de 2022.



Figura 68. Lectura >280 °C de temperatura alcanzada en la superficie del barril (P4) con la acción del sistema de calentamiento hibrido. Prueba realizada en el mes de mayo de 2023.

4.8.2 Diseño de sistemas mecatrónicos de monitoreo y control

Se construyó un sistema mecatrónico para monitorear los valores de temperatura de los termopares tipo k de las resistencias eléctricas calentadoras. Para la fabricación se utilizó 1 microcontrolador Arduino® Mega 2560 comunicada a un display LCD y 5 tarjetas de control MAX6675 (cada una para un termopar tipo k) a través de un protoboard 830p y varios cables jumper-dupont. Las lecturas visualizadas en el LCD no fueron registradas y tampoco se contempló un sistema on-off para las resistencias eléctricas calentadoras. El algoritmo de programación fue desarrollado en lazo abierto (no presentado) y empleando el entorno propio de la plataforma Arduino® y utilizando librerías ya disponibles en la red. En la Figura 69, se observa el sistema mecatrónico propuesto. También se construyó una primera versión del sistema de seguimiento solar del colector con el que se logró orientar los movimientos de giro (en sentido horario o antihorario) del CCP según las señales emitidas por las fotorresistencias LDR. Los componentes del sistema mecatrónico fueron: 1 tarjeta Raspberry Pi® 3 modelo B; 1 monitor pantalla táctil 7"; 1 driver motor a pasos TB6560 DC 3.5A; 1 fuente conmutada 12V 30A; 1 convertidor analógico MCP3008; 2 fotorresistencias LDR GL5516, 5-10 Kohm con luz, 0.5 Mohm en oscuridad, 5V de alimentación (LDR 1, derecha; LDR 2, izquierda); 1 protoboard 170p y cables jumper dupont varios, ver Figura 70.

Ambos sistemas mecatrónicos fueron actualizados y evolucionados para su integración final al prototipo de estudio. Sin embargo, en su primera versión pueden ser empleados para otros fines de control.

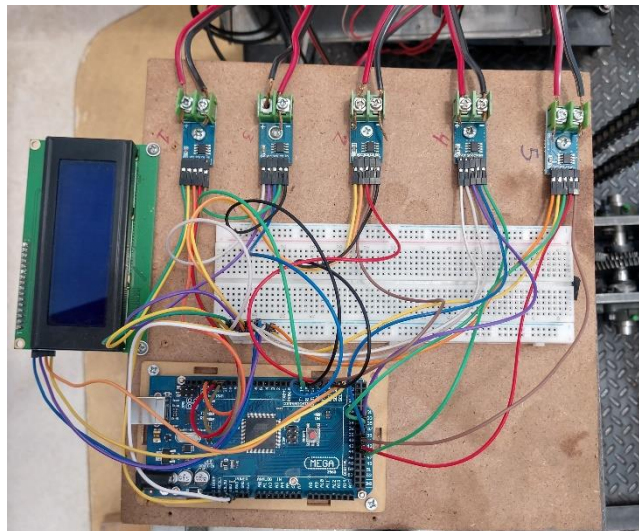


Figura 69. Sistema mecatrónico de monitoreo de temperaturas de las resistencias eléctricas.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

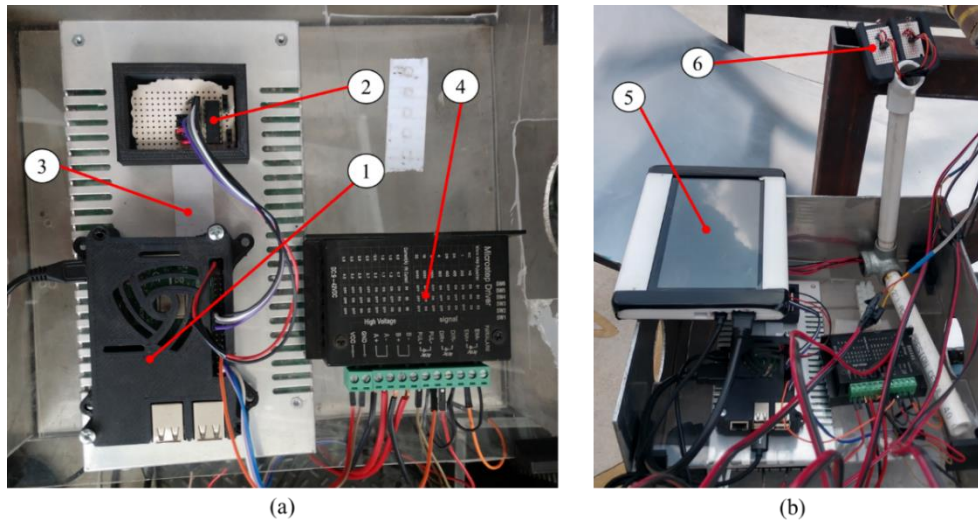


Figura 70. Sistema mecatrónico preliminar de seguimiento solar. 1a) Raspberry Pi® con carcasa, 2a) MCP3008, 3a) fuente conmutada, 4a) driver TB6560, 5b) Pantalla, 6b) fotorresistencias.

4.8.3 Diseño del sistema de control (algoritmo) de seguimiento solar

El algoritmo se diseñó como un sistema de control de lazo cerrado debido a que el motor NEMA giró hacia un sentido según la carga de mayor intensidad de luz que recibe una u otra LDR, esto es, que la respuesta de control de salida (rotación del motor) estuvo regulada por el ajuste constante de las respuestas de entrada (señal de las fotorresistencias), ver Figura 71. El algoritmo logró el objetivo de que los rayos solares se concentren sobre el barril en ciertos periodos de tiempo, sin embargo, está sujeto a optimización (trabajo a futuro).

