

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

Desarrollo e implementación de un controlador de potencia para un sistema Scheffler-Stirling a través de la variación del volumen muerto

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

SAÚL ISLAS PEREDA

DIRECTORES:

DR. RICARDO BELTRÁN CHACÓN

DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

MEXICALI, B.C., MÉXICO A MARZO DE 2020.

Dedicatoria

Mis más sinceras gracias a mis padres Saúl Islas Reyna y María Isabel Pereda Valles, con quienes tengo una deuda infinita en todos los aspectos posibles, que nunca limitaron mis decisiones y siempre estuvieron para apoyarme, siempre.

A mis hermanas Denisse Lizbeth e Isabel, con quienes he compartido días buenos y malos, pero siempre hemos permanecido juntos.

A mis hermanos José Ángel, Daniel, Luis y Moisés con los que no compartiré apellido, pero nos encontramos en el camino de esta vida y han estado para mí en las buenas y en las malas.

Este trabajo de tesis está dedicado a todos los jóvenes con ganas de aprender, a aquellos que se quedaron en el camino por cuestiones de salud o económica y a los ingenieros amateurs.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco al Dr. Ricardo Beltrán Chacón, quien fungió como director, profesor y amigo, que de manera incondicional y paciente me hizo crecer profesional y personalmente, le admiro por su gran desempeño. Gracias al Dr. Nicolás Velázquez limón, quien abrió el mundo de la termodinámica para mí, y debido a su motivación constante sé que falta gran camino por recorrer para ser un buen investigador y tecnólogo.

De manera personal y profesional mi sincero aprecio y respeto al Dr. Ricardo López Zavala, quien ha estado ahí para corregirme y ser mejor. Así como al Dr. José Ángel León Valdez, quien tuvo la paciencia y empeño de reordenar los conceptos de la energía y su transformación.

Debo agradecer a mi alma mater la universidad Autónoma de baja california, la cual ha contribuido con mi desarrollo profesional desde la licenciatura. De manera muy específica también debo agradecer al Instituto de Ingeniería, en donde culminen mis estudios de posgrado

Al CONACYT, que gracias a su apoyo financiero he podido a cercarme más a la realización plena del hombre.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la simulación, diseño y desarrollo de control de potencia aplicado en un sistema Scheffler-Stirling, que a través de la variación de su volumen muerto tiene como objetivo de estabilizar los parámetros eléctricos que permitan la interconexión a la red eléctrica nacional. Se realizó un estudio completo del estado del arte de los controladores de motores Stirling, así como de los modelos que predicen el comportamiento termodinámico de estos.

El estudio teórico del sistema propuesto se lleva a cabo a través de un simulador numérico de segundo orden en la plataforma de MATLAB, en donde se analizan los diversos subsistemas; concentrador Scheffler, motor Stirling y el control de volumen muerto. Se analizó la influencia de la variación de la temperatura del calentador, presión promedio, carrera del pistón, ángulo de fase y la cantidad de volumen muerto sobre el desempeño de un motor Stirling tipo alfa, determinando las ventajas y desventajas de cada uno de los parámetros al utilizarse como variables de control.

Se evaluaron cuatro modos de implementación del sistema de generación de energía eléctrica Scheffler-Stirling a lo largo de un año en el lugar de interés, que por medio de un análisis comparativo se vislumbran las mejoras en la viabilidad técnica y económica del sistema al aplicar el controlador de volumen muerto.

El desarrollo de un banco de pruebas de pequeña escala, permitió el análisis transitorio de la variación de volumen muerto, así como la implementación del controlador PID. De manera adyacente se realizó un sistema de monitoreo y control para motores Stirling en la plataforma de LABVIEW, en el cual se establecieron los lazos de control de los subsistemas que permiten la estabilidad del fenómeno termodinámico.

ABSTRACT

This work presents the simulation, design and development of power control applied in a Scheffler-Stirling system, which through the variation of its dead volume aims to stabilize the electrical parameters that allow the interconnection to the national grid. A complete study was carried out on the state of the art of Stirling motor controllers, as well as on the models that predict their thermodynamic behavior.

The theoretical study of the proposed system is carried out through a second order numerical simulator on the MATLAB platform, where the various subsystems are analyzed; Scheffler concentrator, Stirling engine and the dead volume control. The influence of the variation in heater temperature, average pressure, piston stroke, phase angle, and the amount of dead volume on the performance of an alpha-type Stirling engine was analyzed, determining the advantages and disadvantages of each of the parameters when used as control variables.

Four modes of implementation of the Scheffler-Stirling power generation system were evaluated over a one-year period at the site of interest. Through a comparative analysis, the improvements in the technical and economic feasibility of the system when applying the dead volume controller were seen.

The development of a small-scale test bench allowed the transient analysis of the dead volume variation as well as the implementation of the PID controller. Adjacent to this, a monitoring and control system for Stirling engines was implemented in the LABVIEW platform, in which the control loops of the subsystems that allow the stability of the thermodynamic phenomenon were established.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
Lista de figuras.....	VIII
Lista de tablas.....	XIV
Nomenclatura.....	XV
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Problemática y justificación del proyecto.....	2
1.3 Antecedentes.....	3
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Objetivo general.....	7
1.6 Objetivos específicos.....	7
1.6 Organización de la tesis.....	7
Capítulo 2 Fundamentos teóricos.....	9
2.1 Fundamentos de energía solar.....	9
Energía solar y sus parámetros.....	9
Geometría Solar.....	9
2.2 Concentradores Parabólicos.....	10
2.3 Teoría de Control e Instrumentación.....	13
Fundamentos y conceptos de control.....	13
Control Todo o Nada.....	14
Control PID.....	14

Instrumentación electrónica y sistema de monitoreo y control	15
2.4 Tecnología del motor Stirling.....	17
Componentes y configuración	17
Ciclo termodinámico Stirling	18
2.5 Generadores eléctricos.....	20
Principio de operación	21
Generador de imanes permanentes	21
Generador de inducción.....	21
Capítulo 3 Estudio y Diseño de la propuesta tecnológica	23
3.1 Descripción física y operativa del sistema	23
3.2 Concentrador Scheffler de foco fijo.	25
Modelo matemático del disco Scheffler	27
Estudio operativo y comparativo del concentrador solar	29
Optimización del concentrador solar	31
3.3 Motor Stirling	33
Modelo matemático del motor Stirling.....	34
Controlabilidad de la maquina térmica.....	38
Estudio de las interacciones de las variables de diseño del motor Stirling	46
Aplicación de la categorización de las interacciones de las variables.....	49
Efecto del volumen muerto y propuesta del actuador	53
3.4 Estudio operativo del sistema Scheffler-Stirling	56
Perfiles de control del sistema Scheffler-Stirling.....	57
Equinoccio de primavera: Operación del sistema	58
Solsticio de verano: Operación del sistema.....	63
Solsticio de invierno: Operación del sistema	68

Día con un nublado: Operación del sistema	73
Día con la máxima irradiancia: Operación del sistema	76
Resumen anual.....	78
Capítulo 4 Desarrollo de la nano-banco de pruebas de motor Stirling.....	80
4.1 Descripción del nano-banco de pruebas	80
4.2 Diseño, construcción y modificación de los subsistemas.....	82
Motor	83
Calentador del motor Stirling	85
Enfriador del motor	86
Actuador de volumen muerto	87
Subsistema de enfriamiento.....	88
Placa electrónica de pruebas.....	89
Presentación de la nano-planta con controlador de volumen muerto.....	90
Instrumentación y control: Sistema de monitoreo y control.....	95
Controladores de los subsistemas.....	96
4.3 Sensibilización del sistema.....	99
Caracterización del calentador.....	99
Caracterización del actuador	101
Arranque, estabilización y paro	103
Interacción entre la temperatura del calentador, enfriador y cantidad de volumen muerto.	105
Transitorio de VCDX	110
4.4 Control del volumen muerto para voltaje constante.....	115
Perturbaciones en el calentador	120
Perturbaciones en el enfriador	122

Capítulo 5 Conclusiones.....	124
Conclusiones.....	124
Recomendaciones y trabajos futuros	125
Referencias	127
Apéndice.....	131
A.1 Artículos y memorias.....	131
A.2. Adaptación de max6675 a LabVIEW	132
A.3 Planos de los componentes	133
Actuador de volumen muestro.....	133
Motor Stirling	136
Calentador del motor Stirling	139
Enfriador del motor Stirling	140
Enfriador Externo (auxiliar)	142

Lista de figuras

Figura 2.1. Sistemas de generación eléctrica Disco-Stirling: a) Sistema ADDS, b) Proyecto EuroDish.....	11
Figura 2.2. Concentrador tipo Scheffler: a) Geometría, b) aplicación de foco fijo.....	12
Figura 2.3 Estructura de un controlador PID.....	15
Figura 2.4 Arquitectura básica de un sistema monitoreo y control.....	16
Figura 2.5. Ciclo termodinámico ideal Stirling.....	19
Figura 3.1 Sistema de generación de energía eléctrica solar, Scheffler-Stirling.....	24
Figura 3.2. Sistema de concentración solar Disco-Scheffler; a) seguimiento en dos ejes con orientación al sur, b) parámetros opto geométricos del sistema.....	26
Figura 3.3. Afectación del ángulo subtendido del sol en la imagen solar en el receptor.	28
Figura 3.4. Plano del sistema para la determinación de la elipse de aceptación solar; a) plano ZY. b) Plano ZX.....	29

Figura 3.5. Parámetros del recurso solar de Mexicali B. C., México: a) Ángulos solares, b) Potencia de la irradiancia.....	30
Figura 3.6. Cuantificación de la energía térmica día captada por cada disco evaluado en la región de Mexicali, B.C. México: a) Solsticios y equinoccio, b) Exploración anual.....	31
Figura 3.7. Estudio de optimización del disco Scheffler en función de su ubicación geográfica	32
Figura 3.8. Prototipo de motor Stirling tipo Alfa con una capacidad de 2 kW nominal.	33
Figura 3.9. Diagrama de flujo para la solución del modelo térmico del motor Stirling.....	34
Figura 3.10. Representación de las temperaturas, volúmenes y principales pérdidas térmicas del sistema.	35
Figura 3.11. Estudio de la influencia del calor suministrado sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.....	39
Figura 3.12. Estudio de la influencia del ángulo de fase sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.....	41
Figura 3.13. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar el ángulo de fase como variable manipulada.....	41
Figura 3.14. Estudio de la influencia de la carrera del pistón sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.	43
Figura 3.15. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar la carrera del pistón como variable manipulada.....	43
Figura 3.16. Estudio de la influencia de la presión media sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.....	45
Figura 3.17. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar la cantidad de masa de fluido de trabajo como variable manipulada.	45
Figura 3.18. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar la cantidad de volumen muerto extra como variable manipulada.	46
Figura 3.19. Superficie de respuesta η de dos variables aleatorias.	47
Figura 3.20. Zonas de categorización de las interacciones de las variables.	48
Figura 3.21. Esquema global de interacción de las variables del sistema.	50
Figura 3.22. Jerarquía de las interacciones de las variables de diseño del sistema.	52
Figura 3.23. Influencia individual de las variables sobre la eficiencia del sistema.....	52

Figura 3.24. Mapas de resultantes de la interacción de el volumen muerto de la zona de compresión con la irradiancia: a) Eficiencia, b) Potencia neta, c) Frecuencia y d) Temperatura de expansión.	55
Figura 3.25. Prototipo del actuador del volumen muerto de 500 ml propuesto.	56
Figura 3.26. Diagrama de flujo del controlador de potencia y frecuencia del sistema.	57
Figura 3.27. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler Stirling en el equinoccio de primavera.....	59
Figura 3.28. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el equinoccio de primavera.....	60
Figura 3.29. Parámetros termodinámicos del motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el equinoccio de primavera.....	61
Figura 3.30 Pérdidas de energía térmica y por caídas de presión en el motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el equinoccio de primavera.	61
Figura 3.31. Estudio del trazado de rayos del sistema Scheffler-Stirling en equinoccio de primavera a 12:00, hora solar.	62
Figura 3.32. Evaluación de la potencia eléctrica y frecuencia del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de verano.....	64
Figura 3.33. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de verano.	64
Figura 3.34. Parámetros termodinámicos del motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de verano.	65
Figura 3.35. Pérdidas de energía térmica y por caídas de presión en el motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de verano.....	66
Figura 3.36. Calor de entrada y salida del motor Stirling en el solsticio de verano.	66
Figura 3.37. Estudio del trazado de rayos del sistema Scheffler-Stirling en solsticio de verano a 12:00, hora solar.	67
Figura 3.38. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de invierno.	69
Figura 3.39. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de invierno.....	70

Figura 3.40. Parámetros termodinámicos del motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de invierno.....	71
Figura 3.41. Pérdidas de energía térmica y por caídas de presión en el motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de invierno.	71
Figura 3.42. Estudio del trazado de rayos del sistema Scheffler-Stirling en solsticio de invierno a 12:00, hora solar.	73
Figura 3.43. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler-Stirling en un día nublado.	74
Figura 3.44. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en un día nublado.	75
Figura 3.45. Energía eléctrica y eficiencia promedio de los diversos modos propuestos en el día nublado.	75
Figura 3.46. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler-Stirling en el día con máxima irradiancia.	76
Figura 3.47. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el día con máxima irradiancia.	77
Figura 3.48. Energía eléctrica y eficiencia promedio de los diversos modos propuestos en el día con máxima irradiancia.....	78
Figura 3.49. Evaluación de los 4 modos propuestos en el año.....	79
Figura 3.50 Cantidad de energía térmica y eléctrica de los 4 modos propuestos.....	79
Figura 4.1. Esquemático del nano-banco de pruebas del motor Stirling con control de volumen muerto.....	81
Figura 4.2. Motor Stirling tipo alfa prefabricado.	83
Figura 4.3. Diseño y construcción de las bielas con rodamientos para minimizar la fricción.	84
Figura 4.4. Colocación de fibra de cerámica como aislamiento entre el cuerpo del motor y el calentador.....	84
Figura 4.5. Maquinado del calentador de acero inoxidable para temperaturas superior a los 700 °C.....	85
Figura 4.6. Diseño y construcción del enfriador; a) Dibujo asistido por computadora, b) sección inferior, c) sección media y superior, d) ensamble del enfriador prototipo.....	86

Figura 4.7. Diseño y construcción del actuador de volumen muerto por mecanismo tornillo sinfín.	87
Figura 4.8. Diseño y construcción del enfriador auxiliar, el cual enfría el agua con el aire de manera indirecta.	88
Figura 4.9. Diagrama eléctrico de las conexiones de los dispositivos para el sistema de adquisición de datos y control.	89
Figura 4.10. Nano-banco de prueba del motor Stirling controlado por volumen muerto. ...	91
Figura 4.11. Subsistemas y sensores del motor Stirling controlado por volumen muerto parte frontal.	92
Figura 4.12. Vista superior del nano-banco de pruebas de motor Stirling.	92
Figura 4.13. Subsistemas y sensores del motor Stirling controlado por volumen muerto parte posterior A.	93
Figura 4.14. Almacenamiento de la adquisición de datos del sistema motor Stirling.....	93
Figura 4.15. Sección de la tableta electrónica de pruebas del sistema motor Stirling.....	94
Figura 4.16. Diseño y desarrollo de la interfaz humano-máquina del sistema de monitoreo y control.....	95
Figura 4.17. Implementación del equipo Polyscience para la calibración de los sensores de temperatura de la nano-planta.....	96
Figura 4.18. Desarrollo de los 4 controladores principales de la nano-planta; Calentador, enfriador, volumen muerto y enfriador auxiliar.	98
Figura 4.19. Función de la cantidad de energía suministrada en el calentador.	100
Figura 4.20. Caracterización del actuador de volumen muerto y determinación de la zona de trabajo; a) Velocidades, b) Zona de operación lineal.	102
Figura 4.21. Arranque, estabilización y paro del motor Stirling del nano-banco de pruebas.	104
Figura 4.22. Estudio de la influencia del volumen muerto extra sobre el voltaje del generador con diferentes temperaturas de activación: a) con $T_c = 30\text{ }^\circ\text{C}$, b) $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$	107
Figura 4.23. Superficies de respuesta de la relación entre la cantidad de volumen muerto añadido y la temperatura de activación: a) con $T_c = 30\text{ }^\circ\text{C}$, b) $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$	109
Figura 4.24. Evaluación del estado transitorio del voltaje del sistema debido a la variación del volumen muerto extra con una temperatura de activación de $412\text{ }^\circ\text{C}$	112

Figura 4.25. Evaluación del estado transitorio del voltaje del sistema debido a la variación del volumen muerto extra con una temperatura de activación de 470 °C.	114
Figura 4.26. Controlador de voltaje a través de la variación del volumen muerto con $K_p = -500$ y los puntos de consigna de: a) 4V, b) 3V, c) 2V y d) 1.5V.	118
Figura 4.27. Controlador de voltaje a través de la variación del volumen muerto con $K_p = -250$ y los puntos de consigna de: a) 4V, b) 3V, c) 2V y d) 1.5V.	119
Figura 4.28. Implementación del control de potencia para la mitigación de las perturbaciones de la temperatura de activación.	121
Figura 4.29. Implementación del control de potencia para la mitigación de las perturbaciones de la temperatura del sumidero.....	123

Lista de tablas

Tabla 2.1. Tipos de captadores de energía solar y sus características.	11
Tabla 2.2. Modelos recientes para determinar el desempeño del motor Stirling.....	20
Tabla 3.1. Evaluación de los sistemas Scheffler y sus parámetros en un año.	32
Tabla 3.2. Rangos de exploración y punto de diseño de las variables.....	49
Tabla 3.3 Descripción de los componentes de los distintos modos de implementación.	56
Tabla 3.4. Comparación del desempeño de los sistemas de generación de energía eléctrica en el equinoccio de primavera.	62
Tabla 3.5. Comparación del desempeño de los sistemas de generación de energía eléctrica en el solsticio de verano.....	68
Tabla 3.6. Comparación del desempeño de los sistemas de generación de energía eléctrica en el solsticio de invierno.	72
Tabla 4.1. Especificaciones de los componentes y conexiones eléctricas de la tableta electrónica de pruebas.	94

Nomenclatura

α	Ángulo de fase, grados
A_{HT}	Área de transferencia, cm^2
BHI	Suministro ideal de calor, W
BP	Potencia básica, W
C_v	Calor específico a volumen constante, J/kg K
D	Diámetro, cm
f	Factor de fricción del regenerador
F	Fanning friction factor
FCT	Fracción de tiempo
F_r	Factor de fricción
G	Flujo de masa, g/cm^2
KMX	Constante de conducción de la matriz del regenerador, W/m K
L	Longitud, cm
MF_L	Pérdidas por fricción mecánica., W
MSH	Malla, hilos por centímetro
N	Número
NP	Potencia neta, W
NTU	Número de unidades transferidas
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
P_S	Carrera del pistón, cm
Q	Calor, W
$Q_{MX,k}$	Pérdidas de calor de la matriz del regenerador, W
Q_S	Pérdidas estáticas de calor, W
Q_{TS}	Pérdidas por sobre calentamiento en el regenerador, W
Re	Número de Reynolds
Rt	Resistencia térmica, K/W
T_C	Temperatura de compresión, K
T_{Crank}	Temperatura del cárter, K
T_H	Temperatura de expansión, K
THW	Grosor del alambre, cm
V_{CD}	Volumen muerto del enfriador, cm^3
V_{CDX}	Volumen muerto extra en la zona de compresión, cm^3
V_{EX}	Volumen muerto en la zona de compresión, cm^3
V_{HD}	Volumen muerto en el calentador, cm^3
V_R	Volumen muerto del regenerador, cm^3
V_{ratio}	Relación de volumen, cm^3
V_{SW}	Volumen de barrido, cm^3

V_{rpm}	Velocidad del cigüeñal, rpm
W	Flujo másico, kg/s
WP	Pérdidas de energía por caídas de presión, W
ΔT_{MX}	Diferencia de temperatura máxima, K

Griego

α	configuración Alpha
β	configuración Beta
γ	configuración Gamma
φ	Grado de interacción del par de variables
Φ	Indicador global de las interacciones del sistema
η_s	Superficie de respuesta de eficiencia térmica
ρ	Densidad, kg/cm^3

Subíndices

C	Enfriador
CYL	Cilindro
H	Calentador
k	Conducción
PC	Corona del pistón
R	Regenerador
T	Tubos

Capítulo 1 Introducción

Es este capítulo se presenta el planteamiento general de la tesis, comprendiendo la problemática y la justificación de este trabajo. Además, se propone la hipótesis, los objetivos generales y específicos. Se introduce con una perspectiva global de la problemática de la demanda de energía eléctrica y como las tecnologías para ello emplean combustibles fósiles. Se presenta la propuesta tecnológica para atacar de manera sustentable la generación de energía eléctrica a través de la activación de un motor Stirling solar y la mejora de este sistema a partir de la implementación de un controlador de volumen muerto.

1.1 Introducción

El incremento desmesurado de la población global ha afectado diferentes áreas de la sociedad, como la salud, la vivienda, la alimentación, combustibles, el medio ambiente, la energía eléctrica, entre otros. Gran parte de la contaminación del mundo es debido a las emisiones de CO_2 a la atmósfera por procesos de generación eléctrica que están basados en la quema de combustibles fósiles, por lo que el incremento poblacional conlleva un incremento en la demanda de energía eléctrica y por ende la contaminación generada por este sector es incrementada. Es necesario crear conciencia en la población de la gravedad de la situación, utilizando recursos tecnológicos para la disminución o solución de este problema.

Las tecnologías de generación de energía eléctrica (TGEE) a partir de fuentes de energías renovables ofrecen una oportunidad para el desarrollo de una sociedad sustentable. Debido a que el incremento en la población es un factor difícil de controlar y cada hombre tiene demanda de servicios necesarios para su desarrollo en la sociedad actual, las TGEE activadas por recursos renovables deben tener las mismas características técnicas que las TGEE activadas con combustibles fósiles. Es decir, estas deben tener la capacidad de generación y la estabilidad de la energía eléctrica en todo el año. Además, deben ser competitivas al disminuir los costos de inversión inicial, de operación y mantenimiento. En la actualidad la energía solar es el recurso renovable más prometedor para dar solución a los problemas de contaminación y déficit energéticos.

Existen dos principales maneras prácticas para la generación de energía eléctrica utilizando el recurso solar, una de las tecnologías que utiliza la radiación directa para provocar el efecto fotoeléctrico, son los paneles solares. Los paneles fotovoltaicos son definidos por su construcción como: monocristalino, policristalino y película delgada. Por otra parte, existe la implementación de tecnología de colección y concentración solar para la activación de un ciclo termodinámico que acoplado a un generador produzca energía eléctrica, por ejemplo: Rankine y Stirling (Mancini et al. 2003; Tartière 2017). Además, de estas dos técnicas existe la generación de energía eléctrica a través del efecto Seebeck.

Una de las máquinas térmicas con más alta eficiencia es el motor Stirling, reportando en la literatura de un 31% hasta un 40%, los cuales emplean un ciclo regenerativo donde un gas es expandido y comprimido por lo que son muy silenciosos, tienen bajo requerimiento de mantenimiento, al ser motores de combustión externas tiene la factibilidad de ser activados con diferentes tipos de fuentes como solar, calor residual, biocombustibles, combustibles fósiles, etc.

1.2 Problemática y justificación del proyecto

Así como los proveedores de energía eléctrica del resto del mundo, en México la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene un especial interés en el desarrollo sustentable las TGEE activadas por energías renovables, las cuales permiten disminuir la dependencia de los hidrocarburos y ayudan al desarrollo de regiones rurales donde existan fuentes potenciales de energía de este tipo. La CFE pone a disposición su infraestructura, así como los requerimientos necesarios básicos para la interconexión. Existen algunos requerimientos básicos para regular la instalación de sistemas de energías renovables a pequeña escala (≤ 10 kW). Los límites permitidos de frecuencia y voltaje para que una fuente de energía distribuida pueda estar interconectado al Sistema Eléctrico Nacional, están en el rango de 59.3 Hz a 60.5 Hz y un desbalance máximo en la tensión nominal del $\pm 5\%$ (CFE, 2012).

Algunas de las características que presentan las fuentes de energías renovables son las variaciones de energía y la intermitencia en su disponibilidad, por lo que estas perturbaciones afectan en la activación de las TGEE y la estabilidad de sus parámetros eléctricos. Sin embargo, al implementar estrategias de control en la demanda, generación y/o almacenamiento es posible mitigar la principal problemática de las TGEE activadas con energías renovables.

Existen diversas estrategias de estabilización y control de la calidad de la energía eléctrica generada por sistemas con motores Stirling activados con energía solar (Disco-Stirling). Para la definición de dichas estrategias es necesario definir si el sistema operará de manera aislada o interconectada, así como si será generación distribuida o centralizada. Sin embargo, todas estas estrategias requieren de algún método o tecnología para la manipulación de la potencia de salida del generador, por lo que en este trabajo de tesis se estudiaron los principales métodos de control de potencia del motor Stirling, que a través de la manipulación de los parámetros termodinámicos determinan la estabilidad y calidad de la energía generada.

1.3 Antecedentes

El motor Stirling fue en 1816 desarrollado por Robert Stirling, con la finalidad de reemplazar los motores de vapor. Sin embargo, dado el desarrollo del motor de combustión interna, el motor Stirling fue rápidamente reemplazado. No obstante, en los 1931 los laboratorios de Philips retomaron los trabajos de investigación y desarrollo de este motor, dada su flexibilidad energética en su activación (Philips 1951). Posteriormente, se desarrollaron varios trabajos de investigación por distintos autores tales como William Beale, Schmidt G., W. Martini, Collin West, G. Walker, Stine WB, Senft JR, entre otros (Beale 1969)(Martini 1983; Stine n.d.; Walker 1980; Walker and Senft 1985; West 1986).

Ya que este motor de combustión externa solo requiere de un diferencial de temperatura en sus intercambiadores de calor para la activación de su ciclo termodinámico, rápidamente fue propuesto y acoplado a tecnologías de concentración solar. Los principales desarrollos son: El sistema Vanguard de 25 kW (Mancini et al. 2003), United Stirling 4-95 Mark II, Distal I y II, el sistema SAIC/STM de 25 kW, el proyecto ADDS con el motor Stirling SOLO 161-V, el sistema PoweDish de la empresa Infinia Corp y el proyecto EuroDish instalado en Odellio, Francia (Singh and Kumar 2018).

Aunque algunos de estos sistemas de generación de energía eléctrica estabilizaban sus parámetros eléctricos a través de la rectificación de la corriente alterna por medio convertidores alterna a directa (inversores eléctricos), otros investigadores apuntaron sus esfuerzos al control de potencia del trabajo de flecha del motor Stirling. Los parámetros termodinámicos comúnmente utilizados para la manipulación de la potencia del motor Stirling se mencionan y describen a continuación:

Control de Temperatura: La cantidad de calor suministrado al motor determina directamente la potencia de salida, por lo que controlar la temperatura del calentador en definitiva controla la potencia del motor. Sin embargo, incrementar o decrementar la temperatura del calentador no es un proceso rápido, debido a la inercia térmica, de este modo se limita la velocidad de respuesta del sistema. Además, variar la temperatura de expansión impacta severamente sobre la eficiencia del sistema, por lo que el motor no operará en sus mejores condiciones todo el tiempo. En 1981 (Almstrom S.H., Bratt C. 1981) se desarrollaron diversas propuestas para el control de temperatura del cabezal del motor United Stirling 4-95 Mark II, obteniendo un estudio de su respuesta transitoria. En 2010 (Howard, Liang, and Harley 2010) se desarrolló un estudio teórico de un control de temperatura del receptor de un Disco-Stirling con un generador de inducción interconectado a la red eléctrica, denotando que la compensación de potencia reactiva es crucial para la estabilización del sistema. En 2014 se introdujo un nuevo esquema de control de temperatura mejorado a partir del análisis de estado estable (Y. Li, Choi, and Yang 2014), en donde se determinó que el estado transitorio es reducido al implementar un controlador. Además, en 2018 (Yang Li, Choi, and Vilathgamuwa 2018) se analizó el efecto que tiene control de temperatura del receptor sobre las perturbaciones en la frecuencia fundamental del voltaje generado. En 2019 (Mohammadnia et al. 2020) se desarrolló un estudio en la controlabilidad de la temperatura de la cavidad de un Disco-Stirling, mejorando el rendimiento en 1.25% al mejorar el desempeño en las horas de baja radiación.

Control de presión media de trabajo: En algunos diseños de motores Stirling para la industria automotriz se utilizó el control de presión, en el cual implementaban una reserva de gas altamente presurizado que podía ser añadido al sistema a través de una válvula. Sin embargo, al introducir fluido en la cámara de trabajo, el desempeño del motor Stirling era altamente afectado, hasta que el fluido alcanzara la temperatura de operación. Posteriormente se estabilizaba el sistema y en caso de ser requerido, el fluido podía ser comprimido y almacenado en la reserva presurizada. En 1982 (Dineen and Durham 1980) se otorgó una patente, en la cual se describe un controlador que provee el balance y el control de la presión hidráulica del fluido, para el arranque del motor Stirling y para la modulación de potencia de salida. En 2017 (Sayapin 2017) se propuso un control para este tipo de sistemas, en donde el hidrogeno era dirigido al reservorio o a la cámara de trabajo controlando la presión media de trabajo.

Variación de la carrera del pistón: La carrera del pistón o del desplazador determina directamente el volumen de trabajo del motor, por lo que la variación de la carrera puede controlar el desempeño del motor. Una carrera pequeña reduce el volumen de trabajo, decrementando la potencia de salida, esto es debido a la reducción de la relación de la presión y el volumen de barrido. Sin embargo, variar físicamente la carrera del pistón requiere que el diseño del motor Stirling sea muy específico, tal es el caso el mecanismo wobble-yoke. En 2010 (Alvarez-Aguirre, García-Canseco, and Scherpen 2010) se desarrolló un sistema de control para un motor cinemático con mecanismo wobble-Yoke, el cual determinaba las condiciones del sistema por medio de la presión del pistón. Además, en 2015 (García-Canseco, Alvarez-Aguirre, and Scherpen 2015) otros investigadores desarrollaron el modelado para un controlador de un motor similar (wobble-Yoke), describiendo geométricamente las variables del sistema y como determinar la zona de oscilación del controlador. En 2016 (Winkelmann and Barth 2016) se diseñó, modelo y validó experimentalmente un motor Stirling presurizado con un desplazador controlado, operando a una presión promedio de 10-20 bar y un temperatura del calentador de 250 °C a 500 °C. En el mismo año (Tavakolpour-Saleh and Jokar 2016), un control basado en redes neuronales fue implementado en un bomba Stirling solar, en donde el desplazador está mecánicamente desacoplado con el pistón de trabajo y es accionado con un motor de corriente directa y su velocidad es determinada por el controlador.

Variación del ángulo de fase: En un motor Stirling la variación del volumen en la zona de expansión y compresión, es debido a la rotación del cigüeñal y como el ángulo de fase separa los pistones. Si el ángulo de fase es 0° el cambio de volumen del gas es máximo, pero el flujo másico es mínimo, entorpeciendo la transferencia de calor de los intercambiadores. Sin embargo, si el ángulo de fase es de 180° el cambio de volumen del gas es mínimo pero el flujo másico es máximo. En el ciclo Stirling ideal la mejor relación entre volumen y flujo másico se logra con un ángulo de fase de 90° . Es decir, que variar este parámetro permite la controlabilidad de la potencia del motor. Similar al mecanismo de variación de carrera del pistón, el mecanismo de variación del ángulo de fase requiere de un diseño muy específico, contenido en el motor desde su construcción. En 1979 (Weenen 1979) se concedió la patente de un controlador de ángulo de fase para motor Stirling, en la que tres piñones acoplados como un diferencial automotriz, determinan el desfase entre el pistón y el desplazador. O bien, en 1998 (Hanes and Gaiser 1998) se otorgó la patente de un actuador eléctrico de plato-oscilante (swash-plate) para la modificación mecánica del ángulo de fase entre

el pistón y el desplazador de motores Stirling. En 1982 (Naomasa Nakajima, Kohji Wada 1982) se propuso un control de ángulo de fase de motores Stirling, implementado un motor a pasos y un codificador rotatorio, en donde la velocidad del cigüeñal es la variable a controlar. En 2019 (Zare, Tavakolpour-Saleh, and Binazadeh 2019) se propuso y desarrollo una técnica de control en un motor Stirling de pistón libre, en la que un controlador basado en algoritmos genéticos determinaba la relación óptima de fase entre el pistón y el desplazador.

Variación de volumen muerto: Se considera el volumen muerto en un motor Stirling a la cantidad de volumen de fluido de trabajo en los espacios muertos del motor, es decir aquel volumen que no produce trabajo alguno (Kongtragool and Wongwises 2005). La masa contenida dentro de los intercambiadores de calor impide que la totalidad de la masa contenida en el motor efectúe los procesos que se requieren. Debido a esto, se define como volúmenes muertos a los volúmenes que contienen fluido de trabajo y que se encuentran fuera de los volúmenes barridos por los pistones, dicho volumen es aproximadamente el 58% del volumen total (Martini 1983). El control de la potencia del motor puede lograrse mediante la variación del volumen donde se aplicará la presión de trabajo, pudiendo agregarse este volumen en los cilindros o en los intercambiadores de calor. Para reducir la potencia, se puede agregar cierto volumen extra al espacio de trabajo con lo cual decrecerá la relación de compresión V_{max}/V_{min} , que al mismo tiempo reduce la amplitud de las variaciones de la presión. En 1978 se realizó un reporte técnico que tenía como objetivo determinar una estimación preliminar del control de volumen muerto y la capacidad de compresión en un sistema de control de potencia híbrido implementado en el motor Stirling 4-215 (Automotive Stirling engine development program 1978). En 2015 se desarrolló un estudio en el Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV) que determinó que la apropiada manipulación del volumen muerto trae consigo una mejora en la eficiencia térmica del motor Stirling (Beltrán-Chacon et al. 2015)

1.4 Hipótesis

Es posible controlar la potencia de un motor Stirling a través de la variación de su volumen muerto y estabilizar sus parámetros termodinámicos y eléctricos.

1.5 Objetivo general

Desarrollar e implementar un controlador de potencia de motor Stirling que logre estabilizar los parámetros termodinámicos y eléctricos, mejorando la viabilidad técnica en la aplicación de Discos-Stirling en la generación de energía eléctrica.

1.6 Objetivos específicos

1. Revisar del estado del arte de motores Stirling, generadores asíncronos y sistemas de control para motores Stirling.
2. Realizar un estudio paramétrico de la maquina térmica para la sensibilización del sistema, así como el del concentrador Scheffler
3. Determinar la controlabilidad del sistema a partir del simulador de segundo orden en estado estable, así como proponer las estrategias de control.
4. Realizar la evaluación operativa del sistema de generación de energía eléctrica Scheffler-Stirling con un controlador de potencia a través de la variación de su volumen muerto.
5. Desarrollar un banco de pruebas experimental de motores Stirling prototipo con un sistema monitoreo y control totalmente funcional.
6. Realizar un estudio experimental de la influencia de la cantidad de volumen muerto sobre el desempeño del sistema Stirling prototipo.
7. Estudiar el estado transitorio del sistema al variar la cantidad de volumen muerto.
8. Desarrollar e implementar un controlador PID que establezca los parámetros termodinámicos y eléctricos del sistema, a partir de la variación del volumen muerto.

1.6 Organización de la tesis

El presente trabajo de estudio parte del análisis comparativo de los datos obtenidos en una simulación numérica y los datos obtenidos de un banco de pruebas, en donde fue caracterizado un motor Stirling con un controlador de volumen muerto extra para la generación de energía eléctrica estable.

Capítulo 1. Es este capítulo se presenta el planteamiento general de la tesis, comprendiendo la problemática y la justificación de este trabajo. Además, se propone la Hipótesis, los objetivos generales y específicos. Se introduce con una perspectiva global de la problemática del control de velocidad/potencia del motor Stirling. Se presenta la propuesta tecnológica para atacar de manera sustentable la generación de energía eléctrica a través de la activación de un motor Stirling solar y la mejora de este sistema a partir de la implementación de un controlador de volumen muerto.

Capítulo 2. Se introducen los principales conceptos de energía y geometría solar, así como una breve introducción a la instrumentación electrónica y los conceptos necesarios para comprender el desarrollo de un sistema monitoreo y control. Partiendo del control clásico se presentan los conceptos de control y estrategias de control. Una descripción detallada del ciclo Stirling a partir de un análisis termodinámico y el principio de operación de un generador eléctrico de inducción.

Capítulo 3. Se presenta una descripción física y operativa del sistema Scheffler-Stirling controlado por volumen muerto, para posteriormente describir los subsistemas que lo comprenden. El motor Stirling es estudiado a partir de un simulador numérico de segundo orden, este es optimizado a partir de una metodología de análisis de pares de variables. Los principales efectos del volumen muerto sobre el sistema son discutidos. Por último, se presenta un estudio comparativo entre distintos modos de implementación de la tecnología propuesta.

Capítulo 4. Se describe el nano-banco de pruebas, desarrollado para la comprobación de la Hipótesis. El diseño, modificación y construcción de los equipos y subsistemas es descrito a detalle, así como la instrumentación electrónica implementada y del desarrollo del sistema monitoreo y control para el nano-banco. Un estudio experimental de sensibilización del sistema es realizado para la caracterización de los parámetros que lo perturban. Por último, se presenta la operación el controlador de potencia del motor Stirling a través de la variación del volumen muerto.

Capítulo 5. En este capítulo se plasman las conclusiones generales de la propuesta tecnológica y sus modos de implementación, así como de los estudios experimentales realizados. Además, se presentan como trabajos futuros aquellas ideas que surgieron en el transcurso de este trabajo de tesis, así como las recomendaciones para los investigadores de esta área de interés.

Capítulo 2 Fundamentos teóricos

Se introducen los principales conceptos de energía y geometría solar, así como una breve introducción a la instrumentación electrónica y los conceptos necesarios para comprender el desarrollo de un sistema monitoreo y control. Partiendo del control clásico se presentan los conceptos de control y estrategias de control. Una descripción detallada del ciclo Stirling a partir de un análisis termodinámico y el principio de operación de un generador eléctrico de inducción.

2.1 Fundamentos de energía solar

El sol es la fuente de energía renovable más prometedora de todas, con la cual se activan diversas tecnologías. La radiación solar es la energía electromagnética emitida por los procesos de fusión del hidrógeno contenido en el sol; dicha energía no alcanza la superficie terrestre de modo constante, su cantidad varía durante el día, de estación a estación y depende de la nubosidad, del ángulo de incidencia y de la reflectancia de las superficies.

Energía solar y sus parámetros.

La radiación o irradiancia solar que llega a la superficie externa de la atmosfera es llama radiación extraterrestre, la porción de energía que entra a la atmosfera es llama radiación global, la cual está constituida por la radiación directa y radiación difusa. La radiación directa es aquella llega en línea recta o sin cambios de dirección, pero si esta sufre de algún cambio de dirección se le nombra radiación difusa.

Geometría Solar

La geometría solar permite determinar la posición del sol dentro de un marco de referencia geográfico, a partir de la implementación de las siguientes variables:

Latitud: es la ubicación angular norte o sur del ecuador $-90^{\circ} \leq \varphi \leq 90^{\circ}$.

Declinación: es la posición angular del sol al medio día con respecto al plano del ecuador, $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$. La declinación de la tierra con respecto al sol es determinada por la ecuación 2, en donde el día debe ser expresado como el día Juliano.

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + \text{días}}{365} \right) \quad (1)$$

Ángulo de incidencia: es el ángulo entre la radiación directa en una superficie y la recta normal de la superficie. Cuando el rayo índice de manera normal a la superficie, el ángulo de incidencia es cero, $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

Ángulo horario: es el desplazamiento angular del sol este u oeste a partir del meridiano local, debido a la rotación de la tierra sobre su eje. La trayectoria aparente del sol se mueve 15 grados cada hora por lo que el ángulo horario está definido en la ecuación, en donde *hrs* es la hora solar en formato 24 h.

$$\omega = 15 (\text{hrs} - 12) \quad (2)$$

Ángulo azimutal: es la desviación de la proyección solar en la horizontal de la norma de un plano hacia la superficie desde el meridiano local. Este ángulo esta referencia en el sur, con valores negativos hacia el este y positivos hacia el oeste; $-180^\circ \leq \psi_{sun} \leq 180^\circ$. Es ángulo puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$\psi_{sun} = \arcsin \left(\frac{\cos \delta_{sun} \sin \omega}{\cos \alpha_{sun}} \right) \quad (3)$$

Altura Solar: este ángulo se a partir de la posición del sol con la proyección en la superficie. Tiene valores positivos cuando el sol esta sobre la superficie (día) y negativos cuando está por debajo (noche); $-90^\circ \leq \alpha_{sun} \leq 90$. Por lo que, el cálculo de la altura solar puede ser expresado como:

$$\alpha_{sun} = \arcsin(\sin \delta_{sun} \sin \varphi + \cos \delta_{sun} \cos \varphi \cos \omega) \quad (4)$$

2.2 Concentradores Parabólicos

Diversas tecnologías han sido desarrolladas para la captación de la energía solar, las cuales difieren en su geometría y niveles de temperatura. En la Tabla 2.1 se presentan algunas de las tecnologías de captación y concentración solar comúnmente implementadas, en donde la temperatura alcanzada determina su propósito (Kalogirou 2003). A pesar de que los concentradores tipo Heliostatos alcanzan temperaturas muy elevadas, su principal aplicación radica en instalaciones de torre central, necesitando un gran espacio geográfico para su implementación. Sin embargo, los

discos parabólicos son idóneos para la activación de motores Stirling, como se mencionó anteriormente.

En la Figura 2.1 se muestran dos sistemas de generación de energía eléctrica con Disco-Stirling, se denota que el centro del disco parabólico carece de superficie o material reflectante (Singh and Kumar 2018). Este hueco está determinado por la sombra que el motor Stirling proyecta hacia la superficie reflectante, ya que este se interpone en el área de apertura. Es decir, los discos parabólicos presentan problemas de sombreado recurrente. Además, debido a la naturaleza de la geometría parabólica el sistema debe contar con un seguimiento solar en dos ejes, ya que es necesario que el rayo incidente debe de colocarse de manera normal (perpendicular) al área de apertura para que se realice correctamente la concentración de la energía al punto focal. Sin embargo, para que esto se lleve a cabo es necesario que el mismo punto focal siga el sol, por lo que el motor Stirling debe realizar dicha trayectoria, exigiendo más energía a los motores del seguimiento solar.

Tabla 2.1. Tipos de captadores de energía solar y sus características.

Mov.	Colector	Absorbedor	Concentración	Temperatura (°C)
Estacionario	Placa plana (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubos Evacuados (ETC)	Plano	1	50-200
	Cilindro parabólico (CPC)	Tubular	1-5	60-240
1 eje	Cilindro parabólico (CPC)	Tubular	5-15	60-300
	Reflector Fresnel lineal (LFR)	Tubular	10-40	60-250
2 ejes	Helióstato (HFC)	Puntual	300-1500	150-2000
	Disco parabólico (PDR)	Puntual	600-2000	100-1500



Figura 2.1. Sistemas de generación eléctrica Disco-Stirling: a) Sistema ADDS, b) Proyecto EuroDish.

Por otra parte, en 1986 Wolfgang Scheffler desarrollo un concentrador solar para cocción de alimentos, la geometría de este disco parte de la sección de un disco parabólico como se muestra en la Figura 2.2a (Kumar, Prakash, and Kaviti 2017). Además, en la Figura 2.2b se presenta una cocina solar activada con disco Scheffler de foco fijo, en donde se muestra como el absorbedor (cocina) no proyecta sombreado a la superficie reflectora del concentrador solar (Munir, Hensel, and Scheffler 2010). El eje 1 realiza el giro en seguimiento del ángulo horario del sol, en cambio, el eje 2 es el encargado del seguimiento de la altura solar o de la declinación.

Por otra parte, al igual que el disco parabólico convencional, el concentrador tipo Scheffler ha sido propuesto para la activación del motor Stirling implementado para la generación de energía eléctrica (Ruelas, Velázquez, and Cerezo 2013). En dichos estudios se ha determinado que la implementación del disco Scheffler elimina el efecto de sombreado en la superficie reflectiva, los requerimientos de energía del sistema de seguimiento disminuyen al dejar al motor Stirling en el foco fijo y que la posición del foco fijo influye directamente sobre las pérdidas térmicas por convección en la cavidad del receptor (Carrillo Caballero et al. 2017).

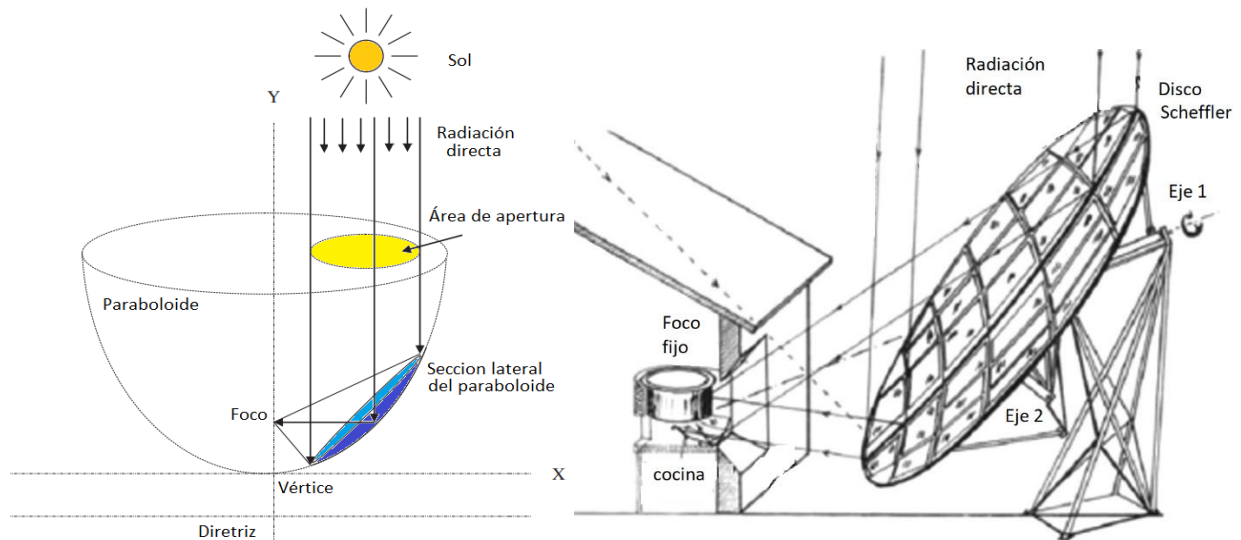


Figura 2.2. Concentrador tipo Scheffler: a) Geometría, b) aplicación de foco fijo.

2.3 Teoría de Control e Instrumentación

Fundamentos y conceptos de control

Es necesario la introducción de ciertos conceptos básicos de control para el entendimiento de los sistemas y metodologías que se verán a continuación.

Variable controlada y variable manipulada (señal de control): La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado.

Planta: Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. En este libro se llamará planta a cualquier objeto físico que se va a controlar.

Procesos: Operación o desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado. En este libro se llamará proceso a cualquier operación que se va a controlar. Algunos ejemplos son los procesos químicos, económicos y biológicos.

Sistemas: Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

Perturbaciones: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada.

Control realimentado: El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema.

Control Todo o Nada

En este tipo de controladores solo se tiene dos estados: Activado y desactivado. Activado también corresponde a los estados SI, conectado, todo, encendido (ON) según la literatura, así como el estado de desactivado corresponde a NO, desconectado, nada, apagado (OFF). Este controlador responde a una señal de error positiva con un estado de salida de activado y a una señal de error negativa con estado de salida de desactivado, o vise-versa según sea su propósito.

Control PID

Los controladores proporcionales-integrales-derivativos (PID) han mostraron ser robustos en la aplicación industrial. La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza también limita el rango de plantas para su aplicación. En la Figura 2.3 se muestra un esquema básico de un controlador PID.

En donde $e(t)$ es el error generada por la diferencia de la señal de referencia y la de salida del proceso. $K_p e(t)$ es la sección proporcional, en la que se determina el producto de la señal de error y la constante proporcional. $K_i/T_i \int_0^t e(t)dt$ es la sección de integración, en la cual se va acumulando (sumando) los valores pasados con los valores actuales de la señal de error, por lo que si la salida proporcional no es suficiente para disminuir la señal de error, la sección integral realiza un esfuerzo extra para lograrlo. Además, $K_p T_d \frac{d(e(t))}{dt}$ es la sección derivativa y está encargada de determinar la razón de cambio de la señal de error, con la finalidad de realizar la convergencia de la señal de referencia.

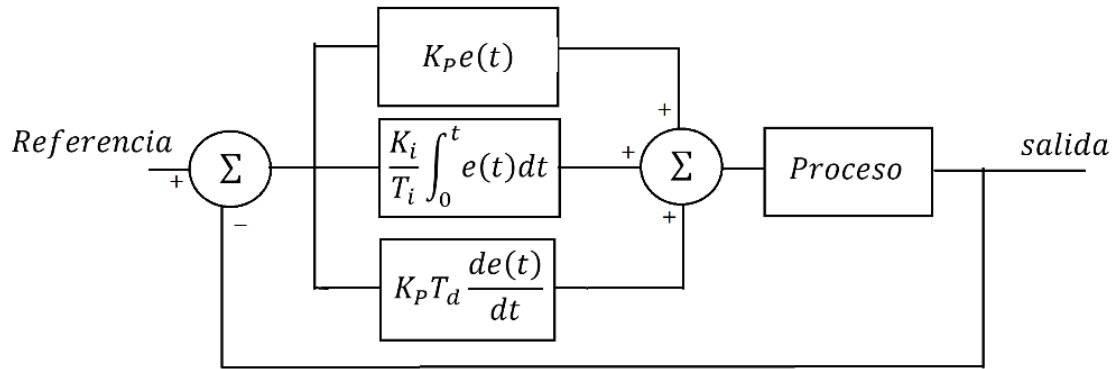


Figura 2.3 Estructura de un controlador PID.

La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Instrumentación electrónica y sistema de monitoreo y control

La instrumentación electrónica se encarga de la medición de cualquier tipo de magnitud física y su conversión a magnitudes eléctricas, así como el tratamiento o acondicionamiento de las señales para proporcionar la información para un sistema de control o una persona. La instrumentación electrónica es aplicada cuando se utiliza un transductor para alimentar un sistema de adquisición de datos y/o control.

En la Figura 2.4 se muestra un esquema con la arquitectura básica de un sistema de monitoreo y control, en donde se indica que el usuario tiene acceso a la visualización de los parámetros y cálculos del proceso. Además, el usuario puede modificar puntos de consignas y manipular la botonera para controlar el proceso por medio de actuadores. El sistema de proceso es el software encargado de gestionar la información y la realización de los cálculos, por lo que la información puede ir al usuario, al actuador y/o al actuador electromecánico, o bien, al sistema de almacenamiento de datos. Los sensores son los encargados de transformar las magnitudes físicas a señales eléctricas, de este modo el sistema presenta sus parámetros físicos al sistema de proceso, el cual utilizará dicha información. Por último, el sistema es aquel proceso que se desea supervisar y controlar como, por ejemplo; un banco de pruebas, línea de producción industrial, plantas de generación eléctrica, etc.

En los procesos industriales los parámetros físicos comúnmente supervisados son: temperatura, presión, posición, corriente eléctrica y la velocidad. Dichos parámetros también son los que se suelen manipular a través de un actuador para el control del sistema.

Los sensores de temperatura más utilizados en las industrias son aquellos cuyo transductor convierte el parámetro de interés a una señal de eléctrica, como lo son los termopares y los RTD (Detectores con resistencia térmica). Los termopares son construidos a partir de materiales conductores diferentes y unidos en un extremo, los cuales debido a la temperatura generan una pequeña diferencia de potencial eléctrico (Voltaje), el cual es proporcional a la temperatura y debe ser amplificada para su implementación. Los RTD están constituidos por una resistencia que cambia su magnitud (ohm) en función de la temperatura a la cual se encuentra sometida. Estos requieren de un suministro de corriente eléctrica para la detección de los cambios en la magnitud del elemento resistivo.

Por otra parte, los interruptores mecánicos y opto eléctricos, codificadores rotativos, sensores ultrasónicos y capacitivos son utilizados para interpretar la posición de los objetos. La velocidad es la magnitud que interpreta el desplazamiento de un objeto en un lapso determinado, por lo que es necesario implementar sensores de posición, contadores de tiempo y un algoritmo para determinar el cociente entre desplazamiento y tiempo.

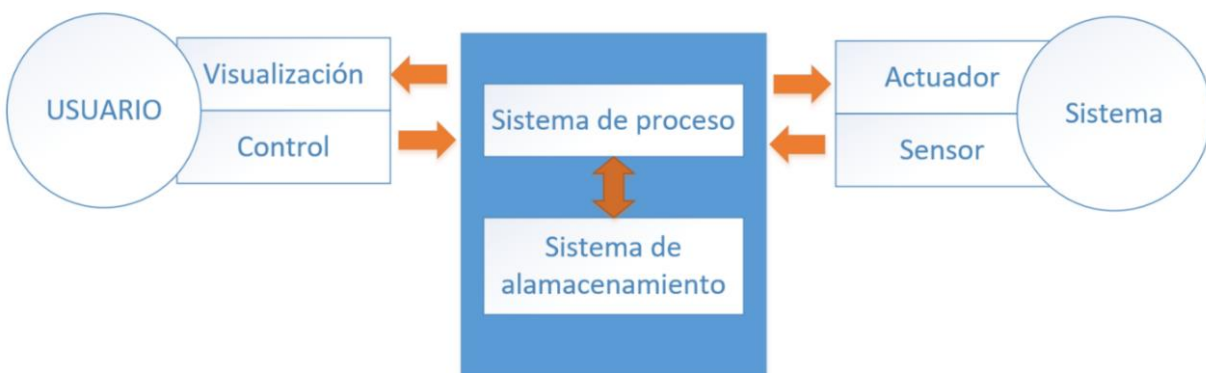


Figura 2.4 Arquitectura básica de un sistema monitoreo y control.

La presión es un parámetro que requiere un análisis más específico, ya que existen tres métodos para medir presión: absoluta, manométrica y diferencial. La presión absoluta está relacionada con la presión en forma aislada, en tanto que las presiones manométrica y diferencial están relacionadas con otra presión como atmosférica ambiental o la presión en un contenedor adyacente. Existe una variedad de diseños de sensor de presión debido a las diferentes condiciones, rangos y materiales de medida usados en la construcción del sensor. Los tipos comunes de sensor de presión son sensores basados en puente, amplificadores o piezoeléctricos (Thombare and Verma 2008).

2.4 Tecnología del motor Stirling

El motor Stirling es capaz de convertir el calor en trabajo mecánico dentro de un ciclo termodinámico regenerativo de un fluido compresible. Esta máquina térmica es denominada como un motor de combustión externa cuya eficiencia ideal es dictada por la eficiencia de Carnot. Sus límites térmicos de operación dependen del material utilizado en su construcción, en donde el calentador y enfriador son sometidos a temperaturas de 923 y 338 K respectivamente (Walker 1980). Con eficiencias de hasta el 40% para temperaturas de 1073 K con rangos superiores a las 3000 rpm (Stine 1980).

Componentes y configuración

El motor Stirling y los sistemas de concentración solar se han ido desarrollando de manera muy independiente entre ellos. Aun cuando las configuraciones sean diversas, estas contienen los componentes esenciales que permiten el correcto funcionamiento de este, como lo son:

Calentador: intercambiador de calor que permite que el gas de trabajo gane energía y pueda expandirse generando trabajo de frontera en el pistón. Este intercambiador está expuesto a temperaturas mayores de 650 °C y presiones máximas de 9MPa en motores de alto diferencial de temperatura. Debido a las condiciones de operación de este componente es necesario implementar metales con altos puntos de fusión y que soporte altos esfuerzos permisibles.

Regenerador: elemento que debido a su inercia térmica permite el intercambio de energía entre el proceso de expansión-calentamiento y el proceso de enfriamiento-compresión.

Enfriador: este intercambiador de calor permite retirar energía del gas de trabajo con el fin de comprimirlo y reintegrarlo al calentador, completando así el ciclo Stirling. La temperatura de sumidero es la del ambiente.

Convertidor de energía: en este sistema se le llama así al mecanismo capaz de transformar la expansión y compresión del gas en un movimiento mecánico, generalmente el mecanismo biela-manivela, rómbico, wobble-yoke o yugo de Ross.