Una primera versión del sistema de control (algoritmo) de seguimiento solar fue desarrollado en lenguaje de programación Python 3. También se desarrolló una interfaz elaborada en Python mediante la librería de gráficos Tkinter para controlar la operación del sistema de seguimiento solar propuesto a través de una serie de botones y funciones. En la Figura 72, se aprecia la primera versión de la interfaz de estudio puesta en operación.

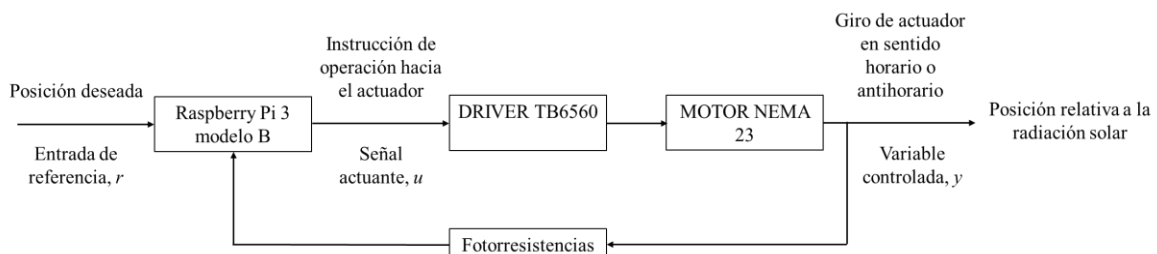


Figura 71. Sistema de control en lazo cerrado del sistema mecatrónico de seguimiento solar en su primera versión.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

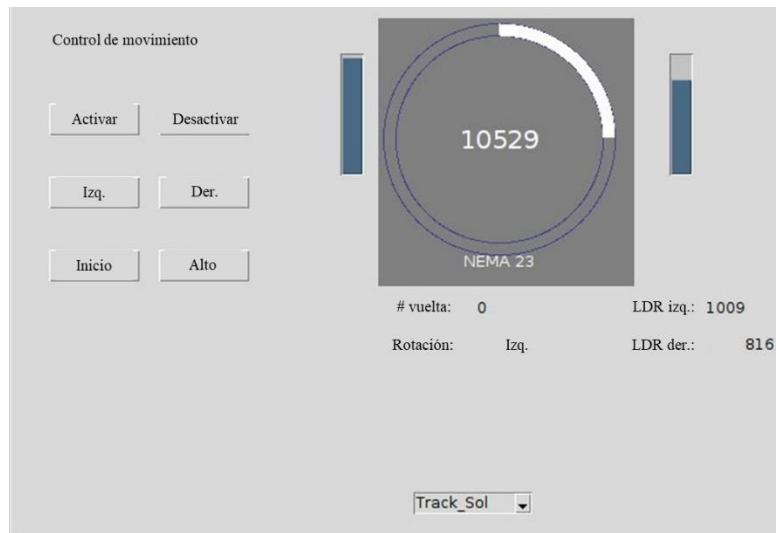


Figura 72. Interfaz de condición con rotación en sentido anti horario (izquierda): Función automática; LDR izquierda de 1009; LDR derecha de 816; la rotación del motor es hacia la izquierda hasta detenerse y mantener la radiación solar concentrada en el barril.

4.8.4 Unidad de giro horizontal

Como sistema mecánico de seguimiento solar, se diseñó y construyó una unidad de giro horizontal para la rotación del CCP. El CCP cuenta con un eje principal (eje x) de 1 grado de libertad que se comunicó con la unidad de giro horizontal por medio de un disco de giro perforado. La primera versión del sistema mecatrónico de control logró orientar los movimientos de rotación (en sentido horario o antihorario) de la unidad de giro. La unidad de giro horizontal se fabricó mediante impresión 3D con material ABS y cuenta con un mecanismo de giro de tipo engranaje helicoidal. La unidad de giro se diseñó bajo una arquitectura de transmisión reductora circular de giro y se integró por una carcasa que alojó una corona de giro con balero integrado y un tornillo sin fin. La unidad se conectó a un motor a pasos NEMA 23 OK57H18112A 4.2A 3Nm por medio de coples y una varilla roscada 8mm. La unidad tiene un adaptador de sujeción que permitió conectarla con el disco de giro perforado del CCP. En la Figura 73, se presenta la unidad de giro horizontal comunicada con el CCP.

4.8.5 CCP con estructura de soporte externa

Se diseñó y construyó un CCP con una estructura de soporte externa para realizar pruebas de funcionamiento con la unidad de giro horizontal, así como también explorar la alternativa de utilizar un sistema de concentración solar externo para alcanzar las temperaturas de extrusión en el barril. Ambos dispositivos pueden ser empleados para trabajos futuros. En la Figura 74, se muestra tanto el CCP montado en la estructura de soporte externa manufacturado como la unidad de giro horizontal comunicada con el colector.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
 Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