Fluido de trabajo: gas que se expande y comprime dentro del volumen de trabajo, los más comunes son: hidrógeno, helio, nitrógeno y aire.

Ciclo termodinámico Stirling

El ciclo teórico ideal está constituido por cuatro procesos como se muestra en la Figura 2.5, el diagrama P-V permite identificar las presiones máximas y mínimas como a su vez las temperaturas y volúmenes de trabajo.

Proceso (1-2): Compresión isotérmica; partiendo del máximo volumen de trabajo y la mínima temperatura se logra el mínimo el volumen de trabajo debido a inercia que lleva en el mecanismo de conversión mecánica, en donde el fluido de trabajo es comprimido con gran facilidad por su baja temperatura. En este proceso es necesario extraer calor del fluido para mantener el proceso de compresión de manera isotérmica.

Proceso (2-3): Calentamiento isocórico; el fluido de trabajo tiene el mínimo volumen y le es agregado calor desde el regenerador en el proceso (2-3'). En el proceso (3'-3) se le sigue suministrando calor por medio de una fuente externa llevándolo a la temperatura máxima de trabajo.

Proceso (3-4): Expansión isotérmica; se logra el máximo volumen debido a la expansión que sufre el fluido de trabajo por el calor agregado desde el calentador. Esta expansión es convertida a trabajo neto por el mecanismo de conversión mecánica. Para mantener este proceso es necesario seguir añadiendo calor al fluido de trabajo permitiendo que la expansión sea isotérmica.

Proceso (4-1): Enfriamiento isocórico; una vez alcanzado el máximo volumen de trabajo a la máxima temperatura, el calor del proceso (4-1') es retirado del fluido por el regenerador y el calor

liberado en el proceso (1'-1) debe ser retirado por un sumidero externo llevándolo a temperatura y presión mínimas.

Sin embargo, el proceso termodinámico real a sido discutido por distintos investigadores, quienes cada uno sugiere una metodología o modelo para determinar el comportamiento del desempeño del motor Stirling. West (West 1986) propuso un modelo de orden cero, el cual a partir de cuatro parámetros como la presión promedio, volumen de barrido, frecuencia del motor y el número de Beale, determinaba la potencia neta del motor Stirling. Posteriormente, el modelo de primer orden está basado en balances termodinámicos de energía y masa, el cual también es llamado simulador de primer orden (Hirata and Iwamoto 1999). Los modelos o simuladores de segundo orden incluyen los balances de energía y masa, pero además añaden distintas pérdidas de energía, por ejemplo; de calor en la zona de expansión, en los cilindros, caídas de presión en los intercambiadores, fricción mecánicas, convección en el calentador, entre otras (Babaelahi and Sayyaadi 2015)(Tlili and Musmar 2013a). Y por último, los modelos de tercer orden parten del modelo de segundo orden y añaden el análisis dinámico de fluidos (CFD), por lo que los requerimientos de cómputo son elevados (Almajri, Mahmoud, and Al-Dadah 2017). A continuación, en la Tabla 2.2 se presenta un listado de los diversos modelos matemáticos del motor Stirling y su descripción.

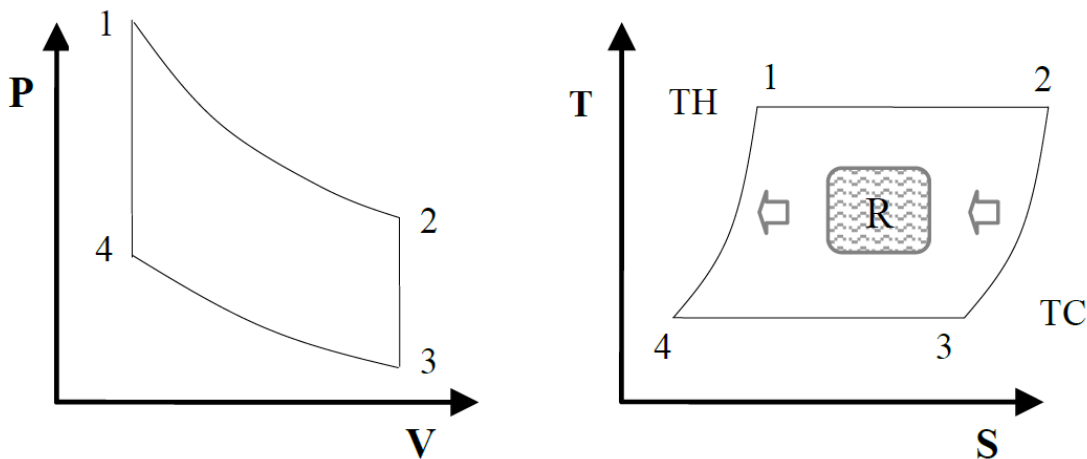


Figura 2.5. Ciclo termodinámico ideal Stirling.

Tabla 2.2. Modelos recientes para determinar el desempeño del motor Stirling.

Autores	Tipo de motor	Orden	# de variables	Descripción del estudio
(Walker and Senft 1985)	-----	0	4	Modelo heurístico para obtener la potencia neta.
(Urieli 1977)	-----	1	+ 15	Un trabajo de tesis para obtener la potencia neta y el comportamiento de un motor Stirling usando el análisis termodinámico de Schmidt.
(Kongtragool and Wongwises 2006)	-----	1	+ 25	Un análisis teórico de la termodinámica del ciclo de Stirling con influencia del volumen muerto para explicar cómo la variación del volumen muerto afecta a la potencia neta.
(Scollo, Valdez, and Barón 2008)	α	1	+15	Diseño y construcción de un motor Stirling con un bloque compresor que explora diferentes temperaturas de compresión dentro de un proceso de enfriamiento.
(Roldan, Pieretti, and Solorzano 2010)	γ	1	+15	Un diseño conceptual y básico de un prototipo de motor Stirling utilizando un ciclo Stirling ideal.
(Tlili and Musmar 2013b)	γ	2	+40	Una evaluación termodinámica de un motor solar Stirling con mecanismo de yugo de Ross.
(Ahmadi et al. 2013)	α	2	+50	Un diseño de un sistema solar Stirling, simulación y análisis térmico integrado en un programa de diseño de platos solares aplicado a SOLO 161V.
(W. Chen, Yang, and Salazar 2015)	γ	3	+50	Un estudio paramétrico de CFD sobre el rendimiento de un motor Stirling de baja temperatura-diferencial de tipo gamma.
(Jan and Marek 2016)	-----	2	+20	Un enfoque de modelo de segundo orden para un análisis de CFD usando un mecanismo de Ross-Yoke.
(R. Li, Grosu, and Li 2017)	β, γ	2	+20	Un modelo politrópico para predecir el rendimiento de un motor Stirling explorando las variables de operación.
(Shendage, Kedare, and Bapat 2011)	β	2	+30	Un estudio teórico y experimental de un motor de mecánica róbica con hidrógeno como fluido de trabajo; se exploró el ángulo del cigüeñal para su optimización.
(Shendage, Kedare, and Bapat 2017)	β	2	+30	La carrera del pistón, el diámetro del cilindro, el diámetro y la longitud del regenerador, el volumen muerto del calentador y del refrigerador se exploraron de forma individual para su optimización.

2.5 Generadores eléctricos

En un generador de corriente continua, un interruptor mecánico en la flecha del rotor rectifica la corriente de salida. En un generador de corriente alterna, el rotor induce corrientes eléctricas en el devanado del estator. Los grandes generadores en las centrales eléctricas modernas son de corriente alterna, proporcionan la energía eléctrica para la transmisión y la distribución. El suministro principal de energía suele incluir el uso de combustibles convencionales (fósiles). Sin embargo, algunos generadores de energía eléctrica utilizan formas alternativas de energía como la

hidráulica, solar, eólica, etc. Convencionalmente se utiliza el modelo de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en corriente alterna.

Principio de operación

La generación de energía eléctrica a través de los generadores es posible gracias a la relación que existen entre el magnetismo y la corriente eléctrica, como lo muestran las leyes de Maxwell. Los generadores cuentan con dos secciones fundamentales para su funcionamiento, los cuales son el rotor y el estator. Cuando el rotor que está unido a la flecha del generador gira, este rompe con las líneas de fuerza magnéticas que existen en el estator, induciendo una corriente eléctrica en el embobinado de este. Por lo que, el generador permite la transformación de energía mecánica a energía eléctrica. A pesar de que el fenómeno es el mismo en los diversos tipos de generadores, el proceso del funcionamiento difiere según el arreglo de los componentes.

Generador de imanes permanentes.

Los generadores de campo de magnético permanente (PMG) ha sido mayormente aceptados en los últimos años, por su fiabilidad, la eliminación del riesgo de desmagnetización en condiciones de fallo, su alta relación de potencia-volumen y bajos costos. En estos generadores el embobinado del rotor o del estator son reemplazado por imanes permanentes, manteniendo un campo magnético constante con el cual se inducirá una corriente en el embobinado del otro componente. Sin embargo, la desventaja de estos generadores es que la excitación no se puede variar y por lo tanto la tensión de salida del generador variará con la carga y con la energía mecánica suministrada.

Generador de inducción.

Durante las últimas décadas, ha habido un incremento en el uso de generadores de tipo de inducción de jaula de ardilla, particularmente en los sistemas de energía eólica y sistemas de energía de micro hidroeléctricas. La red eléctrica proporciona la regulación de frecuencia y de tensión, así como la potencia reactiva requerida por el generador. En rangos de 3 kW los motores monofásicos de inducción se pueden adaptar para el funcionamiento del generador siendo más económicos que el uso de máquinas de inducción trifásicos. Con un esquema de equilibrio de fase adecuado los generadores de inducción trifásicos pueden operar satisfactoriamente en una red de una sola fase. Capacitores, bobinas y resistencias pueden ser utilizados para establecer equilibrio.

Cuando la conexión a red está fuera de alcance se desarrollan sistemas aislados (Holland 1989), donde uno o más generadores de inducción energizan un pequeño número de cargas. La ausencia de la red implica que la potencia reactiva tiene que ser proporcionada localmente por un banco de condensadores, entrando en modo de auto excitación. En estos casos, tanto la tensión de salida y la frecuencia depende de la carga conectada y variarán en gran medida con los cambios de carga o de la velocidad en el primo motor. El control de frecuencia y control de tensión son dos aspectos operativos importantes para los sistemas de suministro eléctrico autónomo. Además, la elección de los valores apropiados del banco de capacitores de excitación para asegurar el éxito acumulación de tensión, y para mantener la tensión cuando el generador está suministrando la carga, es de suma importancia.

La operación monofásica de los generadores de inducción trifásicos, con o sin equilibrador de fase, significa que la máquina funciona con desequilibrio de fase. Para el generador de inducción conectada a la red, el voltaje y la frecuencia son constantes, por lo tanto, el análisis se puede llevar a cabo utilizando el método de componentes simétricos (Brown and Butler 1953). Sin embargo, con el generador de inducción auto excitado el análisis de rendimiento se complica por la variación de frecuencia, así como la reactancia de magnetización, ambos dependientes de estar en las condiciones de velocidad y carga.

Capítulo 3 Estudio y Diseño de la propuesta tecnológica

Se presenta una descripción física y operativa del sistema Scheffler-Stirling controlado por volumen muerto, para posteriormente describir los subsistemas que lo comprenden. El motor Stirling es estudiado a partir de un simulador numérico de segundo orden, este es optimizado a partir de una metodología de análisis de pares de variables. Los principales efectos del volumen muerto sobre el sistema son discutidos. Por último, se presenta un estudio comparativo entre distintos modos de implementación de la tecnología propuesta.

3.1 Descripción física y operativa del sistema

El sistema propuesto para la generación de energía eléctrica a partir del recurso solar consta de los siguientes subsistemas de; Concentración Solar, Conversión de energía térmica a mecánica, control de potencia y conversión de energía mecánica a eléctrica como se muestra de manera esquemática en la Figura 3.1.

La radiación directa emitida por el sol impacta sobre el concentrador solar tipo Scheffler, el cual refleja un alto porcentaje de esta energía al punto focal. La geometría del concentrador utilizado tiene un compromiso con el sistema de seguimiento, con el cual permite que el punto focal este fijo sin importar la posición del disco. En el punto focal se encuentra la cavidad receptora con el calentador del motor Stirling, dicha cavidad disminuye las pérdidas de calor por convección en el calentador. El calentador del motor Stirling recibe la radiación reflejada del concentrador, la cual incrementa la temperatura de la superficie del calentador, debido a la alta absorbancia óptica del material. Dicho incremento de temperatura presenta un gradiente hacia el interior del calentador y el ambiente, el calor al interior es considerado calor útil y el calor hacia el exterior es considerado pérdidas de calor por radiación y convección. El calor útil es transferido de la superficie del calentador al fluido de trabajo del motor Stirling, de este modo incrementa su temperatura y presión. Una vez alcanzados y estabilizados los parámetros termodinámicos de arranque, el motor Stirling es activado con un arrancador electromecánico.

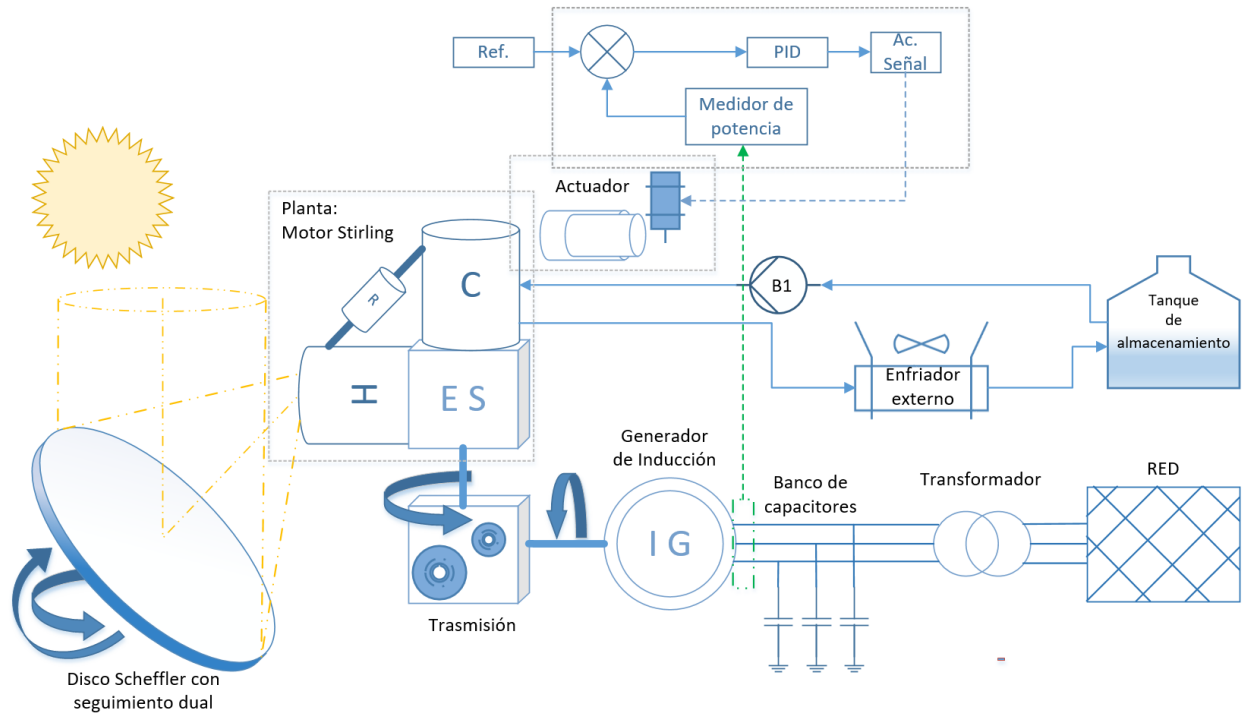


Figura 3.1 Sistema de generación de energía eléctrica solar, Scheffler-Stirling.

Al activarse el motor Stirling, el ciclo comprende los siguientes procesos:

Ingreso del calor útil; al desplazarse el pistón de expansión, el fluido de trabajo con baja temperatura y presión presenta gradiente térmico con la superficie interna del calentador, permitiendo la transferencia de calor entre ellos. El fluido de trabajo incrementa su temperatura y presión.

Generación de trabajo mecánico; A partir de la inercia del desplazamiento del pistón y el incremento de presión del fluido de trabajo, el pistón mantiene su desplazamiento hacia el punto muerto inferior. El desplazamiento del pistón incrementa el volumen en la zona de expansión incrementa, de este modo proceso de ingreso del calor útil es continuo, manteniendo una alta temperatura del fluido de trabajo hasta este punto. El desplazamiento lineal del pistón es convertido a movimiento rotacional por el mecanismo biela-manivela.

Retiro de calor residual; una parte del trabajo mecánico es utilizado para desplazar el pistón de compresión, disminuyendo el volumen interno, incrementando la presión y temperatura del fluido de trabajo. De manera continua con el desplazamiento de este pistón, se retira calor del fluido de trabajo en la zona de compresión, en donde el fluido puede ser comprimido más fácilmente a baja

temperatura. El fluido de trabajo queda a alta presión y baja temperatura, de este modo puede iniciar el ciclo una vez más. El retiro de calor es realizado por intercambiador de tubos y coraza, cuyo refrigerante (agua) es bombeado desde un tanque de almacenamiento hasta el enfriador del motor. A la salida del enfriador el refrigerante pasa por un enfriador externo (auxiliar) y es retornado al tanque de almacenamiento.

El trabajo de flecha generado en el motor Stirling es acoplado a una transmisión, la cual incrementa el número de revoluciones para el acoplamiento del generador de inducción. El trabajo ingresado al eje del generador de inducción presenta el movimiento del rotor, el cual debe estar previamente excitado por el banco de capacitores por potencia reactiva. El rotor en su movimiento giratorio rompe las líneas magnéticas del estator de manera asíncrona, generando energía eléctrica. Los parámetros eléctricos de la energía producida dependen de las revoluciones del primo motor (motor Stirling), estos son verificados por sensores.

Los sensores de voltaje y corriente determinar los parámetros eléctricos en función del tiempo, estas señales son enviadas al sistema de control. El sistema de control PID determina una señal de salida que es enviada al actuador de volumen muerto, de este modo se agrega o disminuye la cantidad de volumen muerto en el sistema. Si la potencia generada es muy alta, la cantidad de volumen muerto es incrementada, si la potencia es muy baja, la cantidad de volumen muerto es decrementada, cerrando el lazo de control. Por último, la energía eléctrica producida es enviada a un transformador que interconecta el sistema de generación eléctrica y la red eléctrica nacional.

3.2 Concentrador Scheffler de foco fijo.

Se estudiaron los límites de los parámetros mecánicos de los ejes del subsistema de seguimiento del disco Scheffler, ya que un seguimiento no apropiado añadirá perturbaciones al motor Stirling y a la energía eléctrica generada. El concentrador de foco fijo cuenta con dos ejes de movimiento los cuales puede posicionar el plano del área de apertura de manera perpendicular los rayos incidentes del sol (radiación directa), para reflejar y concentrar la energía en el foco. Se propuso el ángulo medio de interceptación ($\Theta_{int p}$) como la principal variable que describe la geometría del disco Scheffler.

Por otra parte, el ángulo del eje que permite el seguimiento de la declinación de sol o de la altura solar, y es nombrado ξ_D . Este ángulo es cero cuando el eje del Θ_{int} es normal a la superficie de la

ubicación de la instalación y la magnitud de este varía entre -180 a 180 grados como se muestra en la Figura 3.2a. El ángulo del eje que realiza el seguimiento del ángulo horario o del ángulo azimutal es nombrado ξ_w , el cual es paralelo a eje proyectado por Θ_{int} .

El concentrador debe ser colocado sobre el eje Norte-Sur para llevar a cabo seguimiento al sol y concentrar la energía en el punto focal, el cual se encuentra en una posición fija por la configuración específica de los ejes de seguimiento. Sin embargo, el seguimiento del disco depende de la trayectoria aparente del sol, latitud (ϕ) de su ubicación y los límites mecánicos del sistema en relación de Θ_{int} . A continuación, se presenta el modelo matemático que relaciona los parámetros geométricos y ópticos del disco Scheffler para determinar su operación.

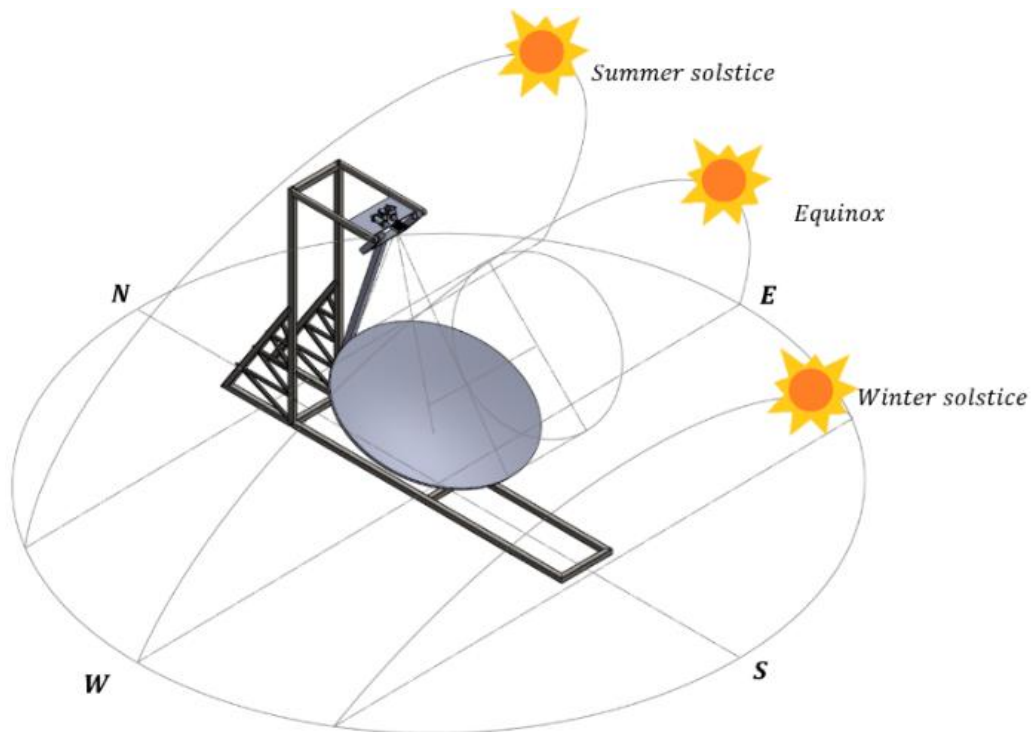


Figura 3.2. Sistema de concentración solar Disco-Scheffler; a) seguimiento en dos ejes con orientación al sur, b) parámetros opto geométricos del sistema.

Modelo matemático del disco Scheffler

Para la selección del ángulo de interceptación medio debe ser tomado en cuenta las pérdidas coseno, las cuales permanecen constantes debido a la geometría rígida y el seguimiento dual del disco (Figura 3.3a). Estas pueden ser estimadas por la relación:

$$\%A_{ef} = \frac{D_{AP}}{D_{disc}} \quad (6)$$

En donde el área efectiva puede estimar la relación entre la cantidad de material utilizado para la construcción del disco y el área de apertura. Esta es 1 cuando la el plano del disco es totalmente paralelo al plano del área de apertura y es 0 cuando estos planos son ortogonales.

Para la selección correcta del diámetro del disco se formuló un indicador que es determinado por la relación del diámetro del disco D_{disc} y la distancia focal P_f .

$$Disc_{ratio} = \frac{D_{disc}}{P_f} \quad (7)$$

Dada la esfericidad y gran tamaño del sol, los rayos incidentes deben ser analizados como imágenes réplicas del sol. Como se aprecia en la Figura 3.3b, el ángulo ε es el responsable de la ampliación de la imagen solar y por ende, de la disminución de concentración.

$$W_n = 2 P_f \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \quad (8)$$

El parámetro de concentración es la relación entre el área de apertura y el área de la imagen solar proyectada en el foco, dicha imagen solar determina el área de receptor.

$$Cc = \frac{D_{Ap}^2}{W_n^2} \quad (9)$$

Como se mencionó anteriormente, el concentrador tiene dos ejes para el seguimiento solar; el eje de altura solar o declinación y el de ángulo horario. El subsistema fue distribuido en el espacio xyz para determinar la relación que existe entre los ángulos de los ejes mecánicos con los ángulos que describen la trayectoria del sol.

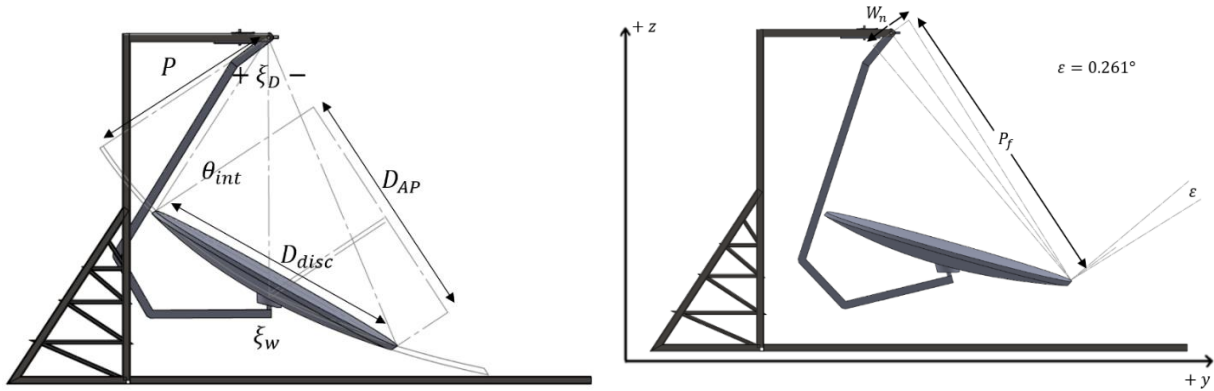


Figura 3.3. Afectación del ángulo subtendido del sol en la imagen solar en el receptor.

En la Figura 3.4a se observa el plano YZ, en donde la trayectoria del área de apertura es trazada como una línea recta de la forma $z = my + b$, en donde Z_0 corresponde a la posición mínima determinada por $\omega = 0$ proyectando a Y_0 , Z_m corresponde a $\omega = \pm 90$ proyectando a Y_m y Z_1 resulta de $\omega = \pm 180$. Por lo que se deducen las siguientes ecuaciones en función de ξ_D y θ_{int} :

$$Z_0 = \sin(\theta_{int} - 90 - \xi_D) \quad (10)$$

$$Y_0 = \cos(\theta_{int} - 90 - \xi_D) \quad (11)$$

$$Z_1 = \sin(\theta_{int} - 90 + \xi_D) \quad (12)$$

$$Y_1 = \cos(\theta_{int} - 90 + \xi_D) \quad (13)$$

$$Y_m = \frac{Z_m - b}{m} \quad (14)$$

El valor resultante de Y_m determina el punto origen para análisis del ángulo azimutal, por lo que debe prestar una atención especial. Dado que el radio hipotético es unitario, entonces la altura solar está determinada simplemente por la magnitud de Z . Resolviendo la recta de valores Z en función de las proyecciones en Y y la relación trigonométrica con el ángulo del eje horario, se puede expresar que la altura solar es:

$$\alpha_{mec}(\pm\omega) = \pm \arcsin([Y_1 + Y_m(1 + \cos \xi_w)] m + b) \quad (15)$$

En la Figura 3.4b se presenta el disco Scheffler en su perspectiva del plano XY para encontrar el ángulo azimutal, se puede observar como el movimiento circular plasmado por el eje de seguimiento horario es proyectado en forma de una elipse para todo $\xi_D \neq 0$ y siendo circular solo para $\xi_D = 0$ únicamente.

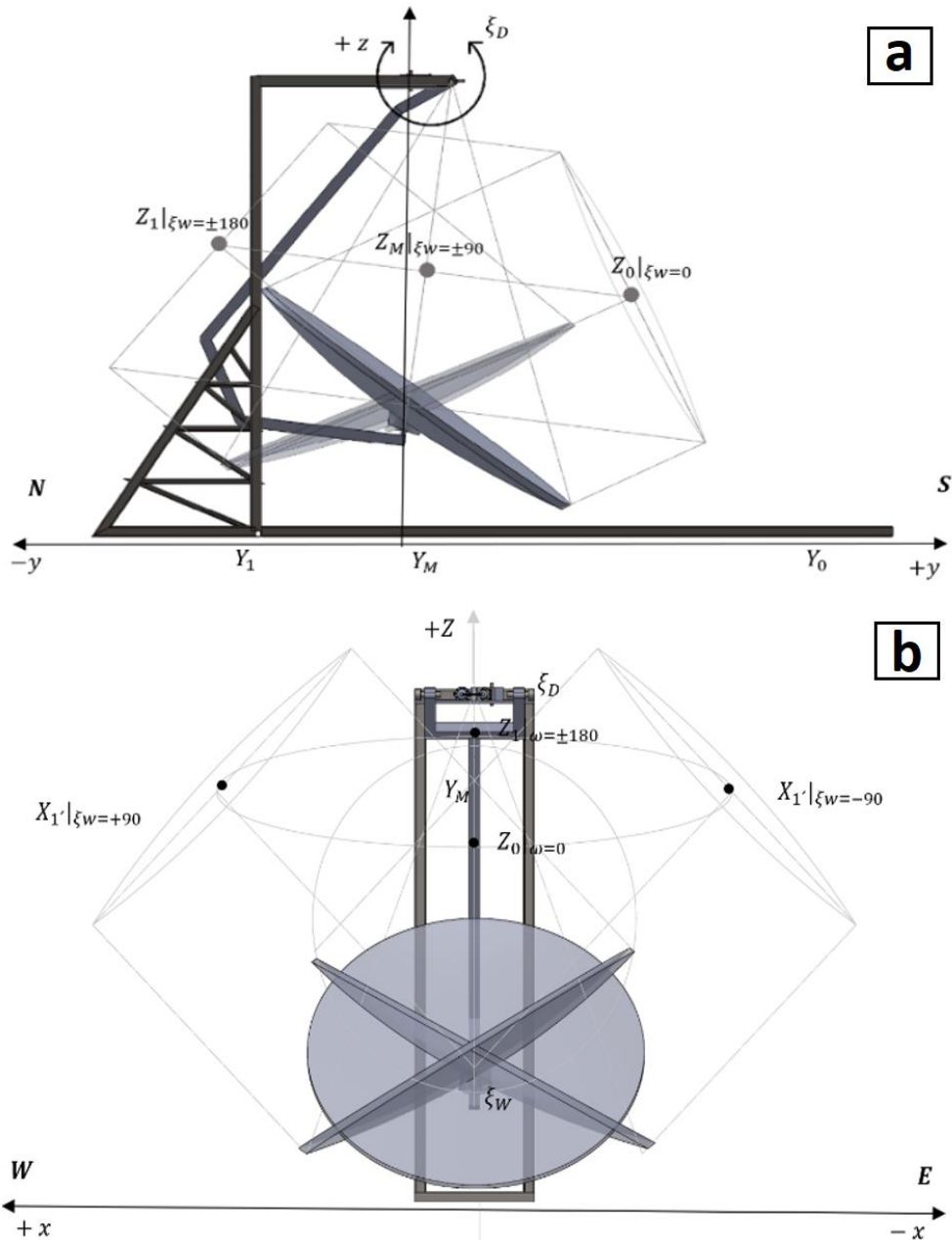


Figura 3.4. Plano del sistema para la determinación de la elipse de aceptación solar; a) plano ZY. b) Plano ZX.

Estudio operativo y comparativo del concentrador solar

El sistema antes descrito fue evaluando a lo largo de un año solar típico, se utilizó la altura solar y el ángulo azimutal como los parámetros principales para determinar los límites del subsistema de seguimiento, así como la estructura de este. En la Figura 3.5a se vislumbra la trayectoria aparente del sol en la latitud 32° en los días julianos 81, 172 y 355, que representan los equinoccios, el

solsticio de verano y el de invierno, respectivamente. Además, se presenta la irradiancia del recurso solar en la región de interés (Figura 3.5b).

Se utilizaron varios discos con diferentes ángulos $\theta_{int,m}$ para determinar su viabilidad técnica. En la Figura 3.6a se muestra la energía térmica interceptada por cada uno de los discos estudiados en el solsticio de verano, equinoccio de primavera y solsticio de invierno. Se determino que cada uno de el desempeño de los concentradores está regido por la relación entre tiempo de operación y capacidad de concentración, de este modo el ángulo de interceptación medio influye directamente en la optimización del subsistema. El disco con $\theta_{int,m} = 60^\circ$ es el que presenta mayor cantidad de energía interceptada y concentrada de forma correcta, a pesar de que su rendimiento sea ligeramente menor en el solsticio de invierno en comparación con el disco con $\theta_{int,m} = 45^\circ$. Por lo que, En la Figura 3.6b se muestra la evaluación anual de los discos previamente mencionado, en donde la cantidad de energía diaria es presentada.

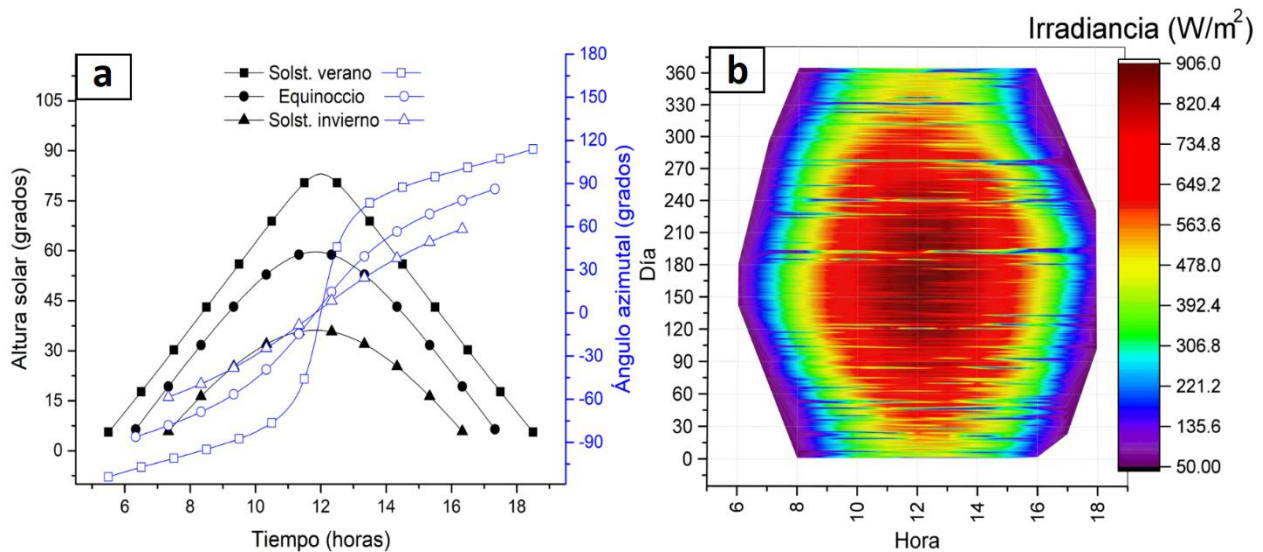


Figura 3.5. Parámetros del recurso solar de Mexicali B. C., México: a) Ángulos solares, b) Potencia de la irradiancia.

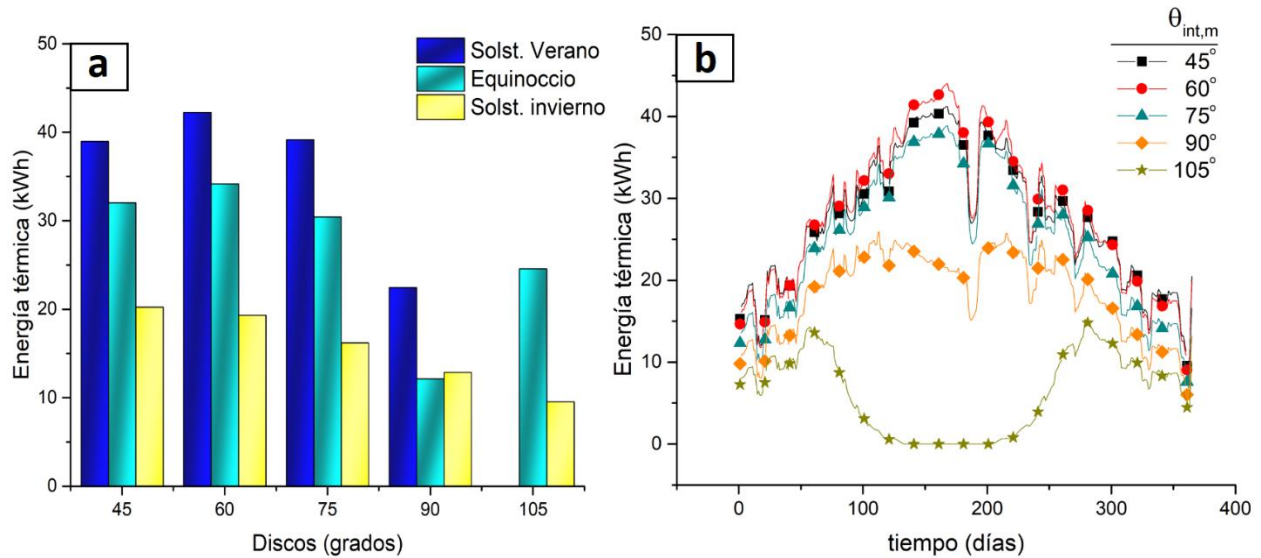


Figura 3.6. Cuantificación de la energía térmica día captada por cada disco evaluado en la región de Mexicali, B.C. México: a) Solsticios y equinoccio, b) Exploración anual.

Se observa que el desempeño del concentrador con $\theta_{int,m} = 45^\circ$ supera al de 60° en el invierno (días julianos 0-45, 330-365), en cambio el resto del año es todo lo contrario. A pesar de que el disco con $\theta_{int,m} = 90^\circ$ no muestra un buen desempeño, este tiene cualidades importantes en la construcción de su subsistema de seguimiento, ya que el movimiento angular de los ejes es menor al de los anteriores.

Optimización del concentrador solar

A partir del rendimiento anual de los discos de la Figura 3.6b se determinó que el disco óptimo para el sistema de desalinización para la comunidad de Mexicali B.C. tiene un ángulo de interceptación de entre 45° y 75° . Por lo que, se realizó una exploración dirigida, utilizando el Equinoccio de primavera como día de referencia, para reducir tiempo de simulación. En la Figura 3.7 se muestra el desempeño de los discos según su ángulo de interceptación en el Equinoccio de primavera de la ubicación geográfica de estudio, en donde se obtuvo la relación óptima de potencia y tiempo de operación. Con un tiempo de operación de 7.84 horas, una potencia promedio de 6.54 kW, el disco de 57° presentó el mejor desempeño en el año.

En la Tabla 3.1 se muestra el desempeño anual de los principales discos estudiados y los de mejor rendimiento, así como los límites de los ejes de seguimiento que cada uno requiere. Se muestra como la energía interceptada por el disco de 57° en el año, difiere por algunos pocos kilowatts con

la del disco de 58° . La potencia promedio en el día, el tiempo de operación promedio al día y la cantidad de energía interceptada al día de los discos 45° , 55° , 57° , 58° , 60° y 75° son presentadas en la Figura 3.7, así como los límites de los ejes de seguimiento indican la posición inicial del disco, así como donde topa el disco en un sistema mal construido o bien, no utilizar más material del requerido en la estructura.

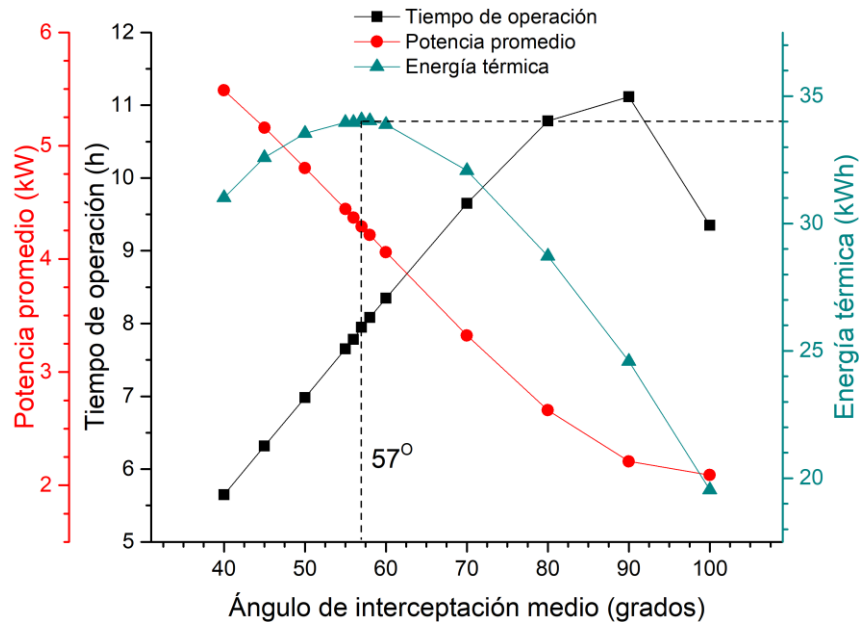


Figura 3.7. Estudio de optimización del disco Scheffler en función de su ubicación geográfica

Tabla 3.1. Evaluación de los sistemas Scheffler y sus parámetros en un año.

Ángulo de interceptación medio	45°	55°	57°	58°	60°	75°	90°
Tiempo de operación (h)	2432.3	2965.3	3088.8	3165.3	3240.3	3989.3	3437.3
Energía captada (MWh)	17.77	18.625	18.793	18.769	18.697	17.353	12.451
Tiempo de operación promedio al día (h)	6.664	8.124	8.462	8.672	8.877	10.929	9.417
Potencia promedio al día (kW)	7.305	6.28	6.074	5.929	5.77	4.349	3.622
Rango del ángulo de seguimiento de altura solar (grados)	38.1 a -49.8	48.1 a -58	50.1 a -50.9	51.1 a -50.9	53.1 a -50.9	68.1 a -18.12	83.1 a 11.07
Rango del ángulo de seguimiento horario (grados)	± 90	± 90	± 90	± 90	± 90	± 85.5	± 82.5

3.3 Motor Stirling

En la Figura 3.8 se muestra el motor Stirling prototipo en configuración Alfa propuesto para el sistema de generación de energía eléctrica, el cual está compuesto por un mecanismo de biela-manivela, calentador, regenerador y enfriador. Los cilindros (D_{HCYL}) se encuentran distanciados por el ángulo desfasamiento ($Alpha$). El desplazamiento de los pistones es llamado carrera (P_S), que en conjunto con el diámetro del cilindro definen el volumen de barrido (V_{SW}). Al pistón de expansión le es acoplado una corona con longitud L_{PC} , la cual permite soportar las altas temperaturas y reducir las pérdidas térmicas. La unión entre el cilindro y el calentador añade volumen muerto en la zona de expansión (V_{HS}). El área de transferencia de calor y el volumen muerto añadido por el calentador están definidos por el número de tubos en paralelo (N_{HT}), la longitud (L_{HT}) y el diámetro interno de los tubos (D_{HT}). Los parámetros del regenerador son el diámetro D_R y longitud L_R . Su matriz está compuesta por una pila de mallas metálicas definidas por el número de alambres por centímetro (M_{SH}) y el espesor de estos (TH_W). El enfriador es del tipo tubo y coraza. En el interior de los tubos del enfriador se encuentra el fluido de trabajo y en el exterior el fluido de enfriamiento. La cantidad de tubos (N_{CT}), el diámetro interno (D_{CT}) y la longitud (L_{CT}) definen el área de transferencia de calor y volumen muerto añadido al sistema. Por último, el cilindro de compresión y el enfriador son acoplados por medio de un elemento de unión, el cual agrega volumen muerto a esta zona (V_{CS}).

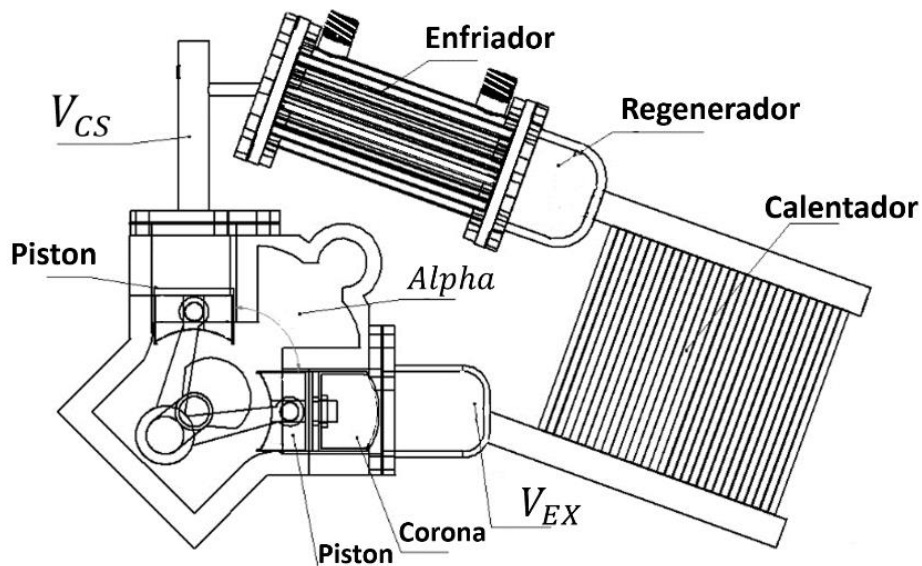


Figura 3.8. Prototipo de motor Stirling tipo Alfa con una capacidad de 2 kW nominal.

Modelo matemático del motor Stirling

El desempeño del motor Stirling es calculado por medio de un modelo numérico de segundo orden, de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.9. El cálculo de la potencia neta y la eficiencia fue realizado en estado estable, utilizando el método descrito por Martini (Martini 1983). Se consideraron pérdidas por fricción mecánica, caídas de presión del fluido de trabajo y las principales pérdidas de térmicas del motor en las zonas de alta temperatura como se presentan en la Figura 3.10.

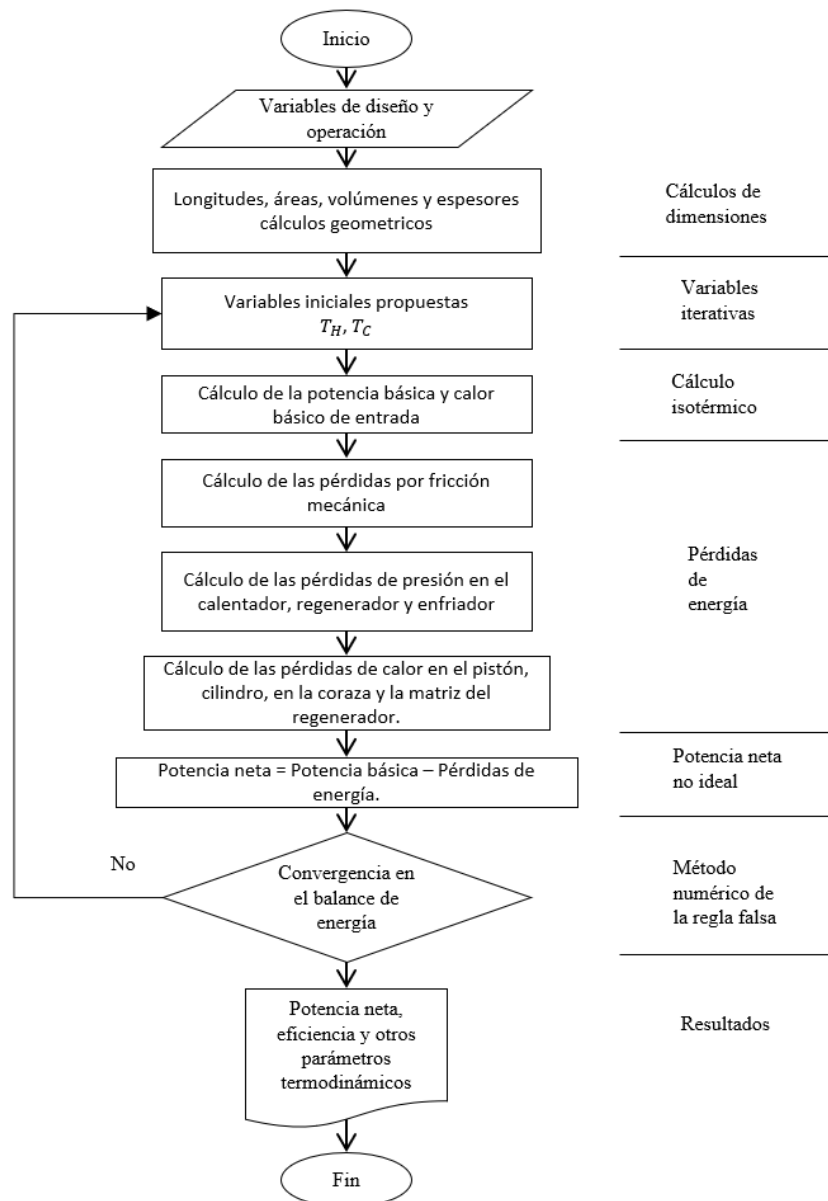


Figura 3.9. Diagrama de flujo para la solución del modelo térmico del motor Stirling.

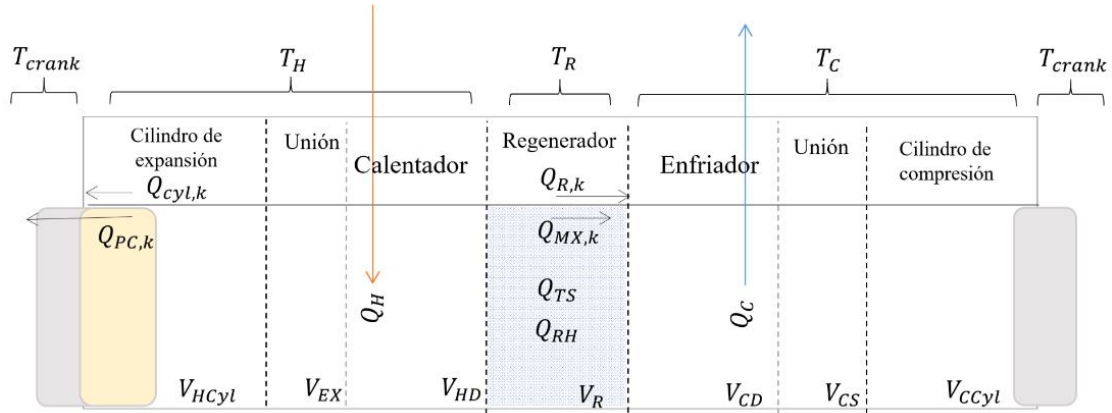


Figura 3.10. Representación de las temperaturas, volúmenes y principales pérdidas térmicas del sistema.

La potencia básica del motor *BP*, está definida como el área bajo la curva presión-volumen y está dada por:

$$BP = NU (1.045) \sum_1^{12} \Delta W \quad (16)$$

Y la energía mínima requerida para producir la potencia básica, conocida como suministro básico de calor, es:

$$BHI = \frac{BP}{1 - \frac{T_C}{T_H}} \quad (17)$$

Las pérdidas por fricción mecánica preferentemente deben ser medidas, pero para propósitos de la simulación se aproximaron al 20% de la potencia básica:

$$MFL = 0.2 BP \quad (18)$$

El diámetro de los tubos del calentador y del enfriador es usualmente pequeño, debido a esto la relación longitud-diámetro es grande. Por lo cual el factor de fricción de Fanning puede ser obtenido por:

$$F = \begin{cases} 16/Re & , \quad Re \leq 2000 \\ \log F = -1.34 - 0.2 \log(Re) & , \quad Re > 2000 \end{cases} \quad (19)$$

Con el fin de reducir el error en el cálculo de la caída de presión en el calentador y el enfriador, se consideró un factor adicional de 2.9 de acuerdo con Chen (N. Chen and Griffin 1983):

$$\Delta P = \frac{2 F 2.9 G^2 L}{10^7 D_{HT} \rho} \quad (20)$$

Debido a la pérdida aerodinámica, se considera una pérdida de potencia dada por:

$$WP = \frac{\Delta P W H S 2 F C T}{\rho} \quad (21)$$

La caída de presión en el regenerador es:

$$\Delta P_R = \frac{F G^2 L_R}{2 (10^7) R H \rho} \quad (22)$$

Por otra parte, las pérdidas en el regenerador por regeneraciones imperfectas están dadas por:

$$Q_{RH} = F C T W R S C_v (T_H - T_C) \left(\frac{2}{N T U_r + 2} \right) \quad (23)$$

El número de unidades de transferencia (NTU) del calentador del gas es:

$$N T U_h = \frac{h A H T}{2 F C T W H S C_v} \quad (24)$$

El número de Nusselt del enfriador de tubos y coraza depende de los valores del número de Reynolds y son dados por Žakauskas (Žakauskas, 1972):

$$Nu \begin{cases} Nu = 1.04 Re^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} & , 0 \leq Re < 500 \\ Nu = 0.71 Re^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} & , 500 \leq Re < 1000 \\ Nu = 0.35 (St/Sl)^{0.2} Re^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} & , 1000 \leq Re < 2 \times 10^5 \\ Nu = 0.31 (St/Sl)^{0.2} Re^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} & , 2 \times 10^5 \leq Re < 2 \times 10^6 \end{cases} \quad (25)$$

La caída de presión es:

$$\Delta P_{t\&s} = N_L f \chi \frac{\rho v_{max}^2}{2} \quad (26)$$

y el factor de fricción de gas a través de la matriz del regenerador es:

(12)

$$F_r = \begin{cases} \log F_r = 1.73 - 0.93 \log(Re_r), & Re_r < 60 \\ \log F_r = 0.714 - 0.365 \log(Re_r), & 60 \leq Re_r < 60 \\ \log F_r = 0.015 - 0.125 \log(Re_r), & Re_r \geq 1000 \end{cases} \quad (27)$$

Las pérdidas por transferencia de calor estáticas están dadas por:

$$Q_S = Q_{k,r} + Q_{REG} + Q_P + Q_{CYL} \quad (28)$$

Donde el calor por conducción, $Q_{k,r}$, en la matriz es:

$$Q_{k,r} = \frac{KMX \ AHT \ (T_H - T_C)}{L_R} \quad (29)$$

Las pérdidas térmicas por conducción en el regenerador, Q_{ARP} , por sección transversal con diámetro variable están dadas por:

$$Q_{REG} = \frac{(T_H - T_C)}{R_{t,r,1} + R_{t,r,2} + R_{t,r,3}} \quad (30)$$

El calor transferido entre la cara del pistón y el cárter, Q_P , es:

$$Q_P = \frac{\pi D_{HCYL}^2 K_{PC}}{4 L_{PC}} \quad (31)$$

y las pérdidas por conducción a través de la pared expandida de cilindro, QC_{CYL} , son:

$$Q_{CYL} = \frac{(T_H - T_C)}{R_{t,1} + R_{t,2} + R_{t,3}} \quad (32)$$

Pérdidas causadas por el recalentamiento en el regenerador fueron calculadas asumiendo que no hay oscilación en la temperatura de la matriz de regenerador. Sin embargo, en algunos casos la variación de temperatura es importante, causando pérdidas oscilantes.

$$Q_{TS} = FCT \ WRS \ C_v \ (\Delta T_{MX}/2) \quad (32)$$

Por lo tanto, la potencia neta es calculada restando las pérdidas de energía de la potencia básica:

$$NP = BP - WP_H - WP_R - WP_C - MFL \quad (33)$$

y el flujo de calor requerido en el calentador es:

$$Q_H = BHI + Q_{RH} + Q_{TS} + Q_S - WP_H - WP_R/2 \quad (34)$$

Donde el flujo de calor requerido en el enfriador es:

$$Q_C = Q_H - NP \quad (35)$$

Este modelo numérico fue validado por Chen y Griffin (N. Chen and Griffin 1983). Reportaron que, al corregir el factor de fricción del gas con el factor de 2.9, el error en el cálculo de potencia y eficiencia se reduce en un $\pm 10\%$.

Controlabilidad de la maquina térmica.

A partir del modelo de segundo orden antes mencionado, se realizó un estudio paramétrico del motor Stirling y sus principales los parámetros de control. En la Figura 3.11 se muestra la influencia del calor suministrado sobre la potencia neta, básica y la eficiencia del motor Stirling, en donde se denota a mayor calor de entrada la eficiencia y potencia del motor aumentan, como es de esperarse de las maquinas térmicas. Sin embargo, dicho incremento no es linealmente proporcional, debido a las pérdidas de calor en los intercambiadores y las de energía por caídas de presión en los mismos.