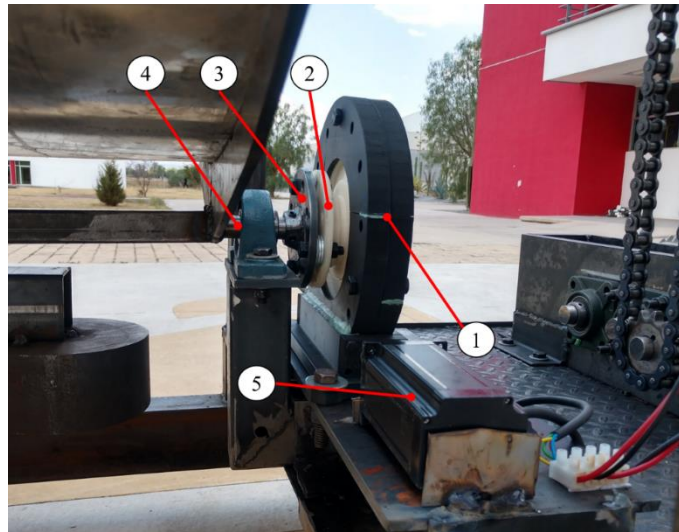
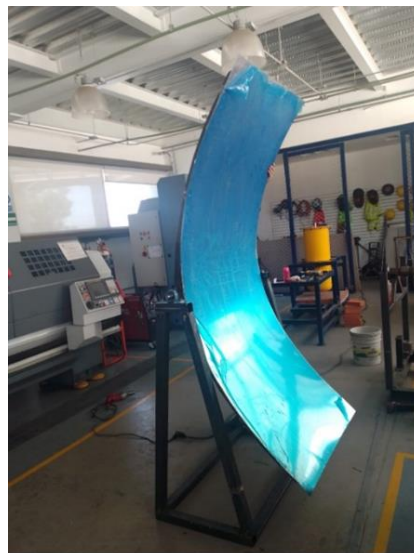


Figura 73. Unidad de giro horizontal acoplada al eje de giro del CCP. 1) Carcasa. 2) adaptador de sujeción de la corona de giro. 3) disco de giro perforado. 4) eje de giro de parábola. 5) motor NEMA.



(a)



(b)

Figura 74. Colector externo. (a) CCP con estructura de soporte externa, (b) Unidad de giro comunicada con el CCP con estructura de soporte externa.

V. CONCLUSIONES

La metodología para el diseño y construcción de una máquina extrusora horizontal de tornillo simple con energía solar integrada a nivel prototipado y bajo diseño propio resultó ser funcional.

Los diseños y la manufactura de los diversos sistemas de operación del prototipo permitieron: (1) instalar y fijar los distintos sistemas de operación a la estructura de soporte del equipo, (2) automatizar los sistemas de operación mediante interfaces o controles on-off con elementos de protección eléctrica, (3) controlar la velocidad de giro del husillo dentro de un rango de control de 0 a 200 rpm, (4) alimentar de energía eléctrica a 220V a los diversos elementos y componentes eléctricos de la máquina extrusora, (5) reducir la velocidad de rotación del motor de potencia de 1740 rpm a 117 rpm coadyuvando al control de giro del husillo, (6) contar con un sistema de extrusión en donde el husillo embonó perfectamente en el barril y contó con una cuerda en alabes, (7) tener un sistema de calentamiento híbrido y principalmente (8) integrar la energía solar concentrada dentro de un proceso convencional de extrusión.

La geometría definida del colector solar de canal parabólico permitió alcanzar una concentración solar promedio de 3.85x, una concentración solar máxima en el receptor de hasta 10030 W/m², tener una tolerancia de seguimiento solar de $\pm 4.2^\circ$ y una eficiencia óptica por encima del 98%. El sistema de seguimiento solar desarrollado a base de una tarjeta Raspberry Pi[®] con dos fotorresistores dependientes de la luz logró seguir la posición aparente del Sol durante el día y determinar de manera automática el sentido de giro en un eje del colector solar de canal parabólico (pudiendo ser en sentido horario hacia el oeste o en sentido antihorario hacia el este). El algoritmo de control de seguimiento solar fue diseñado como un sistema de control de lazo cerrado con histéresis de seguimiento y logró el objetivo de que los rayos solares se concentren sobre el barril durante el día e incrementar su gradiente de temperatura.

La caracterización térmica experimental de calentamiento del barril (a) por únicamente resistencias eléctricas calentadoras, (b) por el CCP con seguimiento solar y (c) por el sistema de calentamiento híbrido (en sus dos modalidades) fue determinada considerando alcanzar en al menos un punto del receptor una temperatura deseada de $200 \pm 15^\circ\text{C}$. El calentamiento empleando únicamente las resistencias eléctricas calentadoras permitió llegar a la temperatura de 200°C en tiempos de encendido de las resistencias entre 77 y 95 minutos. Para el caso del uso exclusivo de calentamiento con el CCP con seguimiento solar, se alcanzaron temperaturas máximas de hasta 159°C . En el modo híbrido con precalentamiento se alcanzaron los 200°C en tiempos más reducidos entre un 25.97 y 73.68% en comparación con el uso exclusivo de las resistencias eléctricas para llegar a la temperatura de referencia. Lo anterior, según el nivel de *GHI* del día de ensayo. Adicionalmente, en esta modalidad híbrida se alcanzó un máximo de temperatura de 243°C en un lapso de dos horas a partir del encendido de las resistencias eléctricas calentadoras. Por otro lado, en el calentamiento híbrido total se redujo en un 68.42% el tiempo necesario para alcanzar los 200°C con respecto al requerido por las resistencias eléctricas calentadoras. Con esta última modalidad, se alcanzó una

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

temperatura máxima aproximada de 260 °C en el receptor después de 2 horas de funcionamiento, siendo la temperatura más alta registrada en todos los modos de calentamiento.

La metodología de calentamiento por sistema híbrido (en cualquier modalidad) excedió drásticamente la temperatura objetivo por lo que sería posible apagar instantáneamente las resistencias eléctricas calentadoras en el proceso de extrusión permitiendo un ahorro energético. Lo anterior podrá ser validado cuando pruebas de extrusión sean llevadas a cabo.

En el trabajo a futuro, se deberán llevar a cabo pruebas de extrusión de plásticos para optimizar la operatividad de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada.