Es posible observar que el suministro de calor puede ser utilizado como la variable manipulada para la controlabilidad de la potencia del motor, por lo que el calentador debe ser intervenido. La variación de calor suministrado puede ser delimitado de diferentes maneras, según la forma en que el motor este siendo activado. Un actuador en la válvula del quemador de gas, la admisión de oxígeno en la cámara de combustión de pellet, el flujo del fluido calo-portador de un proceso previo (calor residual) o hasta el desenfoque de un disco concentrador en aplicaciones solares, son formas de controlar el suministro de calor en el ciclo Stirling y, por ende, la manipulación de la potencia neta. Sin embargo, la variación del suministro de calor tiene un impacto considerable en la eficiencia del sistema, por lo que no solo la potencia del motor reduciría sino también la eficiencia de este.

Por otra parte, en la Figura 3.11 se presentan los parámetros termodinámicos y las pérdidas de calor en el cilindro, regenerador y por caídas de presión en los intercambiadores. Al variar el suministro de calor existe un efecto desfavorable en la eficiencia del motor, el cual es debido a las condiciones termodinámicas del sistema. Se observa que la temperatura de expansión es muy baja cuando el calor suministrado es poco, por lo que la eficiencia de Carnot es baja. Sin embargo, cuando la temperatura de expansión es alta, el flujo másico es mínimo, por lo que la transferencia de calor entre el calentador y el fluido de trabajo disminuye, incrementando las pérdidas de calor en la zona de expansión significativamente. En cambio, a pesar de que la variación de la presión promedio está en función del calor suministrado, las pérdidas de energía por caídas de presión en los intercambiadores no son significativas.

En contraste, la variación del suministro de calor es la forma más rudimentaria de controlar una maquina térmica, ya que afecta el desempeño de este y no solo la potencia. Además, cuando el calor suministrado es bajo, el desempeño del motor decrementa debido a la eficiencia de Carnot. En cambio, cuando el calor suministrado es alto, la potencia del motor aumenta, pero las pérdidas de calor en la zona de expansión incrementan considerablemente. Por lo que, la variación del calor suministrado no puede mantener una estabilidad en el desempeño del sistema.

Otra de las variables usualmente utilizada para controlar la potencia de un motor Stirling es el ángulo de fase entre los pistones, por lo que es necesario analizar los efectos que la variación de este parámetro tiene sobre el sistema. En la Figura 3.12 se presenta el comportamiento de la

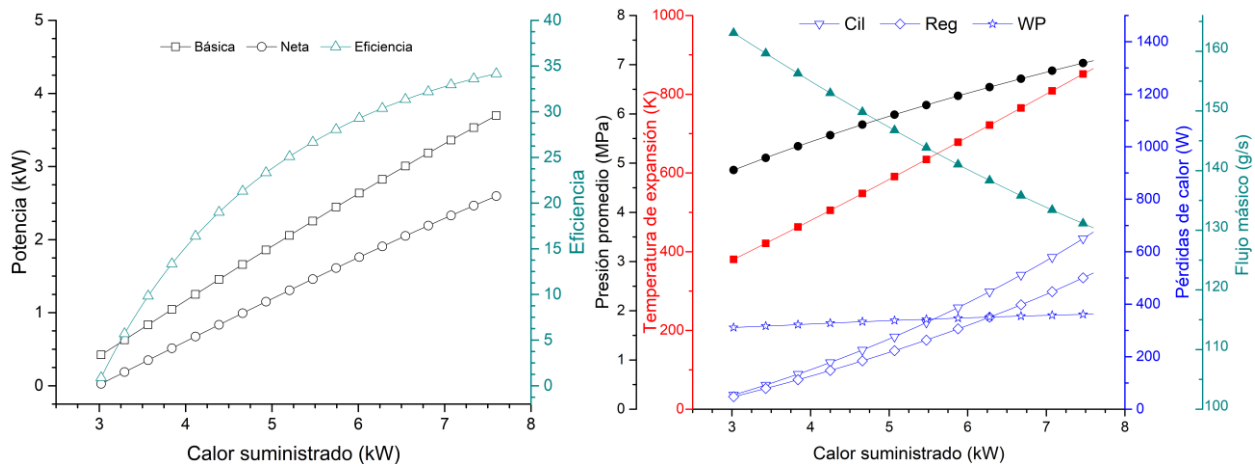


Figura 3.11. Estudio de la influencia del calor suministrado sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.

potencia básica, neta y la eficiencia del motor Stirling dada la variación del ángulo de fase entre los pistones (*Alpha*). En la literatura es común encontrar que el ángulo de fase óptimo es de 90° , sin embargo, esto resulta de un análisis en primera ley de la termodinámica, en donde las pérdidas de energía no son tomadas en cuenta. Se observa que la potencia básica del motor se asemeja en cierta medida a las condiciones ideales del motor, pero la potencia neta es la que define el trabajo del motor, ya que esta contempla las pérdidas de energía. En la Figura 3.12 se muestra como la eficiencia del motor incrementa cuando el ángulo de fase está por debajo de los 90° , por ende, la potencia neta del motor incrementa (potencia máxima de 2.48 kW a un ángulo de fase de 52°).

Este decremento en la eficiencia es debido al efecto conjunto entre las pérdidas de calor en la zona de expansión y de energía por caídas de presión en los intercambiadores, como se muestra en la Figura 3.12. Determinando que un ángulo de fase mínimo (tendencia a 0°) conlleva un flujo másico mínimo y una pobre transferencia de calor, en cambio un ángulo de fase máximo (tendencia a 180°) conlleva a un flujo másico máximo, favoreciendo la transferencia de calor y a su vez, las pérdidas térmicas y por caídas de presión. Por lo que, el mejor desempeño del motor se obtiene cuando el ángulo de fase determina el flujo másico adecuado para la cantidad de calor suministrada en el calentador.

En la Figura 3.13 se muestra la relación entre la cantidad de calor suministrada (irradiancia) y el ángulo de fase, para determinación de la potencia neta del motor. Es decir, que a partir de esta superficie de respuesta es posible determinar el comportamiento que la variable manipulada (ángulo de fase) debe tener para obtener la potencia del punto de consigna (referencia), según la cantidad de calor suministrada. Un controlador puede ser desarrollado para seguir el comportamiento de las isóneas de potencia, y así determinar la lógica de operación para obtener la potencia deseada por el usuario.

Es posible vislumbrar que un controlado PID sencillo no es capaz de controlar la potencia del sistema en todo momento, ya que las condiciones de operación no permiten que ciertos puntos de consigna. Por ejemplo, si se tiene una irradiancia de 1000 W/m^2 , el punto de consigna de la potencia (NP_{ref}) debe encontrarse en $2.48 \text{ kW} \geq NP_{ref} \geq 1.38 \text{ kW}$, para que el controlador pueda converger a una situación estable. O bien, si la irradiancia es de 650 W/m^2 , entonces es imposible que el controlador opere en puntos de consigna superiores a 1.38 kW.

Además, podemos asumir que el comportamiento de las isolíneas de potencia son funciones cuadráticas o la cuarta, por lo que existen más de un punto en el que el controlador puede converger al punto de consigna. Por lo anterior es necesario, añadir arreglos en las condiciones de operación para el PID o bien, la aplicación de controladores que implementen lógica difusa.

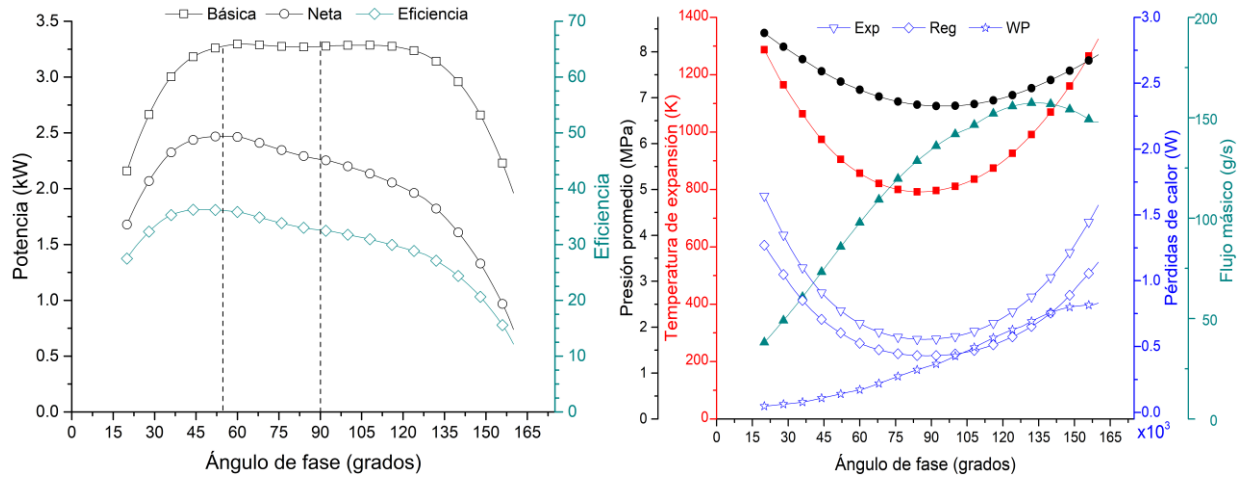


Figura 3.12. Estudio de la influencia del ángulo de fase sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.

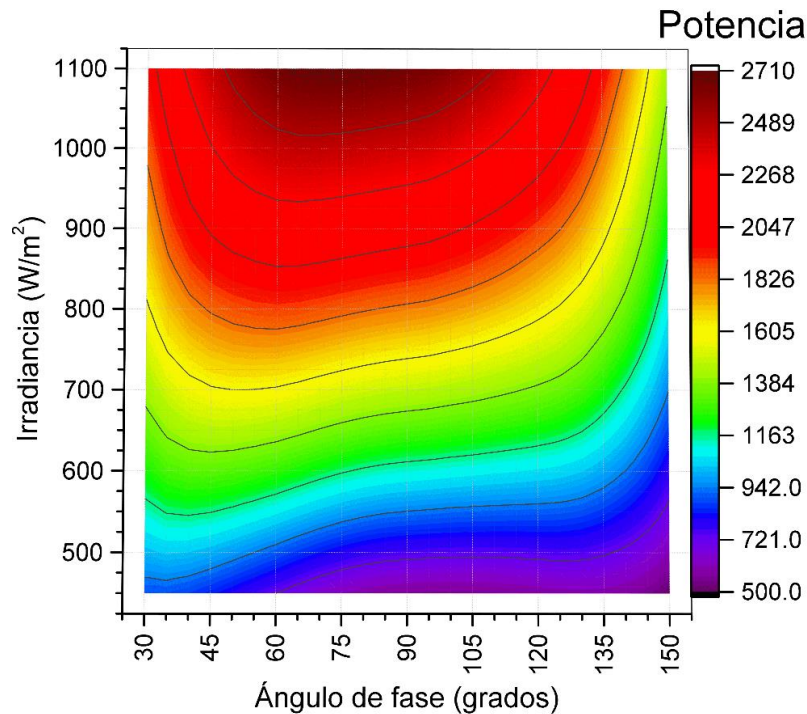


Figura 3.13. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar el ángulo de fase como variable manipulada.

Aunque mecánicamente la manipulación de la carrera del pistón es compleja, es posible en mecanismos similares al Wobble- yoke, por lo que la carrera del pistón puede ser variada para la controlabilidad de la potencia del motor Stirling. En la Figura 3.14 se presenta el comportamiento de la potencia básica, neta y la eficiencia del motor en función de la variación de la carrera del pistón, en donde se observa que la potencia básica presenta un punto máximo con una carrera de 6.1 cm, pero la potencia neta presenta un punto máximo a una carrera de 5.25 cm, tal como lo determina el comportamiento de la eficiencia. Esto es debido a las principales pérdidas de energía, tal como se muestra en la Figura 3.14, en donde a carreras mayores a 6.0 cm el alto flujo másico disminuye la temperatura de expansión y a su vez incrementa las pérdidas de energía por caídas de presión en los intercambiadores, a pesar de las bajas pérdidas de calor en la zona de expansión. En cambio, carreras menores a 6.0 cm presentan menor flujo másico, de este modo la temperatura de expansión incrementa y a su vez, la eficiencia de Carnot. Sin embargo, dado este incremento de temperatura las pérdidas de calor en la zona de expansión y del regenerador (coraza y matriz) incrementan. Por lo que, el mejor desempeño del motor se lleva a cabo cuando se establece un balance entre temperatura de expansión, pérdidas térmicas y por caídas de presión.

En la Figura 3.15 se muestra la superficie de respuesta de potencia neta del motor Stirling, en donde se establece la relación entre la cantidad de calor suministrado y la carrera del pistón. A partir de esta relación se puede inferir el comportamiento que debe presentar la variable manipulada (carrera del pistón) para determinados puntos de consigna en función del calor suministrado. Es decir, indica la variación de la carrera del pistón realizada por el controlador de potencia del motor Stirling. Por ejemplo, si suponemos que tenemos una irradiancia de 800 W/m^2 , la variación de la carrera del pistón permite la controlabilidad de la potencia neta desde los 1.35 kW hasta 1.89 kW. Sin embargo, la tendencia en los extremos de exploración de la variable manipulada muestra que la potencia neta puede ser decrementada hasta 0 W, a pagando así el ciclo Stirling.

En contraste, la carrera del pistón es una variable que permite la controlabilidad de la potencia del motor en un amplio intervalo de trabajo, pero es necesario la aplicación de otras herramientas condicionantes para la convergencia del controlador PID, ya que el comportamiento de las isolíneas de potencia neta tiene un comportamiento cuadrático. Debido a esto, un controlador PID sencillo no discriminaría la diferencia entre los dos puntos de convergencia.

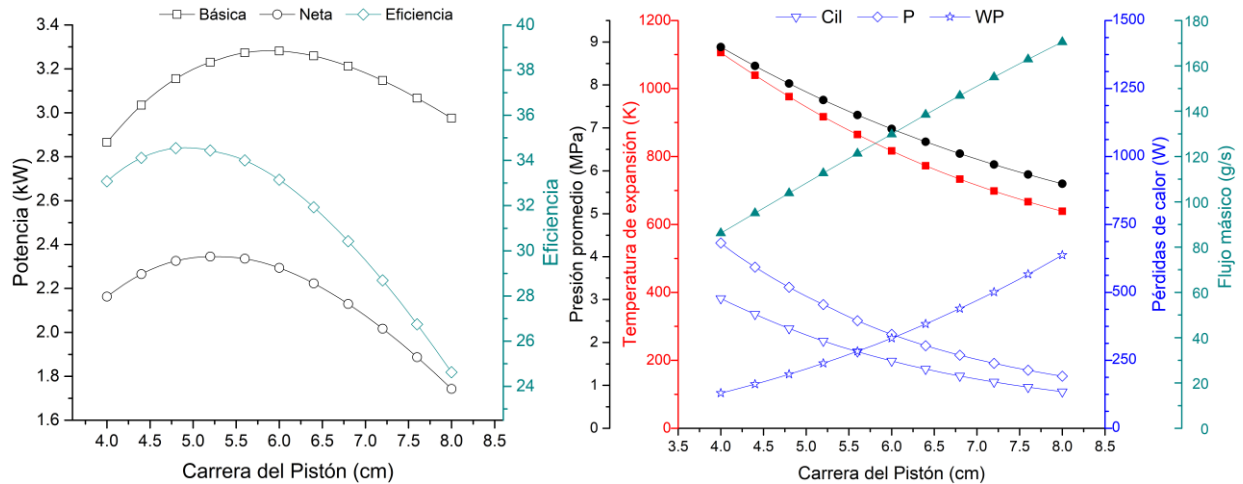


Figura 3.14. Estudio de la influencia de la carrera del pistón sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.

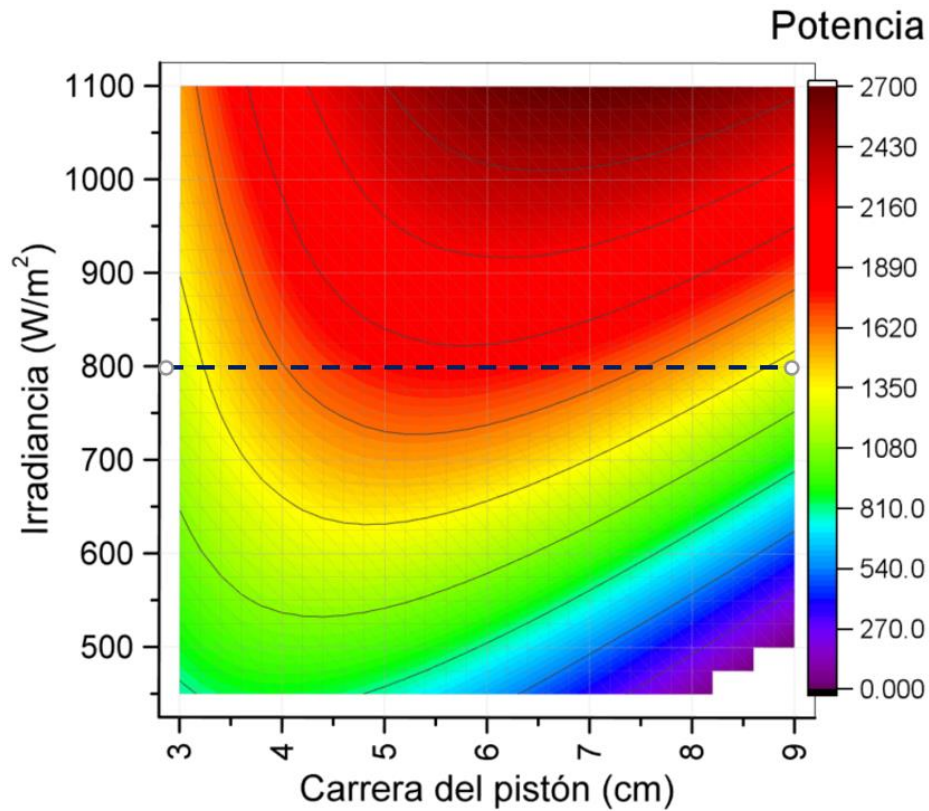


Figura 3.15. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar la carrera del pistón como variable manipulada.

La variación de la presión media de la cámara de trabajo es otra de las técnicas utilizadas para la controlabilidad de la potencia de salida de un motor Stirling. La variación de la presión media se lleva a cabo agregando o sustrayendo fluido de trabajo de la cámara, a través de un recipiente externo encargado de contener el fluido sobrante o suministrar el faltante. En necesario un actuador

que permita el intercambio del fluido de trabajo del recipiente a la cámara y viceversa, por lo general se aplica un compresor pequeño y una electroválvula. Sin embargo, este tipo de manipulación tiene un efecto transitorio abrupto por el ingreso de fluido “frío” al ciclo.

En la Figura 3.16a se presenta el comportamiento de la potencia básica, neta y la eficiencia del motor en función de la cantidad de fluido de trabajo, en un análisis de estado estable (no transitorio). Se observa que la manipulación de la cantidad de fluido de trabajo permite la controlabilidad de la potencia del motor en un limitado intervalo de trabajo, en donde la eficiencia del motor permanece estable en un intervalo de 28 a 32%. Por otra parte, en la Figura 3.16b se presentan los parámetros termodinámicos de interés, para determinar las consecuencias en la variación de la cantidad del fluido de trabajo. La reducción de la cantidad del fluido de trabajo decreta el flujo másico y la temperatura de expansión alcanza su nivel máximo, ya que la transferencia de calor ha sido reducida. Por lo tanto, las pérdidas de calor en el cilindro y el regenerador incrementan súbitamente. La variación en la cantidad del fluido de trabajo es para la manipulación de la presión promedio del motor y a su vez, de la potencia de este. Se observa que la presión promedio incrementa al añadir más fluido a la cámara de trabajo y la temperatura de expansión decreta, ya que a una mayor cantidad de masa mayor es el requerimiento de calor suministrado.

En la Figura 3.17 se muestra la superficie de respuesta de potencia neta, determinada por la relación entre el calor suministrado y la cantidad de fluido de trabajo. Es posible controlar la potencia del motor Stirling a través de la variación de la presión promedio, en un intervalo pequeño de trabajo. Por ejemplo, si la irradiancia (indicador del calor suministrado) se encuentra en los 700 W/m^2 , la potencia del motor deseada solo puede estar entre los 1.2 a 1.52 kW para que el controlador de potencia converja a un estado estable. Sin embargo, es posible que cantidades de fluido menores a 10 gramos determinen potencias menores a 1.2 kW, por lo que lograrlo dependerá de la capacidad de los actuadores utilizados para la compresión del fluido en el recipiente de almacenamiento.

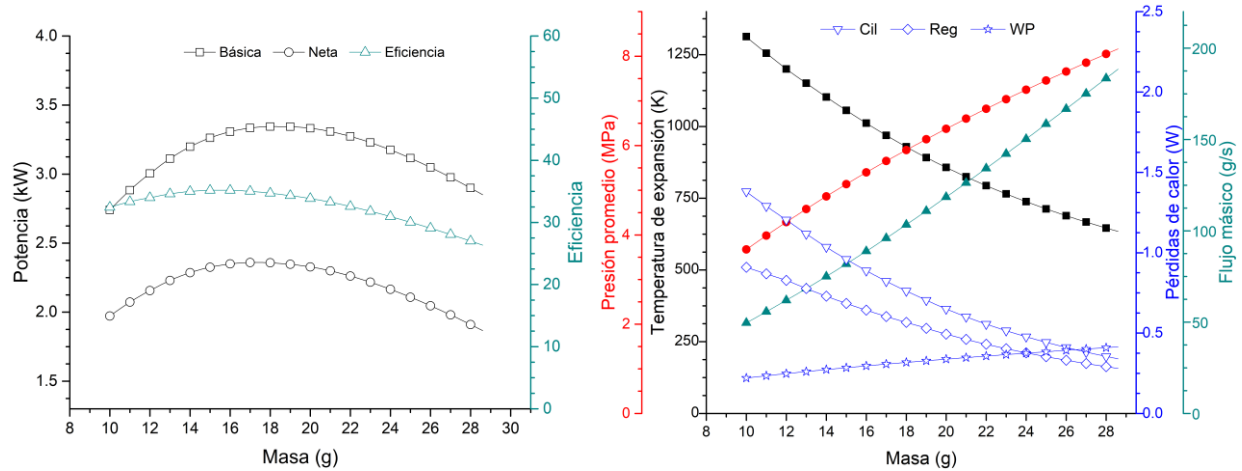


Figura 3.16. Estudio de la influencia de la presión media sobre de la potencia, eficiencia y los principales parámetros termodinámicos del motor Stirling.

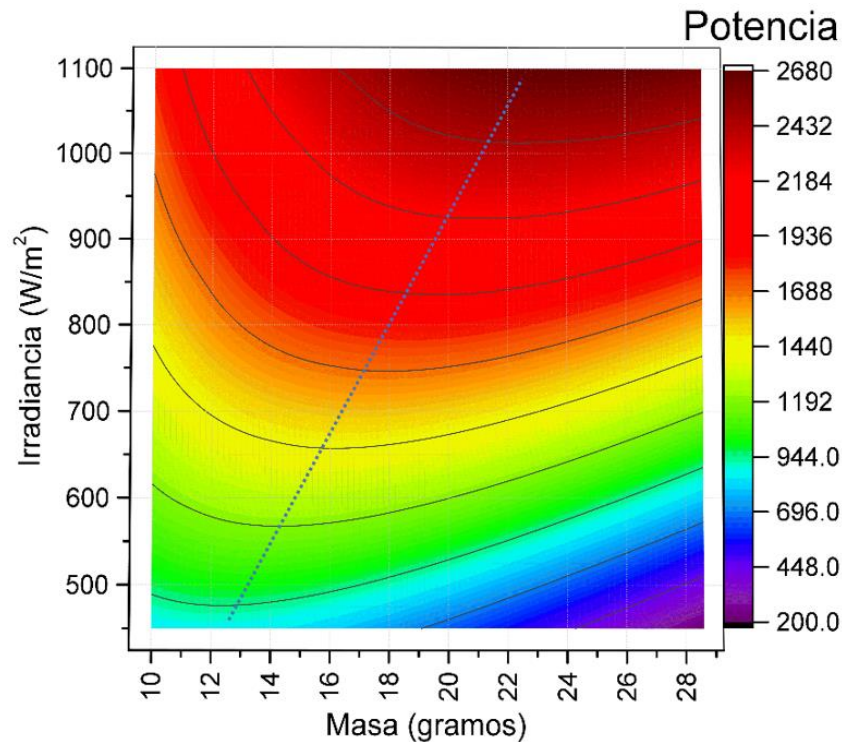


Figura 3.17. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar la cantidad de masa de fluido de trabajo como variable manipulada.

En este trabajo de tesis se ha propuesto utilizar la variación de la cantidad de volumen muerto extra en la zona de compresión para la controlabilidad de la potencia del motor Stirling. En la Figura 3.18 se muestran las superficies de respuesta correspondiente a la relación entre los parámetros de la cantidad de calor suministrada (proporcional a la irradiancia) y la cantidad de volumen muerto extra, en donde se observan las zonas de máxima potencia y eficiencia.

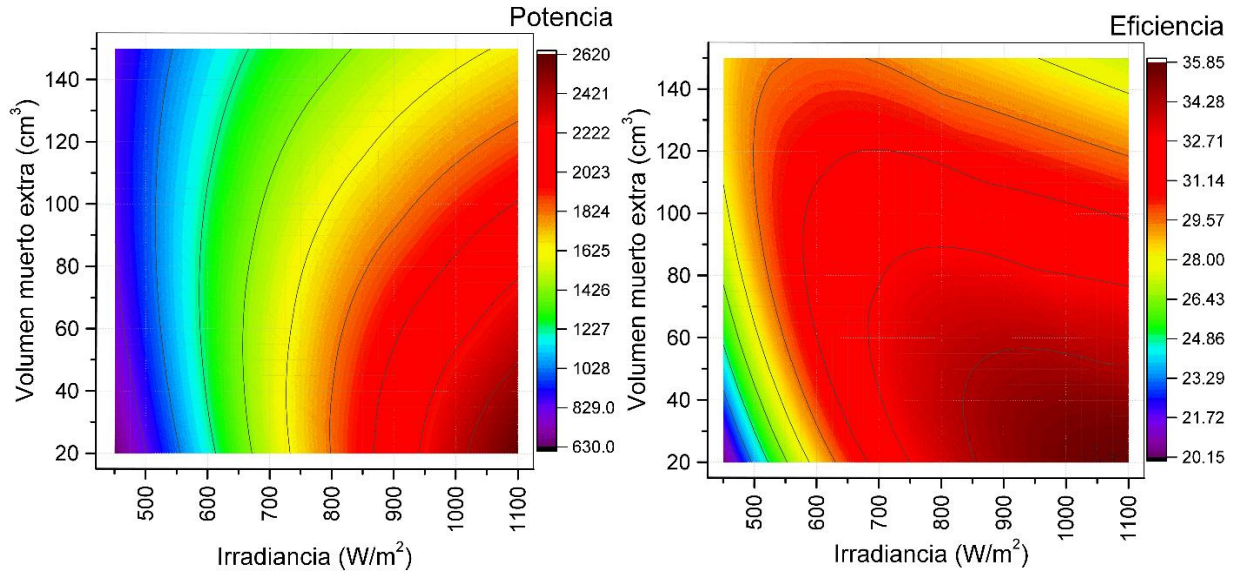


Figura 3.18. Mapa para determinar las estrategias de control al utilizar la cantidad de volumen muerto extra como variable manipulada.

Además, a partir de estas superficies de respuestas es posible denotar el comportamiento deseado por el controlador, por ejemplo; a partir del comportamiento de la potencia se vislumbra que la variable controlada guarda una relación inversa con la variable de manipulada, es decir, la potencia del motor Stirling incrementa al decrementar el volumen muerto y viceversa.

Estudio de las interacciones de las variables de diseño del motor Stirling

Para clasificar y cuantificar la importancia de cada interacción se utilizó un simulador numérico de segundo orden, en el cual se realizaron exploraciones en pares de variables, siendo la eficiencia del sistema el parámetro de respuesta. Es decir, si 2 de las 16 variables analizadas del sistema son tomadas como independientes y las restantes son fijadas, entonces el cálculo del simulador puede ser expresado como una función de dos variables:

$$f(i, j) = \eta_s \quad (36)$$

En donde i y j son los vectores de las dos variables seleccionadas, iniciando y finalizando en los límites inferior y superior del intervalo de exploración de las mismas, obteniendo a η_s como una superficie de respuesta (Figura 3.19), mostrando los puntos de eficiencia del sistema y denotando las zonas de eficiencias máximas.

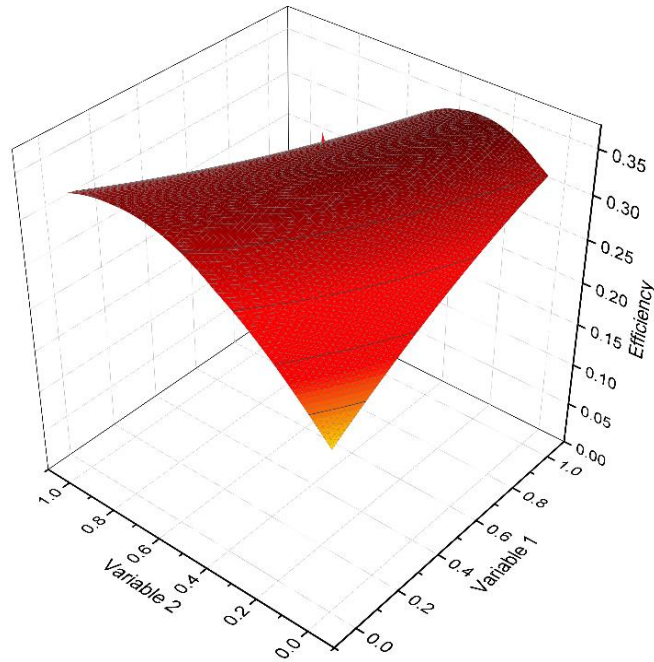


Figura 3.19. Superficie de respuesta η de dos variables aleatorias.

Con el objetivo de determinar los puntos de máxima eficiencia en la superficie de respuesta η_S , se debe determinar la relación óptima entre las variables interactuadas. Esta relación es linealizada empleando el método de mínimos cuadrados, obteniendo una ecuación de la forma:

$$j_{\eta} = i_{\eta} * \varphi + b_0 \quad (37)$$

En donde j_{η} es el valor adimensional que la segunda variable seleccionada debe tomar para garantizar la máxima eficiencia en función de la primera variable seleccionada i_{η} . Por lo tanto, la pendiente φ es un indicador que permite identificar el grado de interacción entre las variables seleccionadas.

La superficie de respuesta η_S vista de manera normal del plano variable 1-variable 2 (Figura 3.20) muestra las cuatro categorías propuestas para ponderar el grado de interacción (φ) (ecuación 23) en: fuerte (A), significativa (B), débil (C) y nula (D). Si la pendiente (φ) se encuentra en una zona nula (D) significa que los valores de solo una variable predominan sobre la máxima eficiencia, por lo que no hay interacción. Si la pendiente (φ) se encuentra en una zona (A) significa que existe un par de valores específicos entre ambas variables que permite lograr la máxima eficiencia, por lo que la interacción es fuerte.

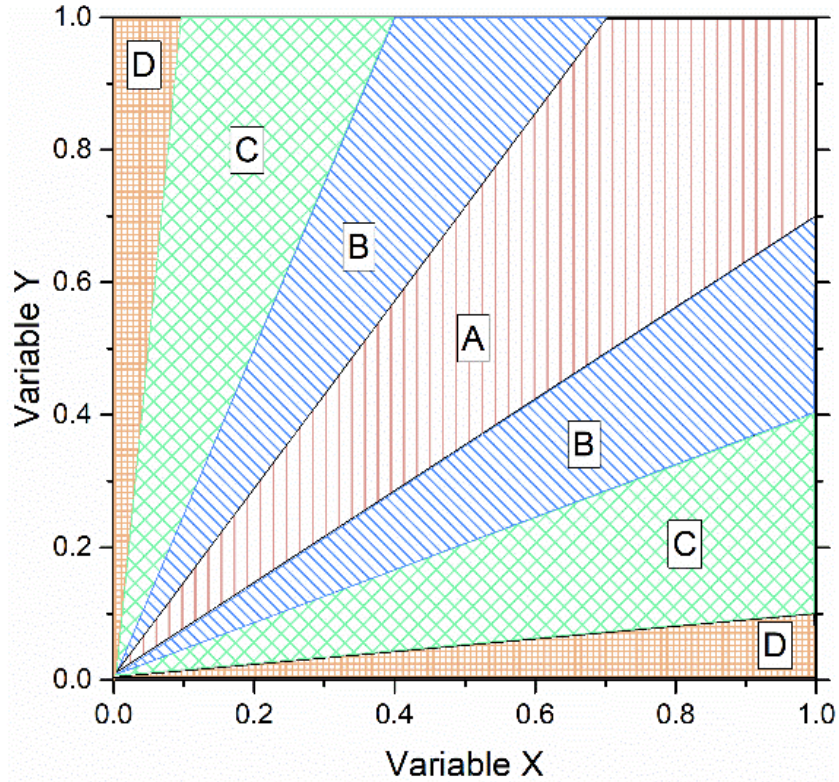


Figura 3.20. Zonas de categorización de las interacciones de las variables.

Una vez clasificadas, se le otorgaron valores numéricos enteros en función de $|\varphi|$, desarrollando una matriz de valores $\varphi_{x,y}$, nombrada esquema global de interacciones. Por otra parte, todas φ resultantes de las interacciones de la variable x con las 15 variables y restantes del sistema son sumadas, es decir:

$$\Phi_x = \sum_{y=1}^{y=15} \varphi(x, y) \quad (38)$$

En donde Φ es el indicador de interacción general del sistema, el cual denota la influencia de la interacción de una variable con el resto de estas. Es decir, que tanto afecta dicha variable al desempeño de las otras variables o subsistemas. En la Tabla 3.2 se muestran los valores predeterminados y los rangos de exploración de cada una de las variables estudiadas.

Tabla 3.2. Rangos de exploración y punto de diseño de las variables.

Variable	Punto de diseño	Rango de exploración		Unidades
		Min	Max	
P_S	6.2	4.5	8	cm
D_{HCYL}	6.6	4.5	8	cm
$Alph$	90	30	150	grados
L_{PC}	4.359	3	7	cm
L_{HT}	16.612	10	35	cm
D_{HT}	0.3048	0.14	0.45	cm
N_{HT}	30	10	50	----
V_{HS}	12.389	10	120	cm ³
L_R	5	3	8	cm
D_R	6.5	3	8	cm
M_{SH}	60	40	80	hilos /cm
TH_W	0.0041	0.0020	0.0040	cm
L_{CT}	21	10	50	cm
D_{CT}	0.2134	0.14	0.45	cm
N_{CT}	85	45	120	----
V_{CS}	5.785	10	120	cm ³

Aplicación de la categorización de las interacciones de las variables

Utilizando las principales variables de diseño de un motor Stirling tipo Alpha, se realizó una exploración simultánea en pares de variables en un simulador numérico de segundo orden para obtener las superficies de respuestas de la eficiencia del sistema. Dichas superficies fueron estudiadas y analizadas en base a la metodología propuesta, la cual determina si las variables en cuestión tienen un efecto conjunto sobre la eficiencia y a su vez, el grado de dicho efecto.

El esquema de la Figura 3.21 se muestra de manera resumida las 240 superficies de respuestas de las 16 variables de diseño seleccionadas, las cuales son representadas de forma abstracta en base a las categorías de interacción. Las variables se encuentran agrupadas por equipos; motor, calentador, regenerador y enfriador. Las flechas inferiores muestran de manera cualitativa y descendente la jerarquía de las variables, teniendo así que, la carrera del pistón (P_S) es la variable (Dot marked) que más efectos conjuntos o interacciones importantes tiene con el resto de las variables del sistema. Por otra parte, el recuadro punteado (línea punteada) muestra como la longitud de la corona del pistón (L_{PC}) no presenta efecto conjunto con el resto de las variables del sistema.

Categorización de interacciones

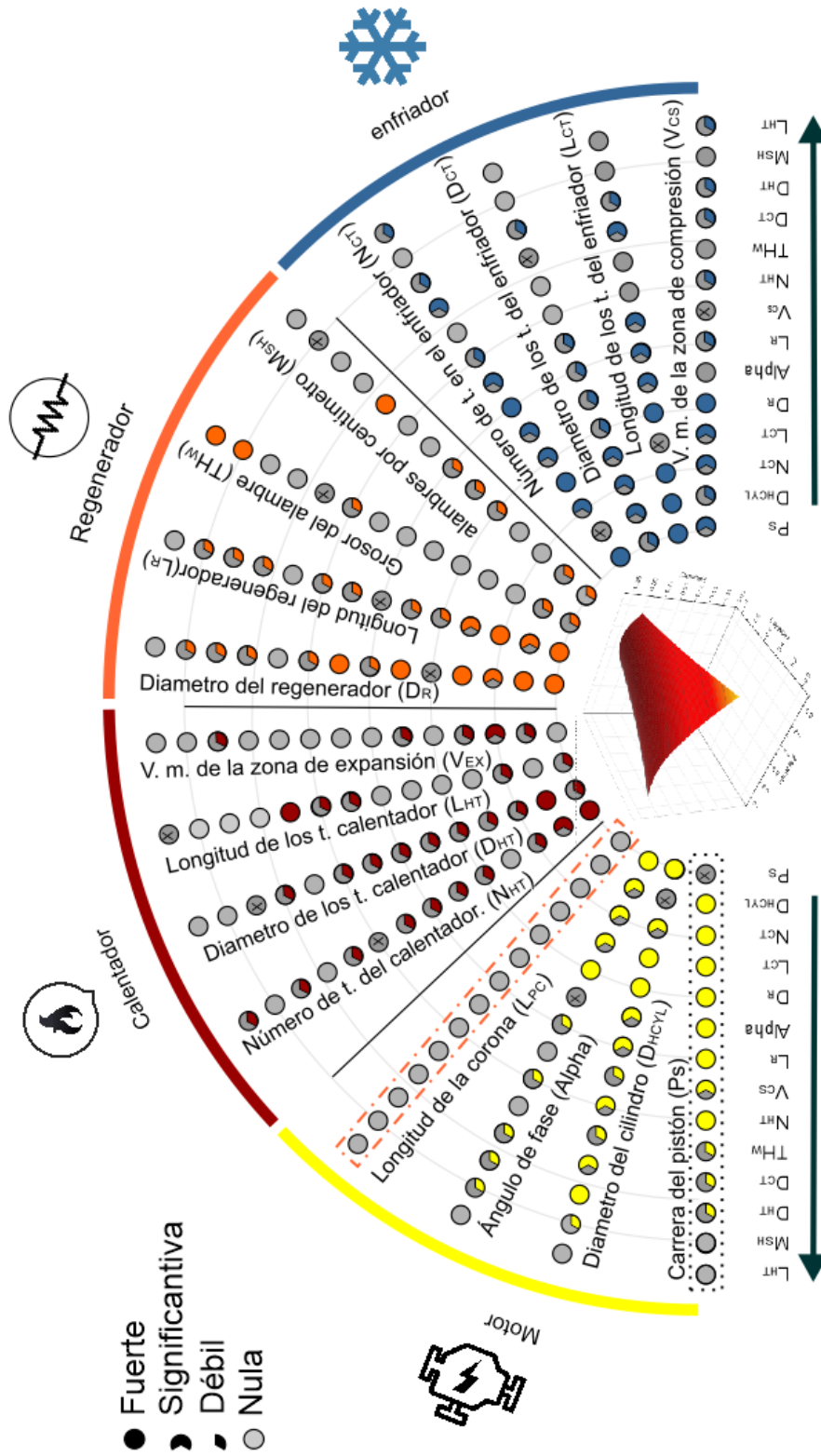


Figura 3.21. Esquema global de interacción de las variables del sistema.

En la Figura 3.22 se muestra la jerarquización de las variables, la cual es desarrollada por el indicador Φ de cada variable. Donde el valor Φ es determinado por la cantidad y grado de los efectos conjuntos que tiene una variable con el resto de las variables del sistema. Se observa que la carrera del pistón (P_S) es la variable que más influye en el diseño del sistema, ya que presenta efecto conjunto con 11 variables, de los cuales 7 están dentro de la categoría de fuertes. Lo anterior es debido a que P_S afecta directamente al volumen de barrido, flujo másico y potencia básica máxima. Por lo que, la modificación de esta variable afecta el desempeño del resto de los equipos y debe fijarse un valor que optimice el desempeño de los mismos. En cambio, las variables M_{SH} , V_{HS} , L_{HT} y L_{PC} pertenecientes al grupo G5 y G6 indicados en la Figura 3.22, pueden ser manipuladas sin pensar en un efecto conjunto con otras variables, ya que su influencia sobre el sistema es prácticamente individual. En la búsqueda de un mejor desempeño del sistema, la jerarquización encontrada, sugiere el orden en el que las variables deben ser exploradas. Además, las variables del grupo G2 pueden intercambiar su orden jerárquico entre ellas, así como las de los grupos G4 y G5, sin afectar la exploración.

Por otra parte, utilizando el mismo modelo de segundo orden y bajo las condiciones de la Tabla 3.2, se desarrolló un estudio paramétrico convencional, el cual muestra la influencia que tienen las variables de manera individual sobre la eficiencia del sistema (Figura 3.23). Dicha influencia es determinada a partir de la diferencia porcentual entre eficiencia máxima y mínima, encontradas en el rango de exploración de cada variable. La longitud de la corona del pistón (L_{PC}) presenta un efecto en la eficiencia del sistema (línea punteada), sin presentar un efecto conjunto con otras variables. Es decir, no tiene efecto en otros equipos, pero debe ser considerado en el diseño, ya que juega un papel importante en la reducción de pérdidas de calor en la zona de expansión. El diámetro del regenerador (D_R) impacta significativamente en el comportamiento operativo del sistema, esto es debido a su influencia directa en las pérdidas de presión, resultando en un sistema poco eficiente. Es decir, un diámetro muy pequeño estrangula al flujo másico, incrementando exponencialmente las pérdidas de presión.

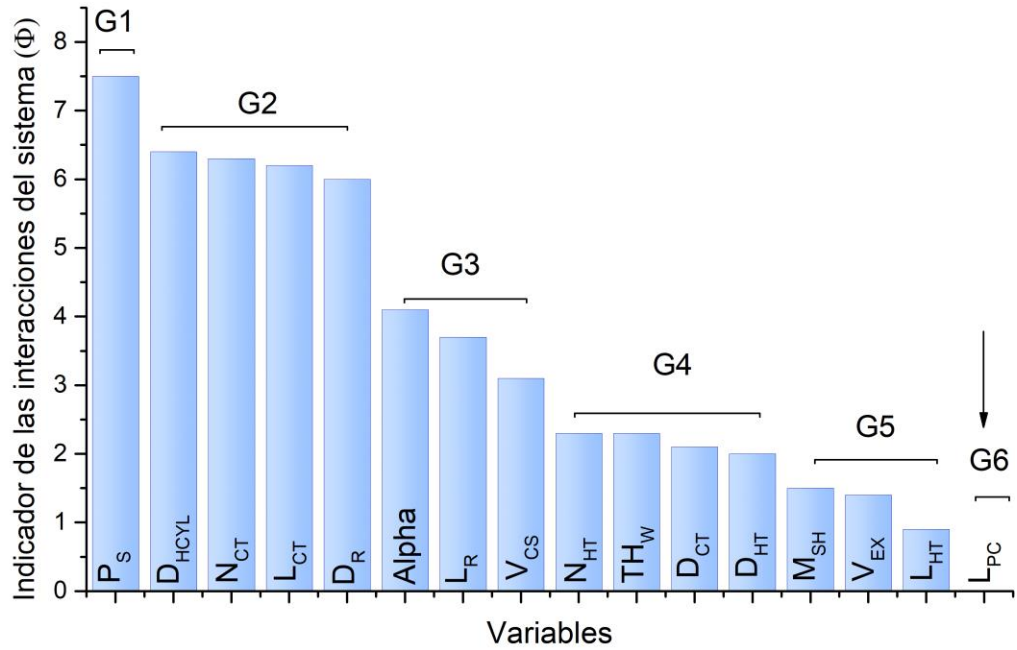


Figura 3.22. Jerarquía de las interacciones de las variables de diseño del sistema.

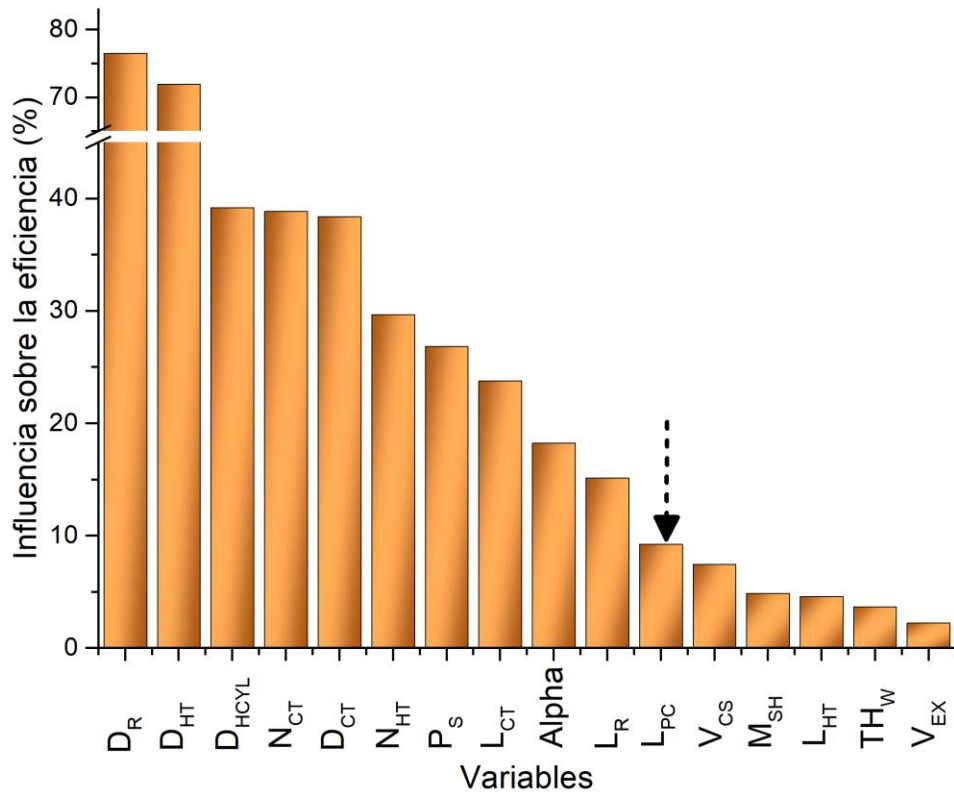


Figura 3.23. Influencia individual de las variables sobre la eficiencia del sistema.

En contraste, un estudio paramétrico convencional muestra las tendencias del comportamiento operativo del sistema, o bien, muestra si existen puntos de inflexión en los parámetros operativos, ya sean máximos o mínimos dentro de un limitado grupo de diseños. Este tipo de exploración ofrece un valor máximo parcial de eficiencia, ya que el resto de las variables permanecen fijas. Además, permite en cierta medida la sensibilización del funcionamiento operativo del sistema. En cambio, la exploración simultánea de pares de variables (metodología propuesta) genera información adicional, ya que se realizan las superficies de respuesta η , el esquema global de interacciones y la jerarquización de las variables. En donde, las superficies de respuesta muestran el comportamiento de la eficiencia del sistema en función de dos variables seleccionadas, denotando las zonas de eficiencias máximas con múltiples puntos de diseño viables, la relación óptima entre dichas variables y el grado de influencia de una de las variables sobre el desempeño de la otra variable seleccionada. Además, con el análisis de estas exploraciones simultáneas, resultan conclusiones más representativas del comportamiento del sistema. Por otra parte, el esquema global de interacciones ilustra de manera abstracta las superficies de respuesta y el grado de influencia de las variables, indicando como una variable afecta a los otros equipos del sistema y que interacciones necesitan ser analizadas con mayor profundidad. La jerarquización de las variables proporciona el orden en el que estas se deben fijar y/o explorar, para que en un proceso iterativo se obtenga un diseño de alto desempeño. Dicha interpretación permite generar recomendaciones, que en un proceso o técnica de optimización pueden ser utilizadas en la definición de funciones objetivo.

A continuación, se presentan el análisis detallado de superficies de respuesta η más importantes del esquema global de interacciones (Figura 3.21), así como las causas y efectos que tienen las variables sobre el sistema. Utilizando dos puntos de diseño de las superficies de respuesta analizadas, se discute la tendencia de los fenómenos termodinámicos involucrados.

Efecto del volumen muerto y propuesta del actuador

En la sección anterior se determinó que son pocas las variables con las que el volumen muerto de la zona de compresión tiene interacciones significativas. Sin embargo, la influencia del volumen muerto sobre los parámetros termodinámicos y eléctricos no fue analizada, por ende, se realizó un estudio a cerca del efecto de este parámetro sobre la eficiencia, potencia neta, frecuencia del

generador y la temperatura de expansión. En la Figura 3.24 se presentan las superficies de respuesta de los principales parámetros termodinámicos, en donde se denota los límites de trabajo. Es decir, en la Figura 3.24a se muestra con una línea punteada la variación en la cantidad del volumen muerto óptima, para que la eficiencia del motor Stirling sea la máxima en función de la cantidad de calor suministrado al ciclo (proporcional a la irradiancia). Además, se observa que la cantidad máxima de volumen muerto requerida en la cámara de trabajo está por debajo de los 250 cm^3 , por lo que, para fines de control nos delimita la cantidad máxima de volumen muerto contenida en el reservorio del actuador de volumen muerto.

Por otra parte, en la Figura 3.24b se presenta el comportamiento de la potencia neta del motor, en función del volumen muerto y la irradiancia. Se observa que intervalo de trabajo del motor es de 700 W a 2.32 kW , según la cantidad de calor suministrado. Sin embargo, es un intervalo de trabajo aceptable. En cambio, en la Figura 2.4c se muestran los intervalos de frecuencia, en los que el sistema debe operar. La pequeña trayectoria indicada en los niveles bajos de frecuencia, es la isolínea de frecuencia constante de 59.3 Hz , indicando el límite inferior del intervalo de trabajo de la frecuencia del sistema. Por lo que, para una operación idónea del sistema cuando la irradiancia se encuentre entre los 400 y 900 W/m^2 , la cantidad de volumen muerto debe ajustarse al perfil de máxima eficiencia. Sin embargo, a irradiancias superiores la cantidad de volumen muerto debe ajustar al perfil de frecuencia mínima constante (59.3 Hz).

Otro de los parámetros analizados es la temperatura en la zona de expansión, cuyo comportamiento en función del volumen muerto y la irradiancia se muestran en la Figura 3.24d. Se denota que en el intervalo de trabajo con irradiancias 400 y 900 W/m^2 el sistema presenta temperaturas de entre 713 K a 971 K , de este modo se garantiza la estabilidad del motor. Sin embargo, cuando el cuándo la cantidad de volumen muerto está regida por el perfil de frecuencia mínima constante, logra temperaturas de hasta 1400 K , lo cual compromete la resistencia de los materiales del calentador y por ende, la vida útil. Por lo que, es necesario medir la temperatura de expansión con la finalidad de realizar paros de emergencia o indicaciones al usuario o al subsistema de control de seguimiento. Si la temperatura de expansión llega a niveles críticos, una técnica de desenfoque controlado pues ser aplicada en el concentrado Scheffler de foco fijo, regresando a los parámetros termodinámicos a un intervalo de trabajo viable.

A partir de este estudio, se determinaron algunos de los límites del sistema, de esta moto se reunió la información para proponer el diseño del actuador de volumen muerto, como se muestra en la Figura 3.25. Este dispositivo cuenta con dos actuadores lineales de 150N, cada uno conectado mecánicamente al vástago de un cilindrillo, los cuales determinan la cantidad de volumen muerto añadido a la cámara de trabajo del motor Stirling. Además, cuenta con un reservorio adicional, el cual está presurizado y conectado a la parte trasera de los cilindrillos, con la finalidad de reducir el trabajo de los actuadores lineales.

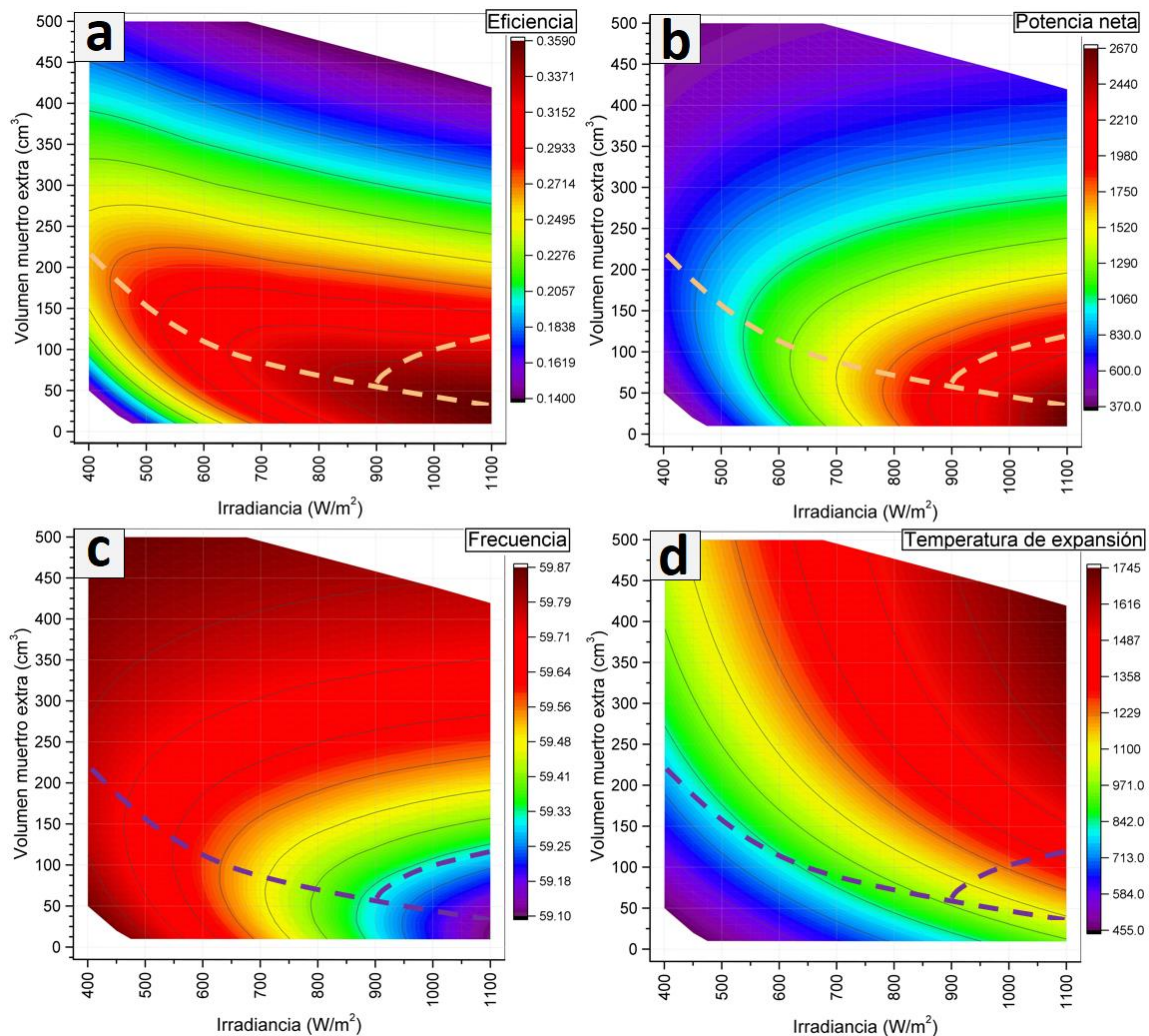


Figura 3.24. Mapas de resultantes de la interacción de el volumen muerto de la zona de compresión con la irradiancia: a) Eficiencia, b) Potencia neta, c) Frecuencia y d) Temperatura de expansión.