Adicionalmente, el presente trabajo logró ser sometido a patentamiento (ver Anexo 1) y ser publicado en una revista científica de renombre (ver Anexo 2). Como parte de la formación de recursos humanos, el proyecto – en diversas etapas de su desarrollo– permitió la participación de estudiantes de pregrado bajo la modalidad de prácticas profesionales o de Tesis (ver Anexo 3). Así mismo, dentro del rublo de acceso universal al conocimiento, los resultados del presente estudio se lograron presentar en diversos congresos de divulgación o difusión del conocimiento (ver Anexo 4).

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Adisa, A., Olatunji, O., and Brando, K. (2020). Design of Extrusion Machine for Offshore Corrosion-Control Composite Wrap Material Manufacture. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Doi: 10.2118/203729-MS
- [2] Soury, E., Behraves, A. H., Nasrabadi, H. G., and A. Zolfaghari. (2009). Design and manufacture of an extrusion die for wood-plastic composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28 (12), 1433-1439.
- [3] Herianto, Atsani, S. I., and Mastriswadi, H. (2020). Recycled polypropylene filament for 3D printer: extrusion process parameter optimization. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 722, 012022. Doi: 10.1088/1757-899X/722/1/012022
- [4] Sagar, K., Sooraj, R., and Vinod-Kumar, M. V. (2021). Design and fabrication of extrusion machine for recycling plastics. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 1065, 012014. Doi: 10.1088/1757-899X/1065/1/012014
- [5] Koltzenburg, S., Maskos, M., and O. Nuyken. (2017). *The basics of plastics processing*. In: *Polymer Chemistry*. Springer.
- [6] GreenPeace. (2020). *Datos sobre la producción de plásticos*. <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>
- [7] Semarnat. (2013). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. (ed. 2012), Semarnat, México.
- [8] ECOCE, A. C. (2019). *Cifras y estadísticas*, México: ECOCE, A. C. <https://www.ecoce.mx/cifras-y-estadisticas>
- [9] Beltrán-Rico, M., and Marcilla-Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros: procesado y propiedades*. (ed. 1-2012). Publicaciones Universidad de Alicante.
- [10] García-León, R. A., Bohorquez-Niño, A., and Barbosa-Paredes, J. F. (2019). Design of an extrusion machine for the manufacture of plastics tubes. *Journal of Physics: Conf. Series*, 1257, 012006. Doi: 10.1088/1742-6596/1257/1/012006
- [11] Njihia, S., Ndeda, R., Muumbo, E. A., and Ogur, O. (2022, march). Design and construction of a PET extrusion machine for production of insulation material. In *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*, 168-175.
- [12] Fang, Q., and Hanna, M. (2010). Extrusion systems: components. *Encyclopedia of Agricultural, food, and biological engineering*. (2nd. ed.). Ed. Heldman, D. R. & Moraru, C. I., 465-469. Doi: 10.1081/E-EAFE2-120046039

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

- [13] Brito, H., Flores, C., and Salazar-Llangari, K. G. (2018, october). Diseño y construcción de un extrusor tipo tornillo para la obtención de pellets plástico a partir de botellas recicladas. *Conf. paper: XXXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- [14] Budiyanoro, C., Rochardjo, H. S. B., and Nugroho, G. (2021). Design, manufacture, and performance testing of extrusion–pultusion machine for fiber-reinforced thermoplastic pellet production. *Machines*, 9, 42. Doi: <https://doi.org/10.3390/machines9020042>
- [15] Pitayachaval, P., and Watcharamaisakul, P. (2019). A review of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 703, 012012. Doi: 10.1088/1757-899X/703/1/012012
- [16] Adekola, K. A. (2016). Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*, 6(3), 149-168. Doi: 10.17265/2159-5828/2016.03.005
- [17] GESTER. (s.f.). *Extrusoras de un husillo*. España: GESTER Gestión de Termoplásticos S. L. <https://gester.es/un-husillo/>
- [18] Schut, J. (2009). New Machinery for Extrusion & Compounding. *NPE 2009 wrap up: Plastics Technology*, 55 (8), 26-31. <https://www.ptonline.com/articles/npe-2009-wrap-up-new-machinery-for-extrusion-and-compounding>
- [19] Spencer, A. W. (1964). *Plastic extrusion, apparatus and control*. Patent EE. UU. No. 3148231. Rochester, NY: United States Patent Office.
- [20] Xingxing, X. (2020). *A film extruder screw*. Patent CHINA No. CN209987363U. Beijing: China National Intellectual Property Administration.
- [21] Samra-Kouhen, N. (1995). Patente No. 179567. México, D.F. Instituto Mexicano de la propiedad Industrial.
- [22] Rogowsky, Z. M. (1947). Mechanical principles of the screw extrusion machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 156 (1), 56-65. Doi: 10.1243/PIME_PROC_1947_156_014_02
- [23] Kostic, M. M., and Reifschneider, L. G. (2006). Design of extrusion dies. *Encyclopedia of chemical processing*, 633-649. Doi: 10.1081/E-ECHP-120039324
- [24] Sinha, M. K., Deb, S., and Dixit, U. S. (2009). Design of a multi-hole extrusion process. *Materials and design*, 30, 330-334. Doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.062
- [25] Cheng, X., Zhang, G., Zhou, G., and Cui, Z. (2011). The design of screw extrusion mechanism based on melted extrusion modeling. *Applied Mechanics and Materials*, 44-47, 1455-1459. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.44-47.1455
- [26] Acuña-Fonseca, G. H., and Salamanca-Vanegas, M. E. (2016). *Diseño y construcción de una máquina extrusora para la fabricación de filamentos termoplásticos para impresora 3D* [Tesis de Licenciatura, Universidad Santo Tomas Tunja]. Repositorio institucional de la Universidad Santo Tomas. <http://hdl.handle.net/11634/30834>