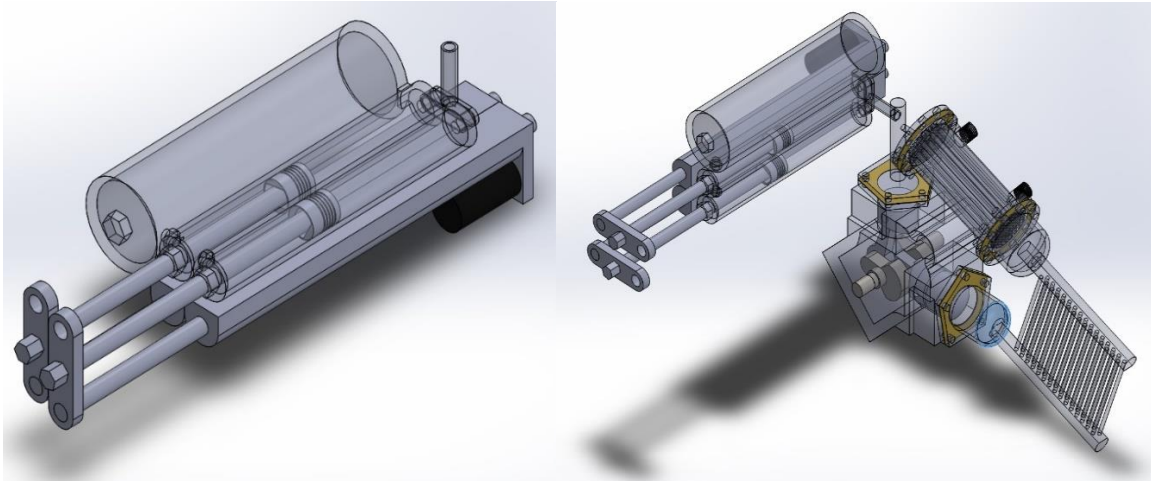


Figura 3.25. Prototipo del actuador del volumen muerto de 500 ml propuesto.

3.4 Estudio operativo del sistema Scheffler-Stirling

Para este sistema Scheffler-Stirling de generación de energía eléctrica se propusieron 4 modos o configuraciones de operación, los cuales están diferenciados por su cantidad de componentes o lógica de control, como se observa en la Tabla 3.3. Todos los modos utilizan un concentrador solar Scheffler de foco fijo para activar el ciclo de un motor Stirling tipo Alfa. Sin embargo, la diferencia se encuentra en el uso del controlador de potencia y/o el inversor de corriente eléctrica (ICE) para manejar los cambios de irradiancia a lo largo del día. El modo 1 no posee control de potencia ni ICE, por lo que a condiciones no permitidas de frecuencia, potencia o temperatura se desconecta de la red y deja de producir energía eléctrica. El modo 2 no utiliza un controlador de potencia, pero implementa un ICE para mitigar las condiciones no permitidas de frecuencia, lo que impacta en la eficiencia del sistema. En el modo 3, un controlador de potencia y un ICE son implementados, en donde el controlador está programado para situarse en el punto de mayor eficiencia y el ICE regula las condiciones de frecuencia. Por último, el modo 4 solo implementa un controlador de potencia, el cual está programado para modificar las condiciones de operación con base al compromiso eficiencia/frecuencia.

Tabla 3.3 Descripción de los componentes de los distintos modos de implementación.

Subsistemas	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Concentrador Scheffler con seguimiento dual	X	X	X	X
Motor Stirling	X	X	X	X
Controlador de potencia	—	—	X	X
Generador de inducción	X	X	X	X
Inversor	—	X	X	—

Por otra parte, en caso de que la frecuencia del voltaje del generador sea menor que el valor mínimo determinado por la norma de la red eléctrica nacional, la variación de la cantidad de V_{CDX} tendrá como punto de consigna mantener la frecuencia mínima permisible constante como se observa en la Figura 3.24c.

Equinoccio de primavera: Operación del sistema

Los cuatro modos de implementación fueron evaluados en el equinoccio de primavera en la ubicación de Mexicali B.C, bajo las mismas condiciones climatológicas. En la Figura 3.27 se observa la irradiancia directa del sol, la cual presenta una potencia inicial de $13.84 W/m^2$ a las 6:00 hrs, una potencia máxima de $890.6 W/m^2$ a las 12:00 hrs y una potencia final de $17.48 W/m^2$ a las 18:00 hrs. Por lo que, se obtiene 12 horas de disponibilidad solar. Integrandó el área bajo la curva de la irradiancia se determina que en el transcurso del día se irradiaron 6.27 kWh por cada metro cuadrado. O bien, aproximadamente una irradiancia promedio de $523 W/m^2$. Los sistemas en modo 1 y 2, comienzan a operar a partir de las 8:30 horas con una irradiancia disponible $406 W/m^2$, generando energía eléctrica con una potencia de 97.6 y 41 W, respectivamente. Esta diferencia es debida a la baja eficiencia del inversor cuando opera con potencias muy distintas a la de su capacidad nominal. En cambio, la operación de los sistemas en modo 3 y 4 inicia a las 8:10 horas, con una irradiancia disponible de $332.4 W/m^2$ y una capacidad de generación eléctrica de 325.24 y 377.94 W, respectivamente. Denotando que el uso del actuador mejora el rendimiento del sistema, ya que los sistemas comenzaron a operar 20 minutos antes que los modos 1 y 2. Sin embargo, cuando la irradiancia es máxima el modo 1 tiene una generación de 1.63 kW, superando a los modos 2 y 3, los cuales tienen una generación eléctrica de 1.55 y 1.59 kW, respectivamente. En cambio, no logra superar la generación de 1.66 kW del sistema en modo 4, ya que el controlador sitúa en la mejor condición de operación a través de la variación del volumen muerto. Aunque el sistema en modo 3 también posee el controlador, tiene una generación menor debió a la eficiencia del inversor.

Por lo que, a baja irradiancia el actuador de volumen muerto permite un incremento en la generación del sistema de 250%, aproximadamente. Sin embargo, a irradiancias elevadas el actuador de volumen muerto solo presenta un incremento de 3.75%, aproximadamente.

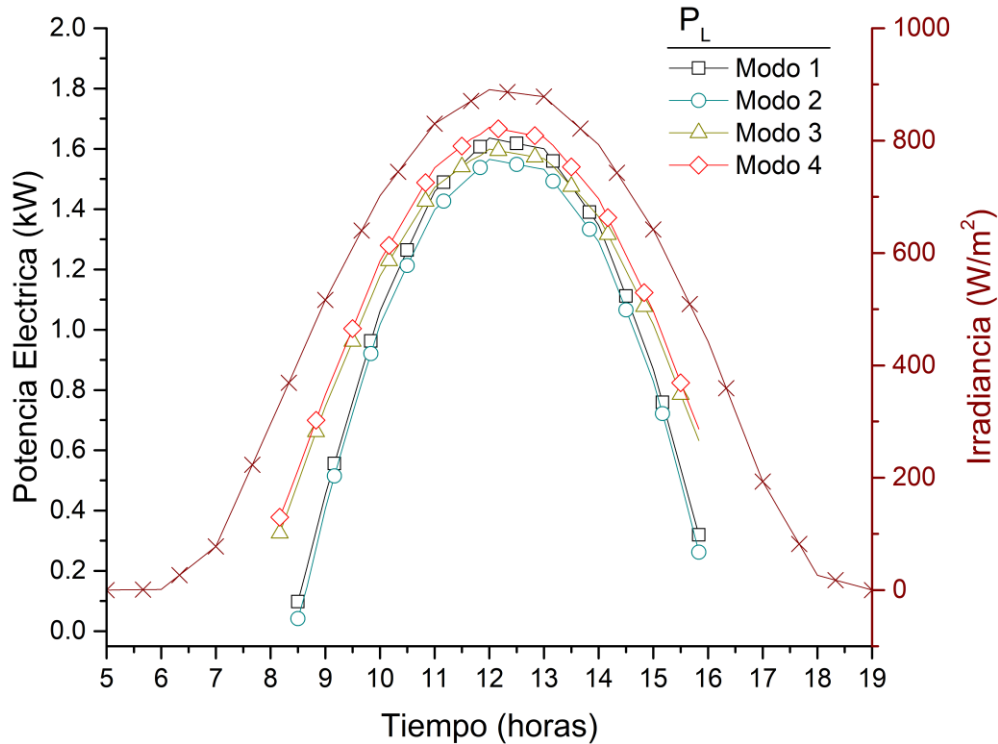


Figura 3.27. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler Stirling en el equinoccio de primavera.

En la Figura 3.28 se muestra la eficiencia de los sistemas y sus motores para equinoccio de primavera. Se denota que las eficiencias de los motores en los sistemas en modo 1 y 2 son iguales, así como las eficiencias de los motores en los sistemas en modo 3 y 4, esto es debido los dos primeros sistemas tienen el mismo motor solo difieren en el uso del inversor. En cambio, los sistemas en modo 3 y 4 tienen implementado el controlador de volumen muerto, pero el motor en los 4 sistemas es el mismo.

El uso del controlador de volumen muerto mejora la eficiencia cuando el calor de entrada es insuficiente, debido a la baja radiación solar. Además, el controlador permite tener un sistema más estable, ya que como se puede observar en la Figura 3.28, la eficiencia tiene un valor mínimo de 23% y máximo de 33.9% (modo 3 y 4). En cambio, en los modos 1 y 2 la variación de la eficiencia tiene como valor mínimo de 4.2% y máximo 32.14%.

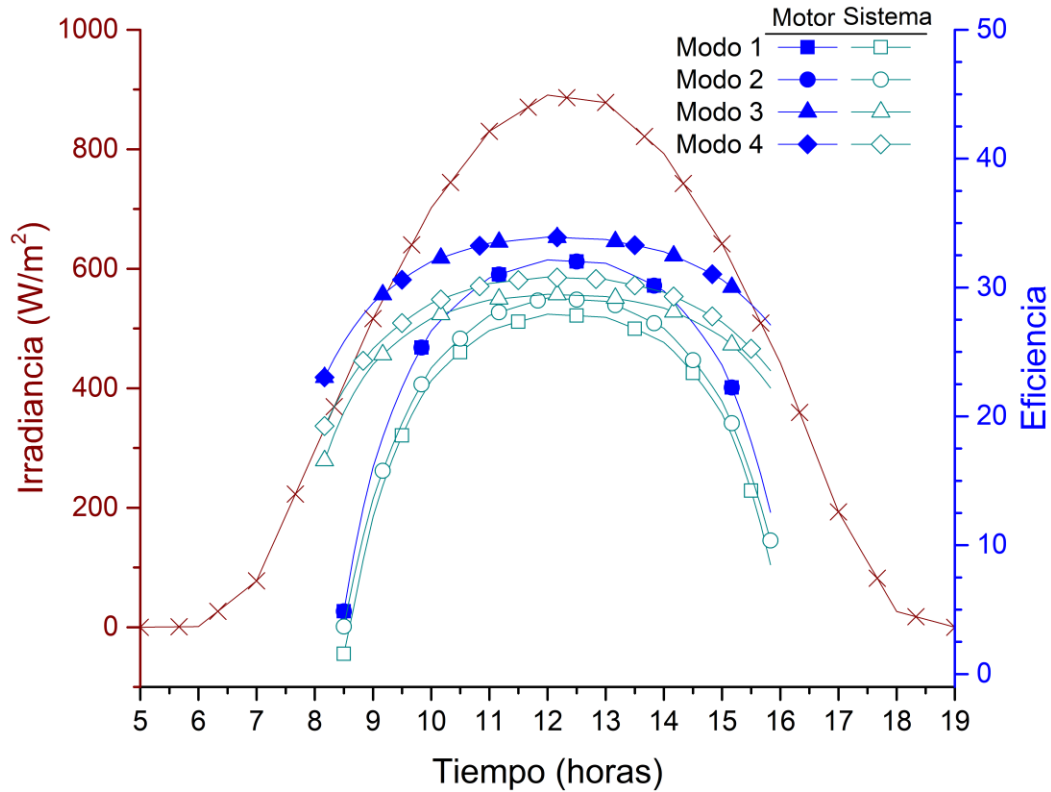


Figura 3.28. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el equinoccio de primavera.

Por otra parte, en la Figura 3.29 se presentan los parámetros termodinámicos de los motores Stirling en los sistemas de generación eléctrica. Se puede observar como en los sistemas en los modos 3 y 4 alcanzan una temperatura máxima de 926.6 K, lo cual es debido al incremento del volumen muerto en el motor, disminuyendo el flujo másico y la presión promedio del motor. Además, debido a la manipulación del volumen muerto se denota que los sistemas en modo 3 y 4 operan a una presión 7.65% menor y una temperatura 21.5% mayor que los sistemas en modo 1 y 2. En la Figura 3.30 se observa como la disminución de la presión promedio en los sistemas en modo 3 y 4 permite la reducción de las pérdidas de energía por caídas de presión en los intercambiadores de calor hasta en un 19.5% en comparación de los sistemas en modo 1 y 2. En cambio, el aumento de temperatura incrementa considerablemente las pérdidas de calor en la zona de expansión y del regenerador hasta en un 51.2% y 45.7% , respectivamente.

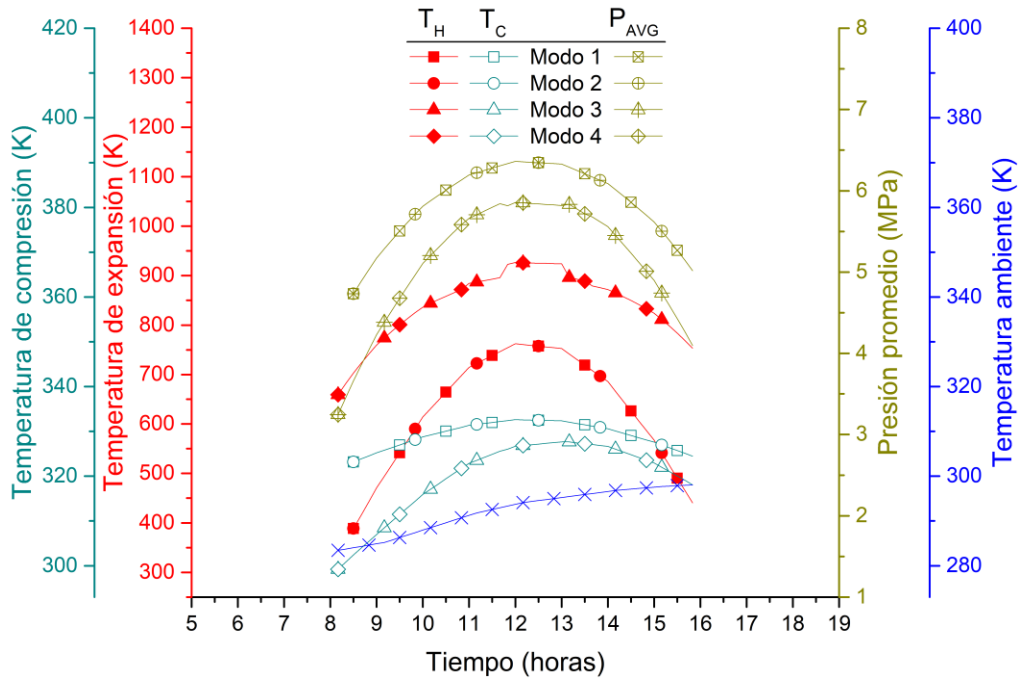


Figura 3.29. Parámetros termodinámicos del motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el equinoccio de primavera.

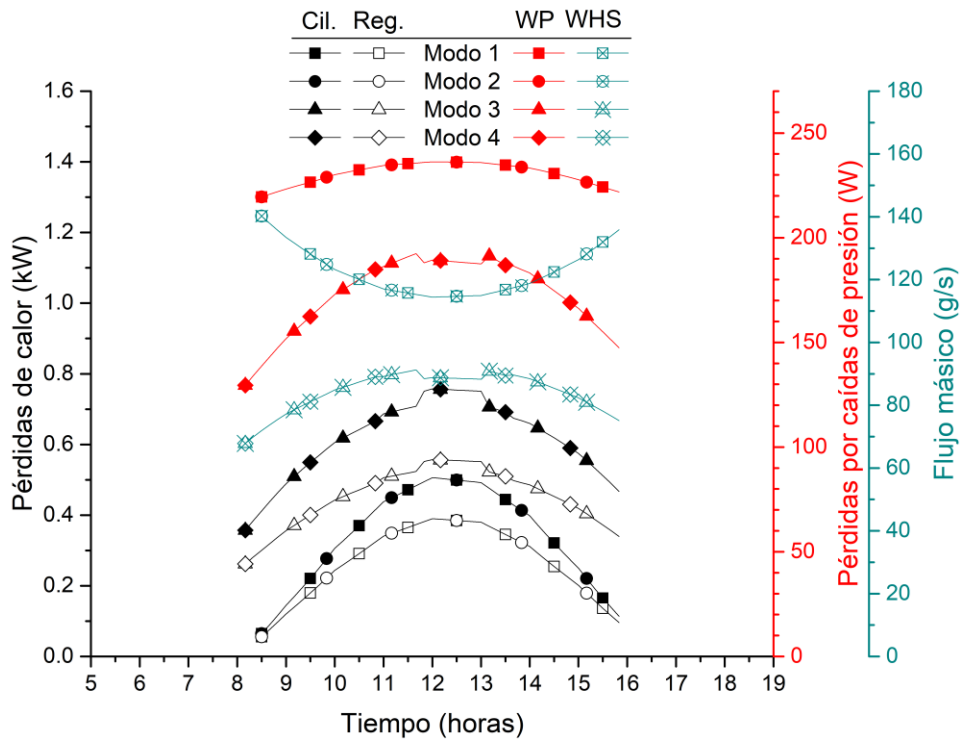


Figura 3.30 Pérdidas de energía térmica y por caídas de presión en el motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el equinoccio de primavera.

En la Figura 3.31 se presenta un análisis opto-geométrico por trazado de rayos, en donde el sistema propuesto fue colocado de tal modo que captara el sol a medio día en el equinoccio de primavera. Los rayos que inciden de manera normal al área de apertura del disco Scheffler son reflejados al punto focal de la parábola de origen, en el cual se encuentra el motor Stirling tipo alfa.

En contraste, una comparación de la producción eléctrica, potencias, eficiencias y tiempo de operación es mostrado en la Tabla 3.4. El sistema en modo 4 es el que presenta mejor desempeño con una producción de energía eléctrica de 9.727 kWh con una eficiencia promedio de 28.13%.

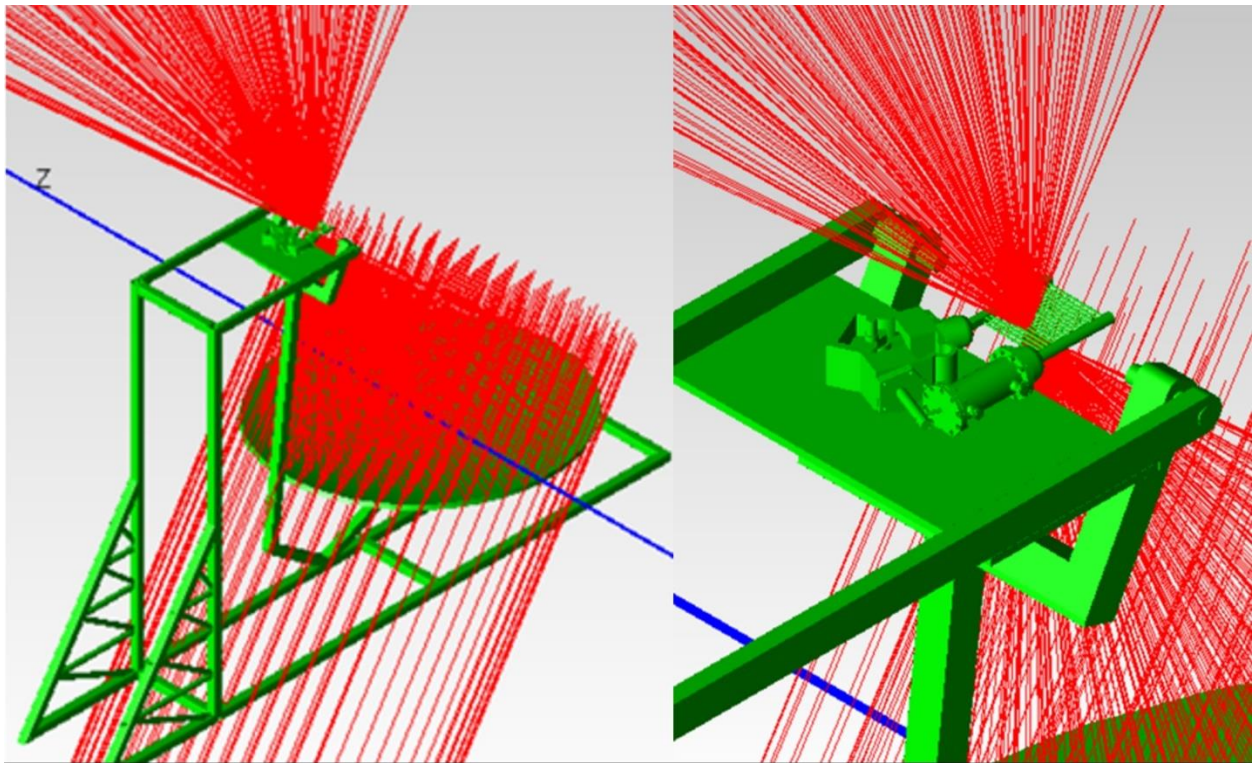


Figura 3.31. Estudio del trazado de rayos del sistema Scheffler-Stirling en equinoccio de primavera a 12:00, hora solar.

Tabla 3.4. Comparación del desempeño de los sistemas de generación de energía eléctrica en el equinoccio de primavera.

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Energía térmica (kWh)	36.412	36.412	37.195	37.195
Energía eléctrica (kWh)	8.03	8.44	9.29	9.727
Potencia mecánica promedio (kW)	1.2	1.2	1.38	1.38
Eficiencia promedio del motor	24.87	24.87	31.04	31.04
Eficiencia promedio del sistema	21.06	22.22	26.82	28.13
Tiempo de operación	9:10	9:10	9:30	9:30

Solsticio de verano: Operación del sistema

Los sistemas en los cuatro modos de implementación fueron evaluados en el solsticio de verano para la región de Puertecitos B. C., con la finalidad de determinar su desempeño en la generación eléctrica. En la Figura 3.32. Evaluación de la potencia eléctrica y frecuencia del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de verano. se observa que en este día la mañana comienza con una irradiancia de 2.77 W/m^2 a las 5:00 hrs, a medio día se tiene una irradiancia máxima de 993.4 W/m^2 y a las 19:10 hrs se presentan 13.67 W/m^2 , dando aproximadamente 14 horas con disponibilidad del recurso solar. Integrando la irradiancia en función del tiempo se tiene que la cantidad de energía por metro cuadrado es de 7.95 kWh, o bien, se presenta una irradiancia promedio de 568 W/m^2 . Sin embargo, no es hasta las 7:40 horas que los sistemas en modo 1 y 2 comienzan a operar, con una capacidad de 46.78 y 104.57 W. Sin embargo, los sistemas en modo 3 y 4 operan desde las 7:20 con una capacidad de 315.58 y 369 W.

Analizando las potencias máximas alcanzadas a medio día, se vislumbra que como el sistema en modo 2 tiene una potencia máxima de 1894 W, superior a la potencia máxima de los otros modos, incluso del modo 4. Sin embargo, el modo 2 sufre una desconexión de la red, debido a que este no posee regulador de frecuencia, en cambio el modo 4 manipula sus condiciones a través de la variación del volumen muerto. Esta variación afecta al sistema tal que, sacrifica el punto de mayor eficiencia por un punto de operación que satisfaga los parámetros de interconexión, es decir, la frecuencia.

En la Figura 3.33 se presentan las eficiencias de los motores Stirling y la eficiencia global del sistema en el solsticio de verano. Se puede observar que la eficiencia de los motores en los sistemas difiere en las mañanas y tardes, es decir a baja irradiancia, ya que el control de volumen muerto presenta su mayor aporte cuando el calor de entrada es insuficiente. En cambio, cuando la irradiancia es máxima se observa que el desempeño de los motores es prácticamente el mismo, pero el desempeño de los sistemas difiere levemente por la eficiencia del inversor.

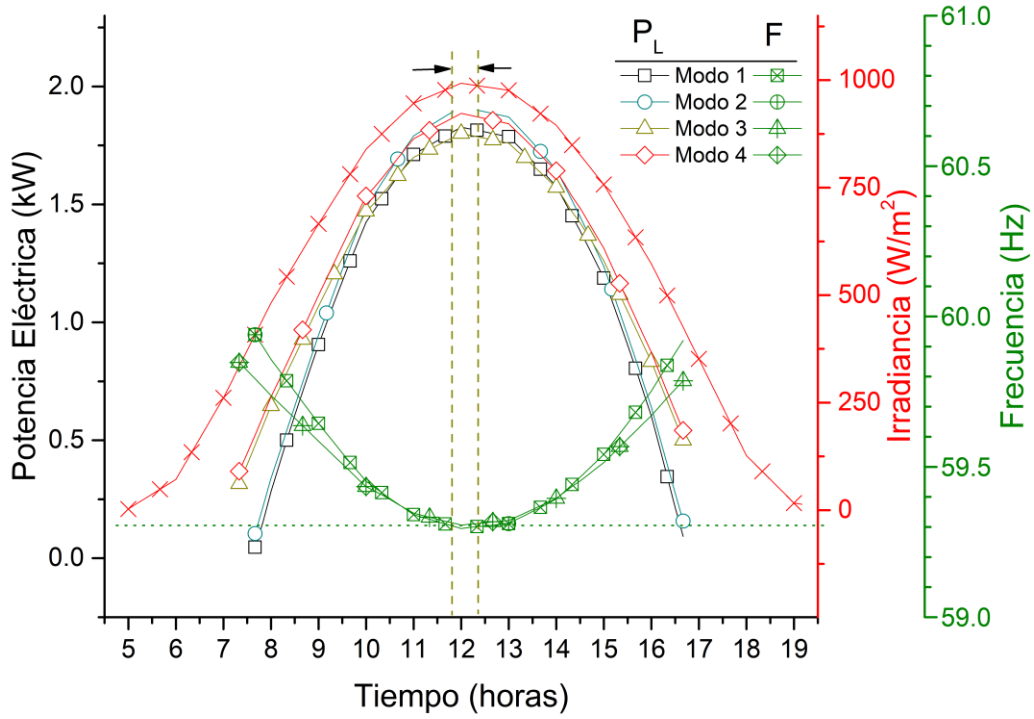


Figura 3.32. Evaluación de la potencia eléctrica y frecuencia del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de verano.

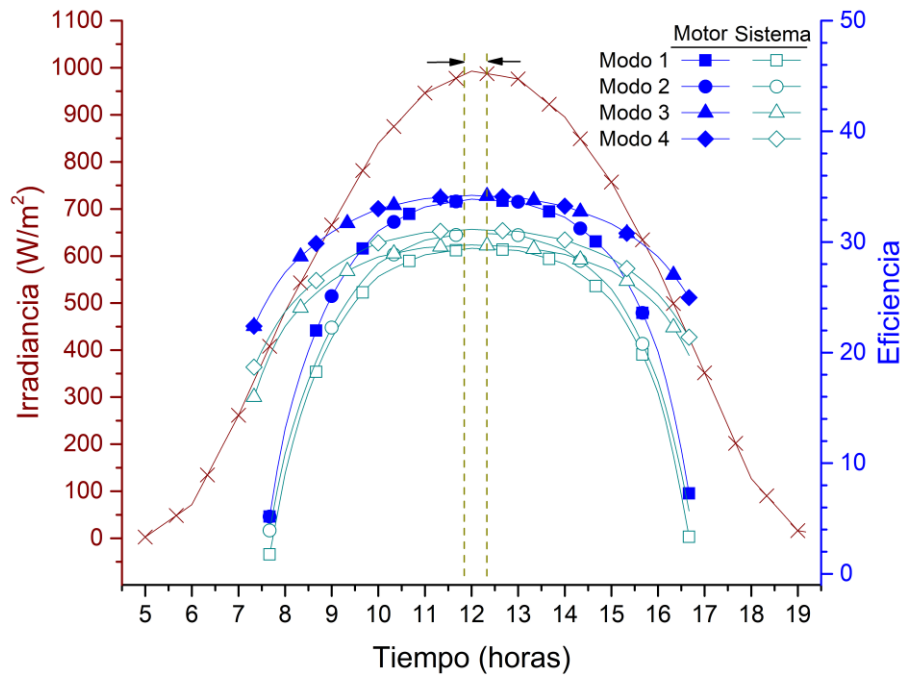


Figura 3.33. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de verano.