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

- [27] Ortiz-Abata, C. F. (2018). *Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Dspace. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14935>
- [28] Shingón-Collahuazo, O. A., and Uvillus-Tipan, G. J. (2019). *Construcción de una máquina extrusora de plásticos* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio CINVESTAV. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5537>
- [29] Chávez-Martínez, J. E. (2018). *Diseño de extrusora de filamento para impresora 3D fabricado a partir de polipropileno reciclado* [Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca]. http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/13324.pdf
- [30] Cifuentes-C., R. (2011). *Diseño de una máquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente* [Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle]. Biblioteca digital de la Universidad del Valle. <https://hdl.handle.net/10893/4727>
- [31] Vicente-Pérez, J. M., and López-Pérez, J. P. (2006). *Diseño de una máquina para la fabricación de productos de gran volumen en polipropileno reciclado* [Tesis de Licenciatura, Universidad Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico]. Repositorio de la Universidad EAFIT. <http://hdl.handle.net/10784/4497>
- [32] INTI-OLADE. (2016). *Cambia la energía, Cambia el clima: cambio climático y su impacto en el sector energético*. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0357.pdf>
- [33] Heres del Valle, D. R. (2015). *Estudios del cambio climático en América Latina: el cambio climático y la energía en América Latina*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/2d8ac767-ec26-484b-b7ac-837f2874aae5/content>
- [34] Leyva-Ramos, J., and Martínez-Cruz, M. (2015). Una alternativa limpia para la generación de energía eléctrica. *Revista Ciencia*, 68-75.
- [35] Islas-Samperio, J., and Martínez-Jiménez, A. (2010). Bioenergía. *Revista Ciencia*, 30-39.
- [36] Aquae Fundación. (24/11/2021). Ventajas y desventajas de la energía solar. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/energia-solar-ventajas-desventajas/>
- [37] Arencibia-Carballo, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica. *REDVET*, 17(9), 1-4. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63647456002>
- [38] Espinel-Blanco, E., Florez-Solano, E. N., and Barbosa-Jaimes, J. E. (2020). Estudio para la generación de energía por un sistema con paneles solares y baterías. *Revista Ingenio*, 17(1), 9-14. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642x.2392>.
- [39] Salazar-Peralta, A. Pichardo-S., J. A., and Pichardo-S., U. (2016). La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 2(5), 11-20.
- [40] Arancibia-Bulnes, C., and Best-B., R. (2010). Energía del Sol. *Revista Ciencia*, 10-17.

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema
Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

- [41] Ramos-Caro, C., Perdiguero-Samaja, Y., Iriarte, A., and Arrieta, A. (2019). Evaluación de la demanda de energía térmica de usuarios residenciales en El Peñón–Catamarca, para transferencia de calentadores solares de agua. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23.
- [42] Daza, I. D. G., Garzón, C. D. H., Prieto, B. A. N., and Ramírez, E. R. (2020). Aplicación de la energía solar térmica en la actualidad. *Actualización en Ingeniería Mecánica y electrónica*, 62(1), 37-47.
- [43] León, J. A., Montero, G., Coronado, M., Ayala, J. R., García, C., and A. M. Vázquez. (2017). Solar energy for a solvent recovery stage in a biodiesel production process. *International Journal of Photoenergy*, pp. 7.
- [44] Kannaiyan, S., Bokde, N. D., and Geem, Z.-W. (2020). Solar collectors modeling and controller design for solar thermal power plant. *IEEE Access*, 8, 81425-81446. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2989003
- [45] De, D. K., and Olukunle, O. C. (2015). A brief review of solar concentrators. *2015 International Conf. On Energy Economics and Environment (ICEEE)*. Doi: 10.1109/energyeconomics.2015.7235082
- [46] Saldivar-Aguilera, T. Q., Díaz-Ponce, A., Valentín-Coronado, L. M., Peña-Cruz, M. I., and Acevedo-R., G. A. (2021). Dual feedback closed-loop control for one-axis solar trackers of parabolic trough collector systems. *2021 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1-6. Doi: 10.1109/ROPEC53248.2021.9668095
- [47] Angulo-Calderón, M., Salgado-Tránsito, I., Trejo-Zúñiga, I., Paredes-Orta, C., Kesthkar, S., and Díaz-Ponce, A. (2022). Development and Accuracy Assessment of a High-Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules. *Appl. Sci.*, 12, 2625. Doi: <https://doi.org/10.3390/app12052625>
- [48] Mustafa, F. I., Shakir, S., Mustafa, F. F., and Naiyf, A. T. (2018). Simple design and implementation of solar tracking system two axis with four sensors for Baghdad city. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*. Doi: 10.1109/IREC.2018.8362577
- [49] Younas, T., Bano, N., Khalid, M. A., Ahmed, A., and Noman, M. (2018). An Experimental Study of Modelling and Fabrication of an Autonomous Solar Parabolic Trough Collector. *2018 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)*. Doi: 10.1109/ICECUBE.2018.8610980
- [50] Perveen, G., Anand, P., and Kumar, A. (2020). Performance Evaluation of Solar Tracking System. *2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*. Doi: 10.1109/ICSTCEE49637.2020.9276923
- [51] Elsayed, A. A., Khalil, E. E., Kassem, M. A., and Huzzayin, O. A. (2021). A novel mechanical solar tracking mechanism with single axis of tracking for developing countries. *Renewable Energy*, 170, 1129–1142. Doi: 10.1016/j.renene.2021.02.058
- [52] Escobar-Mejia, A., Holguín-Londoño, M., and J. C. Osorio-R. (2010). Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico. *Scientia et Technica*, año XVI (44), 245-

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema
Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

250.

- [53] Machado-Toranzo, N., Lusson-Cervantes, A., Leysdian-O-Carralero, L., Bonzon-Henriquez, J., and O. Escalona-Costa (2015). Seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. *Ingeniería Energética*, XXXVI, 190-199 (2015).
- [54] Vargas, C., Posada, J., Jaramillo, L., and García, L. (2015). Consumo de energía en la industria del plástico: revisión de estudios realizados. *Revista CEA*, 1(1), 93-107
- [55] BID/CCB. (2011). *Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector: plásticos*. (No. 2). <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstreams/73212a4f-a067-4381-93ae-8673d6fcda58/download>
- [56] ECOCE, A. C. (2015). *Plan nacional privado colectivo de manejo de residuos de envases post-consumo de PET, PEAD, aluminio y otros-ECOCE*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190003/Plan_de_Manejo-ECOCE.pdf
- [57] Recimex. (24/08/2017). *Directorio de recicladores*. <https://www.recimex.com.mx/index.php>
- [58] CONIMER. (s. f.). <https://www.conimer.org/>
- [59] Comisión Federal de Electricidad. (s. f.). *Negocio, Tarifas GDBT*. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDemandaBT.aspx>
- [60] Giraldo-Saldarriaga, A. F., and Pardo-Peña L. C. M. (2019). *Rediseño de un máquina extrusora de plástico* [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio de la Universidad Autónoma de Occidente. <http://hdl.handle.net/10614/11246>
- [61] Limón-Portillo, A. (02/06/2017). *Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento*. CIEP. <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>
- [62] Castro, A. A. (20/10/2023). *Extrusión de plásticos: proceso, máquinas extrusoras y aplicaciones*. Plastics Technology México. <https://www.pt-mexico.com/articulos/extrusion-de-plasticos-proceso-maquinas-extrusoras-y-aplicaciones>
- [63] Giles Jr., H. F., Wagner Jr., J. R., and Mount III, E. M. (2005). *Extrusion: the definitive processing guide and handbook*. William Andrew Publishing.
- [64] Moreno, J., Maldonado, J., Portocarrero, J., Molina, V., and Marulanda, M. (2011). Automatización del perfil de calentamiento de una extrusora de polímeros en UAN Cali. *Revista inge@UAN*, 2(3), 70-72.
- [65] Rosato, D. V. (1998). *Extruding plastics: a practical processing handbook*. Springer-Science+Business Media, B. V.
- [66] WEG. (s. f.). *Eficiencia energética, extrusora WEG*. <https://www.weg.net/institutional/ES/es/solutions/energy-efficiency/industrial-applications/extruder>
- [67] González-Velasco, J. (2012). *Energías renovables*. Editorial Reverté SA.
- [68] Factorenergia. (15/05/2023). *Energía solar: todo lo que tienes saber*. <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/energia-solar/>

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

- [69] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (octubre de 2006). *Energía solar térmica, manuales de energías renovables tomo 4*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (España). https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10374_energia_solar_termica_06_8a90370e.pdf
- [70] Botello-Mares, A., Cervera-Gómez, L. E., and Tejeda-Guevara, R. A. (2017). Evaluación del recurso solar del valle de Juárez. En Cervantes-Rendón, E. (Ed.), *El Valle de Juárez: su historia, economía y ambiente para el uso de energía fotovoltaica* (1a ed., pp. 81-106). El Colegio de Chihuahua.
- [71] Saldivar-Aguilera, T. Q. (2022). *Caracterización y optimización del seguimiento solar de un concentrador solar de canal parabólico* [Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.]. Repositorio Institucional CIO. <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/1248>
- [72] REN21. (2019). Market and industry trends. In *Renewables 2019 Global Status Report* (pp. 107-109). REN21 Secretariat. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
- [73] Lema-Carrera, M. A. (2015). *Diseño e implementación de un sistema automático de purificación de agua por medio de energía, reflexión solar y luz ultravioleta* [Tesis de Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital-EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10492>
- [74] Arrieta-Morelo, D. J. and Puello-Bravo, S. Y. (2015). *Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético de paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/693>
- [75] Fundación UNIDA, aula virtual, energías, clase 4 (s. f.). <https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf>
- [76] Duffie, J., and Beckman, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- [77] Pacheco-Cunduri, M. A., Tapia-Segarra, I. E., and Guevara-Cabezas, E. A. (2020). Design and implementation of a single axis solar tracker for the optimization of a 100 W photovoltaic system applying mathematical calculations and industrial automation. *Ciencia Digital*, 4(3), 336-354. Doi: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1359>
- [78] Cervantes-de la Rosa, J. P. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo didáctico de seguidor solar híbrido: fotovoltaico-térmico* [Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados S. C.]. Repositorio CIMAV
- [79] Pelayo, J. A., Sedano, C., and Rojano, R. (2020). Sistema de seguimiento solar de un eje para aumentar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos bajo distintas condiciones climáticas. *Ingeniería*, 24(3), 11-23.
- [80] Salgado-Conrado, L. (2018). A review on sun position sensors used in solar applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), 2128-2146. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.040>
- [81] 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

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

- based on a parabolic trough collector. *IEEE Access*, 11, 124570-124583. Doi: 10.1109/ACCESS.2023.3328910
- [82] Kumar.-L, S., and Vasudevan, H. (2013). Optimization of injection moulding process parameters the moulding of low-density polyethylene (LDPE). *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(5), 35-39.
- [83] Imtech Design Ltd. (s. f.). *LDPE materials*. http://www.imtechdesign.com/advice_materials_pe_ld.php
- [84] Salas-González, A. A. (2023). Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga].
- [85] B. J. Huang, and S. W. Hsieh, “An automation of collector testing and modification of ANSI/ASHRAE 93-1996 estándar,” 1990.
- [86] Norton, R. (2009). *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (4th ed.). Mc Graw Hill.
- [87] Shigley, J., and Uicker-Jr., J. (2001). *Teoría de máquinas y mecanismos* (1th ed.). Mc Graw Hill.
- [88] Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas: un enfoque integrado* (4th ed.). Pearson Educación.
- [89] Whelan, A., & Dunning, D. J. (1982). *Developments in plastic technology-1 Extrusion*. Applied Science Publishers.
- [90] Goff, J., & Whelan, T. *The Dynisco Extrusion Processors Handbook* (2nd ed.). Dynisco.
- [91] Panaroni, D., Martorelli, L., and Castro-Luna, A. (2021). Analysis an evaluation of the cosine efficiency of a polar parabolic trough collector: application in a subtropical region of Argentina. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 13(2), 1-15. Doi: <https://doi.org/10.18272/aci.v13i2.2283>
- [92] El-Kassaby, M. M. (1994). Prediction of optimum tilt angle for polar parabolic trough with long axis in the north-south direction. *International Journal of Solar Energy*, 16(2), 99-109. Doi: 10.1080/01425919408914269
- [93] Xu, C., Chen, Z., Li, M., Zhang, P., Ji, X., Luo, X., and Liu, J. (2014). Research on the compensation of the end loss effect for parabolic trough solar collectors. *Applied Energy*, 115, 128-139. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.003>

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de una Máquina Extrusora Horizontal con Energía Solar Integrada a través de un Sistema Automático de Concentración Solar de Canal Parabólico

ANEXO 1

Productividad académica: patentamiento

El prototipo resultante ha sido sometido a patentamiento ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial con la solicitud expediente MX/a/2024/005759.

Copial

gob.mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Solicitud de Patente de Invención o de Registro de Modelo de Utilidad
o de Registro de Diseño Industrial

Homoclave del formato IMPI-00-009 Fecha de publicación del formato en el DOF 18 / 11 / 20	Folio y Fecha de Recepción INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL Dirección Divisiva de Patentes Solicitud Expediente: MX/a/2024/005759 Fecha: 18/MAY/2024 Hora: 18:17:21 Folio: MX/E/2024/033397 688895 
---	--

Datos generales de la solicitud

Marcar con una X sólo una opción

☒ Solicitud de Patente de Invención ☐ PCT
☐ Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad ☐ PCT
☐ Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique:
☐ Modelo Industrial ☐ Dibujo Industrial

Datos generales del o de los solicitante(s)

Personas físicas CURP: Nombre(s): Primer apellido: Segundo apellido: Nacionalidad: Teléfono (número, extensión): Correo electrónico: ☐ El solicitante es el inventor/diseñador ☐ Continúa en anexo	Personas morales RFC: TMM140723GFA Denominación o razón social: Secretaría de Educación Pública - Tecnológico Nacional de México Nacionalidad: Mexicana Teléfono (número, extensión): Correo electrónico: d_vinculacion05@toron.mx ☐ Continúa en anexo
--	--

Domicilio del o de los solicitante(s)

Código postal: 03330

Calle: Avenida Universidad

Número exterior: 1200 Número interior: Quinto piso

Colonia: Xoco

Municipio o demarcación territorial: Alcatlá Benito Juárez

Entidad Federativa: Ciudad de México

País: México

Datos generales del o de los inventor(es) o diseñador(es)

CURP: DEAA771203HDFNGL03

Nombre(s): José Alonso

Primer apellido: Dena

Segundo apellido: Aguilar

Nacionalidad: Mexicana

Teléfono (número, extensión): 4491812897

Correo electrónico: josealonso_dena@hotmail.com

☒ Continúa en anexo

MÉXICO CONAMER IMPI

Creación de la Propiedad Industrial

Contacto:
 Atención al Usuario: Pabellón de Arteaga, Pabellón 100, Ciudad de México
 Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana, del interior de la República sin
 costo para el usuario 800-575-575-00, exteniones 17099, 17090 y 10056.
 Correo electrónico: dpat@impi.gob.mx

Creatividad para el Bienestar

Página 1 de 4

ANEXO 2

Productividad académica: publicación científica

Los resultados de la presente Tesis fueron ya publicados en [81].



Received 27 September 2023, accepted 13 October 2023, date of publication 31 October 2023, date of current version 9 November 2023.
Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2023.3328910

RESEARCH ARTICLE

Design and Construction of a Solar Electric Plastic Extruder Machine Based on a Parabolic Trough Collector

JOSÉ ALONSO DENA-AGUILAR^{1,2}, (Member, IEEE), ARTURO DÍAZ-PONCE³,
JUAN CARLOS DELGADO-FLORES², ERNESTO OLIVERA-GONZÁLEZ⁴,
NIVIA ESCALANTE-GARCÍA^{2,4}, AND VÍCTOR MANUEL VELASCO-GALLARDO²

¹EPM CONAHICYT, Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. Unidad Aguascalientes, Aguascalientes 20200, México

²Engineering Department, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Tecnológico Nacional de México, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes 20670, México

³CONAHICYT, Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. Unidad Aguascalientes, Aguascalientes 20200, México

⁴Artificial Lighting Laboratory, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Tecnológico Nacional de México, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes 20670, México

Corresponding authors: Arturo Díaz-Ponce (adiaz@cio.mx) and José Alonso Dena-Aguilar (josealsonso_dena@hotmail.com)

This work was supported in part by the CONAHICYT-Mexico under Grant EPM 1086950 and Grant 270828; in part by Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus; and in part by Instituto de Ciencia y Tecnología del Estado de Aguascalientes (INCYTEA) (before IDSCHA)-Aguascalientes under Project IA-025-2019.

ABSTRACT Plastics can be recycled by extrusion using an extruder machine that melts and transforms the material into a new product. This paper proposes the design, construction and thermal characterization of a horizontal extruder machine integrated with a parabolic trough concentrator with a one-axis solar tracking system, in which hybrid heating is performed by means of an arrangement of electrical resistances and by the concentration of direct normal irradiance. The optical simulation and the design of the proposed extruder are presented; as well as its integration with the parabolic trough concentrator. Experimental tests were performed in a real environment and the temperatures reached in three cases of heating by electrical resistance, solar radiation, and hybrid (electrical resistance plus solar radiation) were compared. The objective is to reach a temperature of 200 °C in the barrel, for which an analysis of the experimental thermal performance of the proposed extruder is presented. The heating by electrical resistances took from 77 to 95 min to reach 200 °C, while the hybrid system only took 25 to 57 min, reducing the times between 25.97 and 73.68% and, consequently, reducing the consumption of resistor current. In hybrid mode, at one point in the barrel, temperatures higher than 260 °C were reached, providing the possibility of instantly turning off some electrical resistances to save energy.

INDEX TERMS Plastic extrusion, extruder machine, parabolic trough collector, solar tracker, concentrated solar power.

1. INTRODUCTION

Waste plastics are durable and non-biodegradable materials that can be subjected to recycling processes to manufacture new products through the use of mechanical or chemical recycling technologies such as extrusion, injection molding, pyrolysis, and liquefaction, among others [1], [2]. One of the

most widely used plastic polymer recycling processes today is extrusion, which is carried out in extruder machines and whose operating principle is based on melting the material previously crushed into flakes and placing it in contact with a rotating and hot endless screw that moves the material forward. Said endless screw is housed in an extrusion barrel provided with a thermal system that allows reaching sufficient temperatures to melt the plastic and make it pass through an opening until it is picked up by the extrusion

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was R. K. Saket.

ANEXO 3

Formación de recursos humanos

La presente Tesis permitió la formación de recursos humanos especializados mediante el desarrollo de proyectos académicos, ver Tabla 8. Estos trabajos coadyuvaron con las bases iniciales de pruebas de concepto de algunos sistemas de operación de la máquina extrusora.

Tabla 8. Productos académicos derivados del presente trabajo de Tesis.

Nombre del estudiante	Producto	Nombre del proyecto
Ramírez-Rodríguez, E. N. (junio 2022)	Informe de prácticas profesionales	Manufactura de un concentrador solar cilíndrico parabólico para su integración en una máquina extrusora
Soledad-Casilla, C. E. (diciembre 2022)	Informe de prácticas profesionales	Diseño y manufactura de un husillo para prototipo de máquina extrusora de plástico de desecho
Santillán-Delgado, A. S. (diciembre 2022).	Informe de prácticas profesionales	Manufactura de una máquina extrusora horizontal para su aplicación en la industria del reciclaje de plásticos
Salas-González, A. A. (junio 2023).	Informe de prácticas profesionales	Análisis DOE del aprovechamiento de la radiación solar en una máquina extrusora horizontal híbrida de plásticos
Salas-González, A. A. (2023).	Tesis	Diseño y manufactura de un husillo para una máquina extrusora horizontal de plásticos: metrología y caracterización de materiales
Aguayo-Guillen, J. G. (diciembre 2023).	Informe de prácticas profesionales	Desarrollo de una unidad de giro 3D para un sistema de seguimiento solar: diseño, construcción y programación
Buenrostro-Delgado, A. E. (diciembre 2023)	Informe de prácticas profesionales	Desarrollo de un sensor de seguimiento solar a base de fotorresistencias LDR: diseño, construcción y programación

ANEXO 4

Acceso universal al conocimiento: participación en congresos

Así mismo, durante el desarrollo global de la máquina extrusora horizontal con energía solar integrada se obtuvieron resultados parciales que fueron presentados en diversos congresos de divulgación o difusión del conocimiento, ver Tabla 9.

Tabla 9. Congresos donde se presentaron avances del presente trabajo de Tesis.

Evento	Fecha	Sede	Modalidad	Trabajo
Congreso Internacional de Investigación e Innovación Multidisciplinario 2024	7 y 8 de marzo de 2024	Univ. Centro de Estudios Cortázar, Cortazar, Gto., Méx.	Ponencia	Análisis preliminar de un proceso de extrusión de plásticos realizado en una máquina extrusora híbrida prefabricada
1er. Congreso virtual Internacional de Desarrollo Sustentable y Energías Alternativas	Del 9 al 11 de octubre de 2023	TecNM Campus Linares, Linares, N. L., Méx.	Ponencia	Estudio del aprovechamiento de la energía solar en una máquina extrusora horizontal de plásticos
1er. Congreso Internacional Multidisciplinario de la Divulgación Científica	Del 9 al 13 de octubre de 2023	Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags., Méx.	Ponencia	Estudio del aprovechamiento de la energía solar en una máquina extrusora horizontal de plásticos
Congreso Internacional de Investigación e Innovación Multidisciplinario 2022	7 y 8 de abril de 2022	Univ. Centro de Estudios Cortázar, Cortazar, Gto., Méx.	Ponencia	Diseño y construcción de una máquina extrusora solar horizontal orientada a la industria del reciclaje de plásticos