En la Figura 3.34 se muestra algunos de los parámetros termodinámicos de los motores Stirling tales como la temperatura de expansión, compresión y ambiente. Se observa como los motores con el subsistema de control de volumen muerto operan a una presión 7.4% menor y a una temperatura de expansión 24.5% mayor que los motores que no lo tienen (modo 1 y 2). Dado este incremento, la temperatura de compresión presenta un aumento considerable, además que de manera conjunta la temperatura ambiente aumenta, disminuyendo su gradiente en el subsistema de enfriamiento externo.

Dado que en los sistemas en modo 3 y 4 la temperatura de expansión es mayor, en la Figura 3.35 se puede observar el incremento en las pérdidas de calor en el cilindro y regenerador hasta en un 34.6%. En cambio, dado que estos modos operan a presiones menores, las pérdidas de energías por caídas de presión en los intercambiadores de calor son reducidas en un 16.8%. Sin embargo, el hecho de que la presión promedio disminuya y las pérdidas de calor en la zona de expansión aumenten no hace que el sistema se menos eficientes, sino al contrario. La Figura 3.36 presenta los calores de entrada y salida de los motores evaluados, se puede observar cómo los sistemas con controlador de volumen muerto (modo 3 y 4) son capaces de mantener un calor de rechazo en el enfriador menor a diferencia de los modos 1 y 2.

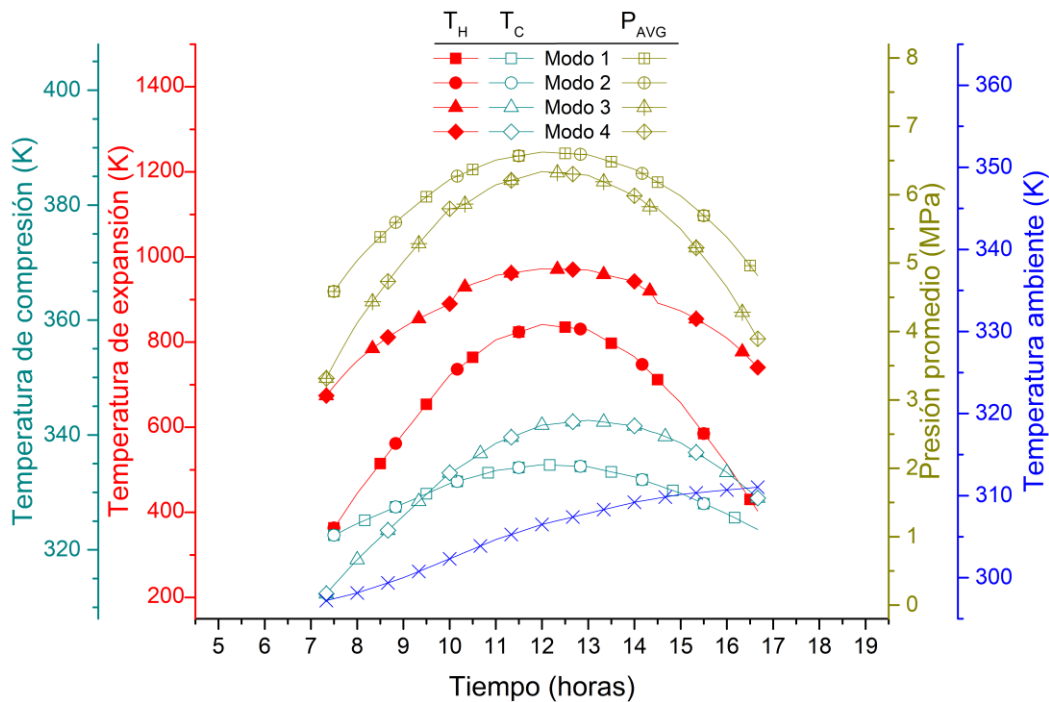


Figura 3.34. Parámetros termodinámicos del motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de verano.

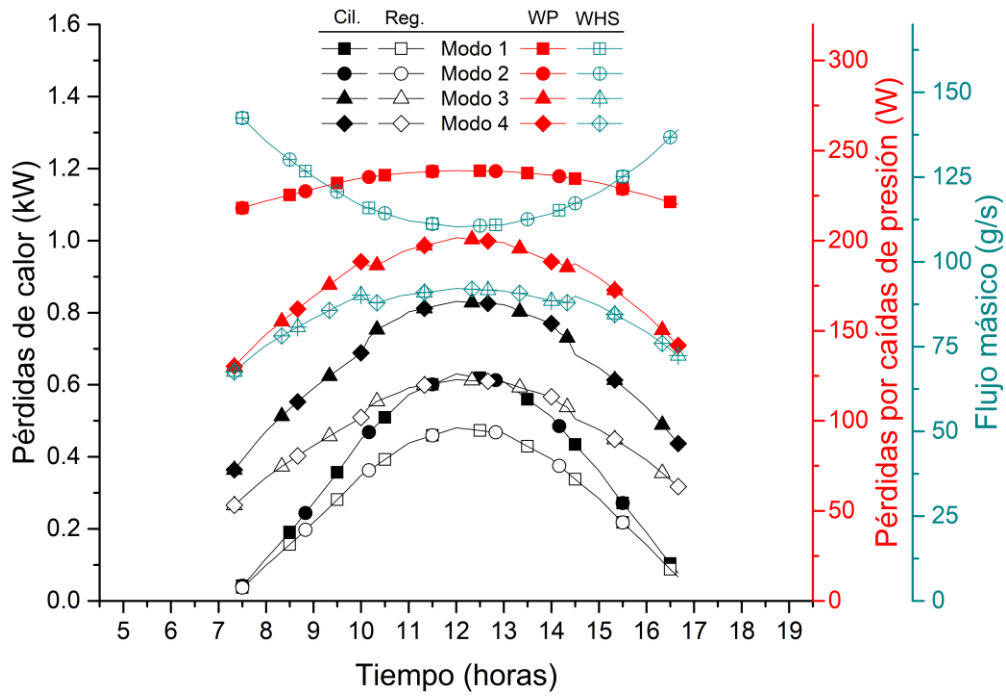


Figura 3.35. Pérdidas de energía térmica y por caídas de presión en el motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de verano.

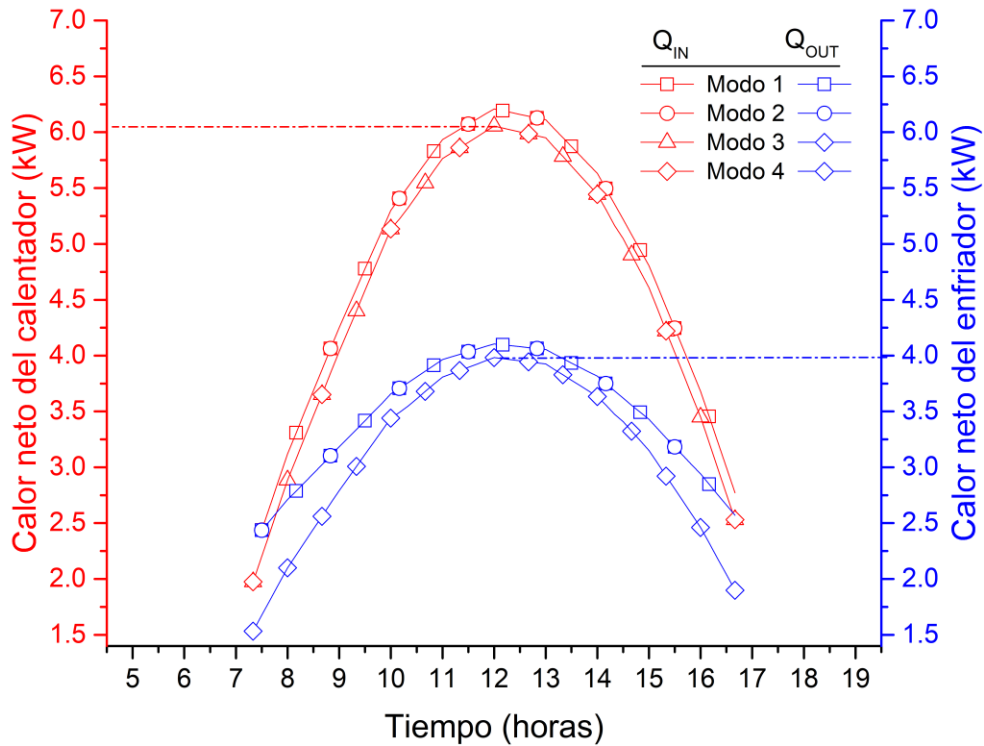


Figura 3.36. Calor de entrada y salida del motor Stirling en el solsticio de verano.

En la Figura 3.37 se presenta un análisis a través de un software de trazado de rayos, en donde el sistema propuesto (sin importar el modo de implementación) fue colocado de tal modo que captara el Sol a medio día en el solsticio de verano. Los rayos incidentes de manera normal al área de apertura del disco Scheffler son reflejados al punto focal fijo, en el cual se encuentra el motor Stirling tipo alfa. El compromiso entre estructura y sistema de seguimiento hace que el punto focal siempre este fijo sin importar la fecha y hora, pero se debe recordar que existen zona en las que este sistema es incapaz de seguir el Sol.

En contraste, una comparación de la producción eléctrica, potencias, eficiencias y tiempo de operación es mostrado en la Tabla 3.5. El sistema en modo 4 es el que presenta mejor desempeño con una producción de energía eléctrica de 12.78 kWh con una eficiencia promedio de 30.26%. Sin embargo, el modo 2 dice presentar una eficiencia promedio de 24.19%, la cual es calculada a partir solo de las 8:50 horas de operación. Es por ello, que presenta mayor eficiencia que el modo 1 a pesar de tener mayor generación de energía eléctrica. Por otra parte, es importante mencionar que los límites del mecanismo de seguimiento tienen un impacto considerable en el tiempo de operación, ya que a pesar de que en la mañana la irradiancia pueda activar el ciclo Stirling, el sistema de seguimiento no es capaz de colocar al disco Scheffler en la posición oportuna para la captación solar.

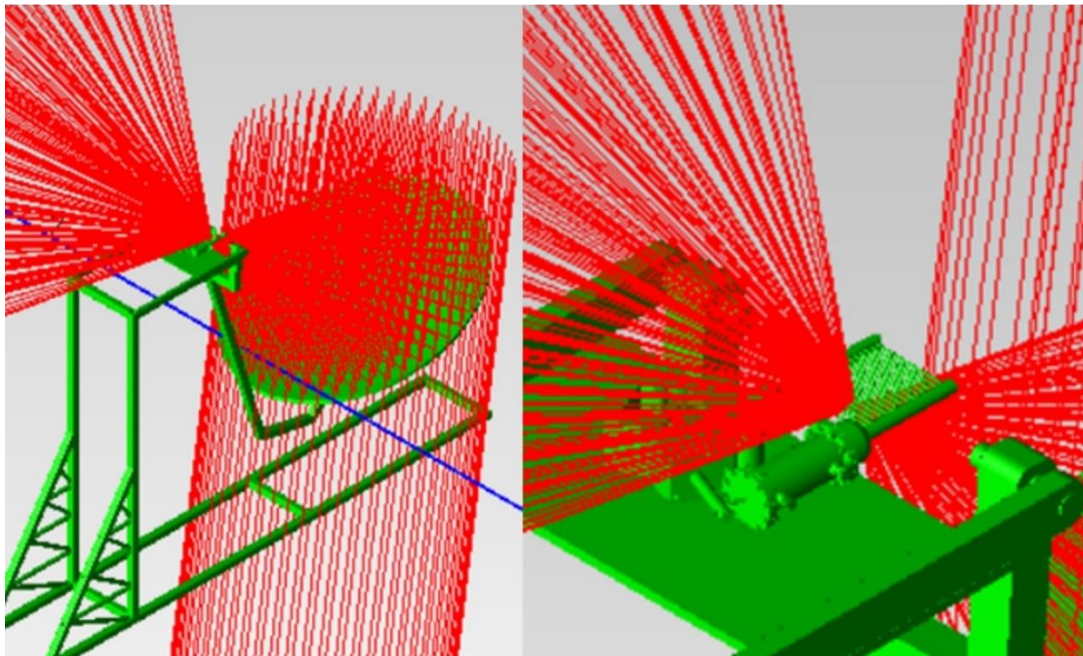


Figura 3.37. Estudio del trazado de rayos del sistema Scheffler-Stirling en solsticio de verano a 12:00, hora solar.

Tabla 3.5. Comparación del desempeño de los sistemas de generación de energía eléctrica en el solsticio de verano.

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Energía térmica (kWh)	48.25	46.04	48.31	48.31
Energía eléctrica (kWh)	11.18	11.12	12.2	12.78
Potencia mecánica promedio (kW)	1.47	1.39	1.6	1.6
Eficiencia promedio del motor	28.25	26.97	33.72	33.72
Eficiencia promedio del sistema	24	24.19	28.83	30.26
Tiempo de operación	9:10	8:50	9:30	9:30

Solsticio de invierno: Operación del sistema

El solsticio de invierno es otra de las fechas importantes para evaluar los sistemas solares, ya que contiene irradiancias bajas, pocas horas de recurso solar disponible, bajas alturas solares, entre otros. Por lo que, los sistemas de generación de energía eléctrica en sus cuatro modos de implementación han sido evaluados en dicha fecha. En la Figura 3.38 la irradiancia y la potencia eléctrica de los cuatro sistemas en el solsticio de invierno, en donde se puede observar que la irradiancia máxima es de 561.3 W/m^2 y 10 horas con disponibilidad solar. Integrando el área bajo la curva de la función de la irradiancia se obtiene una cantidad de energía por metro cuadrado de 3.3 kW y una irradiancia promedio de 330 W/m^2 .

Los sistemas en modo 1 y 2 comienzan a operar a partir de las 9:50 horas con una capacidad de 20.06 y 64.84 W, respectivamente. Además, su capacidad máxima se limita a 562.68 y 601.96 W respectivamente, esto es debido a que ambos sistemas carecen del controlador de volumen muerto para colocarlos en un mejor punto de operación. Por otra parte, los sistemas en modo 3 y 4 si tiene controlador y comienzan a operar a las 8:40 horas con una capacidad de 75 y 138 W respectivamente, superando en un 200% en la capacidad de arranque de los sistemas en modo 1 y 2. Además, la capacidad máxima de los sistemas en modo 3 y 4 supera a los anterior hasta en un 60%, con una potencia eléctrica de 848.56 y 888.22 W, respectivamente.

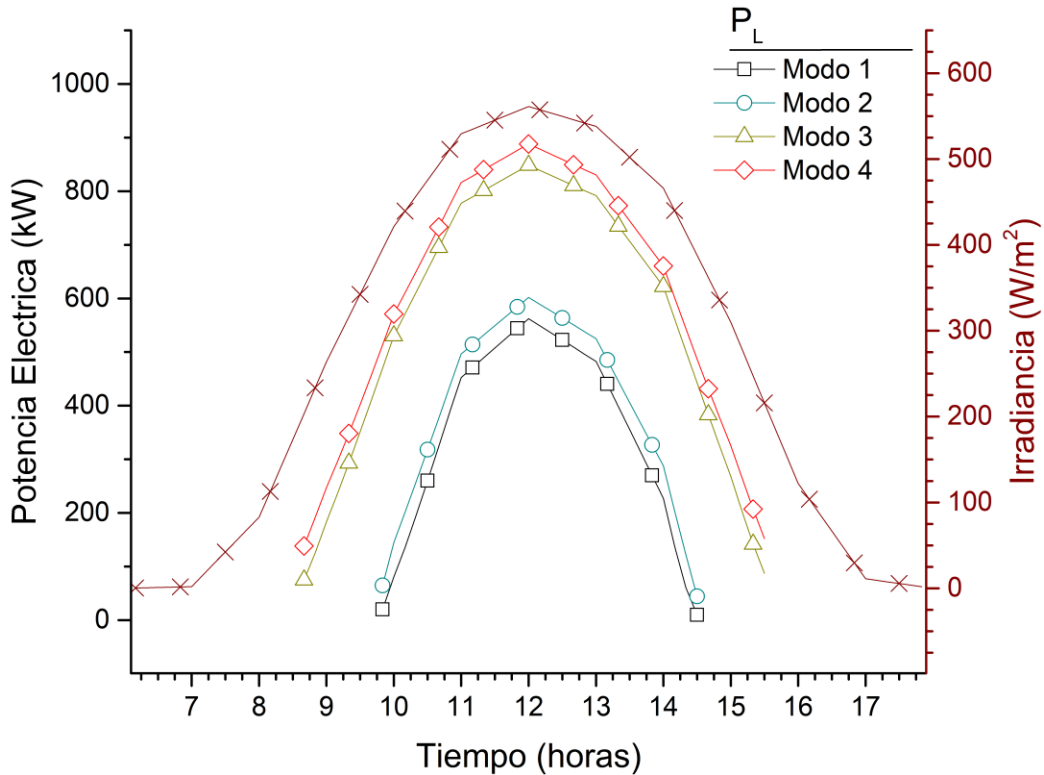


Figura 3.38. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de invierno.

En la Figura 3.39 se presentan las eficiencias de los motores y globales del sistema en los cuatro modos de operación. Como se mencionó con anterioridad el desempeño de los motores de los sistemas en modo 1 y 2 es el mismo entre ellos, al igual que los motores de los sistemas en modo 3 y 4. Es notable que el control del volumen muerto aporta una mejora tanto en tiempo de operación como en desempeño, la eficiencia máxima de los sistemas con control es de 29.68%, siendo un 53% mayor que los sistemas que no lo emplean. Lo anterior es debido a las mejoras que tiene el controlador de volumen muerto a baja radiación solar, o bien, cuando el calor de entrada es insuficiente.

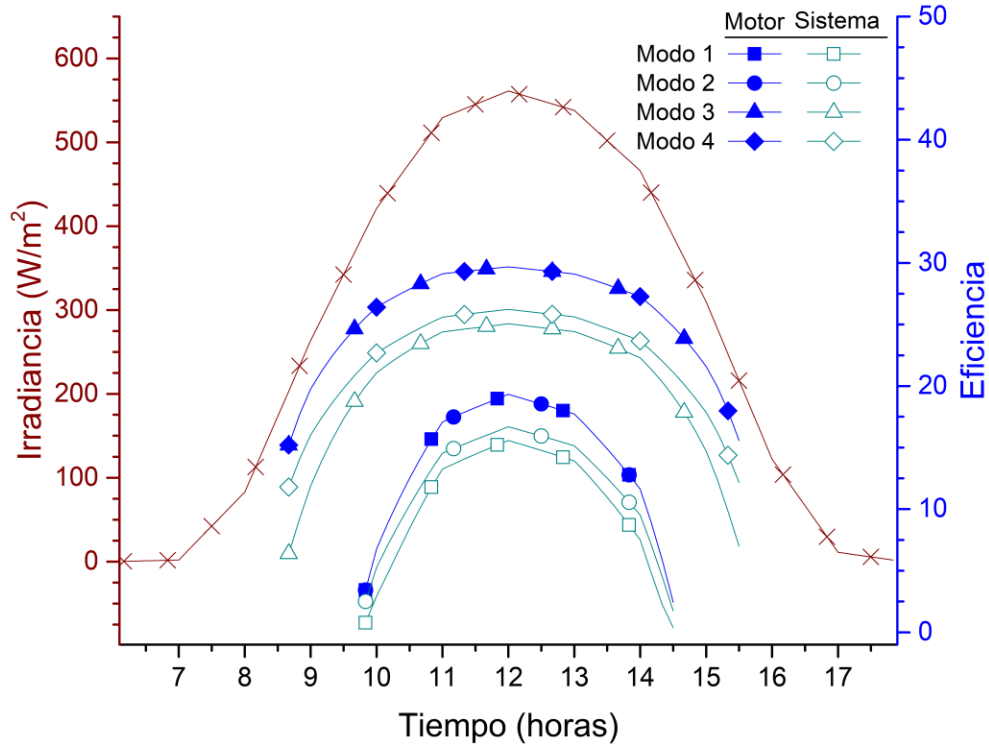


Figura 3.39. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el solsticio de invierno.

En la Figura 3.40 se presentan algunos de los parámetros termodinámicos de los motores Stirling, en donde se observa que los sistemas en modo 3 y 4 tiene una temperatura de operación 55% mayor y una presión promedio 16.72% menor, que los sistemas en modo 1 y 2, debido al uso del controlador de volumen muerto. Por otra parte, en invierno el incremento en la temperatura ambiente no es tan significativo como en las otras épocas, por lo que dicho incremento no parece afectar el desempeño de los motores.

En la Figura 3.41 se presentan las pérdidas de calor y de energía por caídas de presión en los intercambiadores, en donde se observa que las pérdidas de calor en el cilindro son las que impactan en mayor medida en el desempeño del motor. Dichas pérdidas en los sistemas en modo 3 y 4 son 216% mayores que en los sistemas que no implementan el controlador, esto es debido por el aumento en la temperatura de expansión. Sin embargo, a pesar del incremento de dichas pérdidas, las condiciones de operación logran aumentar la tasa de transferencia de calor, mejorando la eficiencia de los sistemas, como se determinó en la Figura 3.39.

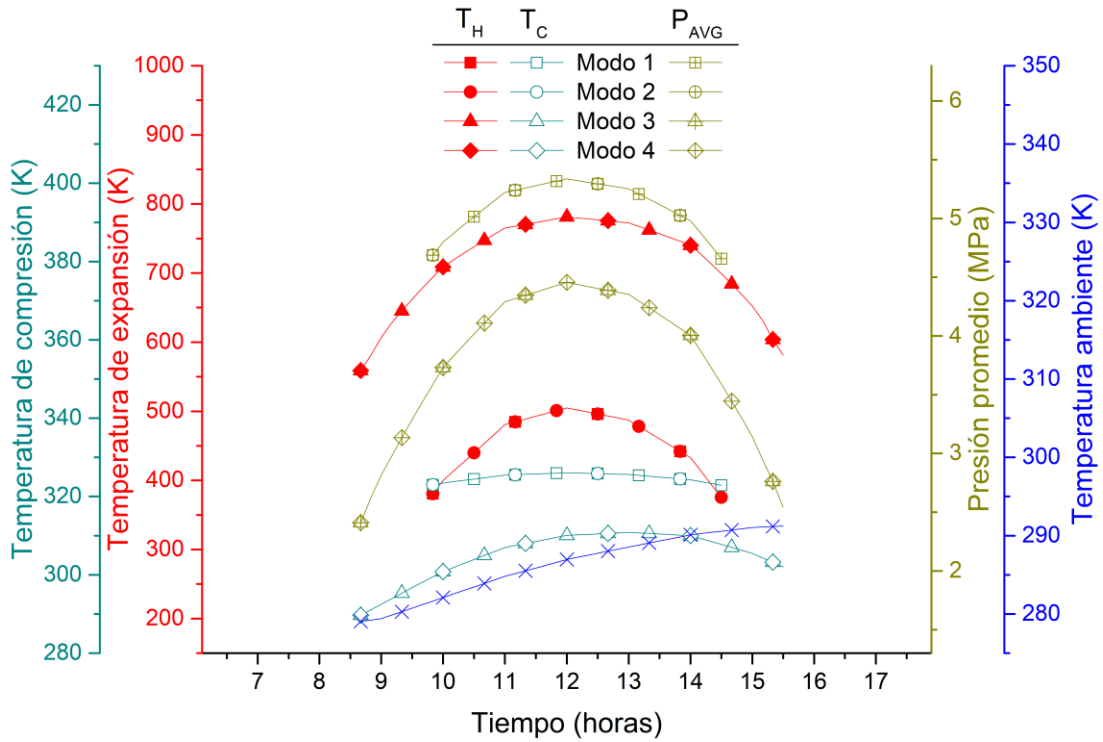


Figura 3.40. Parámetros termodinámicos del motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de invierno.

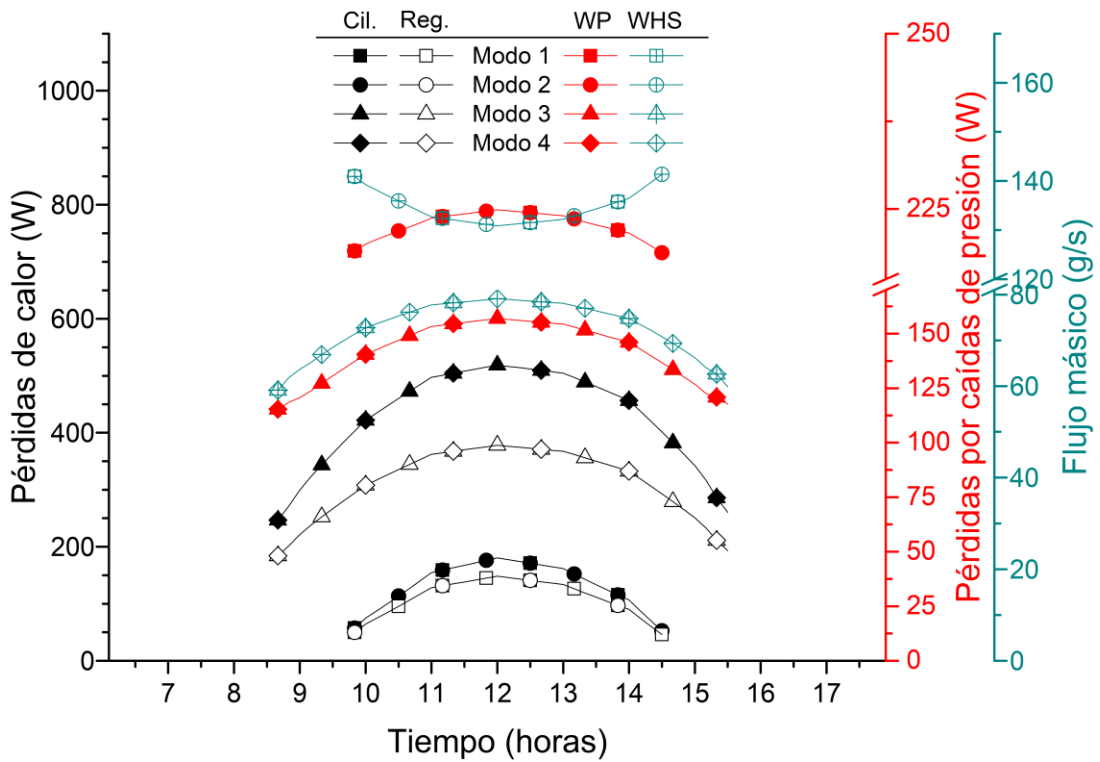


Figura 3.41. Pérdidas de energía térmica y por caídas de presión en el motor Stirling en los diferentes modos propuestos en el solsticio de invierno.

De manera similar al equinoccio de primavera y solsticio de verano, en la Figura 3.42 se presenta un análisis a través de un software de trazado de rayos del sistema propuesto (sin importar el modo de implementación). Se colocó de tal modo que captara el sol a medio día en el solsticio de invierno, cuya altura solar corresponde a los 34° , aproximadamente. Recordando que el disco parte de una parábola, de este modo los rayos incidentes de manera normal al área de apertura son reflejados al punto focal fijo, en donde se encuentra el motor Stirling tipo alfa. En esta época del año se presentan los ángulos solares más bajos por lo que el eje de seguimiento de la altura solar oscila entre los -10° a 60° , según el marco de referencia antes presentado.

En contraste, una comparación de la producción eléctrica, potencias, eficiencias y tiempo de operación es mostrado en la Tabla 3.6. Como en los casos anteriores, el sistema en modo 4 presenta el mejor desempeño con una producción de energía eléctrica de 4.24 kWh con una eficiencia promedio de 22.23%. Además, los sistemas con control 45% más tiempo de operación que los que no lo implementan (modo 1 y 2). Por otra parte, es importante mencionar que los límites del mecanismo de seguimiento no tienen ningún efecto en los tiempos de operación en esta fecha, sino más bien la cantidad de energía disponible en las mañanas y tardes.

Tabla 3.6. Comparación del desempeño de los sistemas de generación de energía eléctrica en el solsticio de invierno.

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Energía térmica (kWh)	16.18	16.18	20.38	20.38
Energía eléctrica (kWh)	1.71	1.95	3.93	4.24
Potencia mecánica promedio (kW)	329	329	700	700
Eficiencia promedio del motor (%)	9.83	9.83	25.83	25.83
Eficiencia promedio del sistema (%)	7.23	8.29	20	22.23
Tiempo de operación	4:50	4:50	7:00	7:00

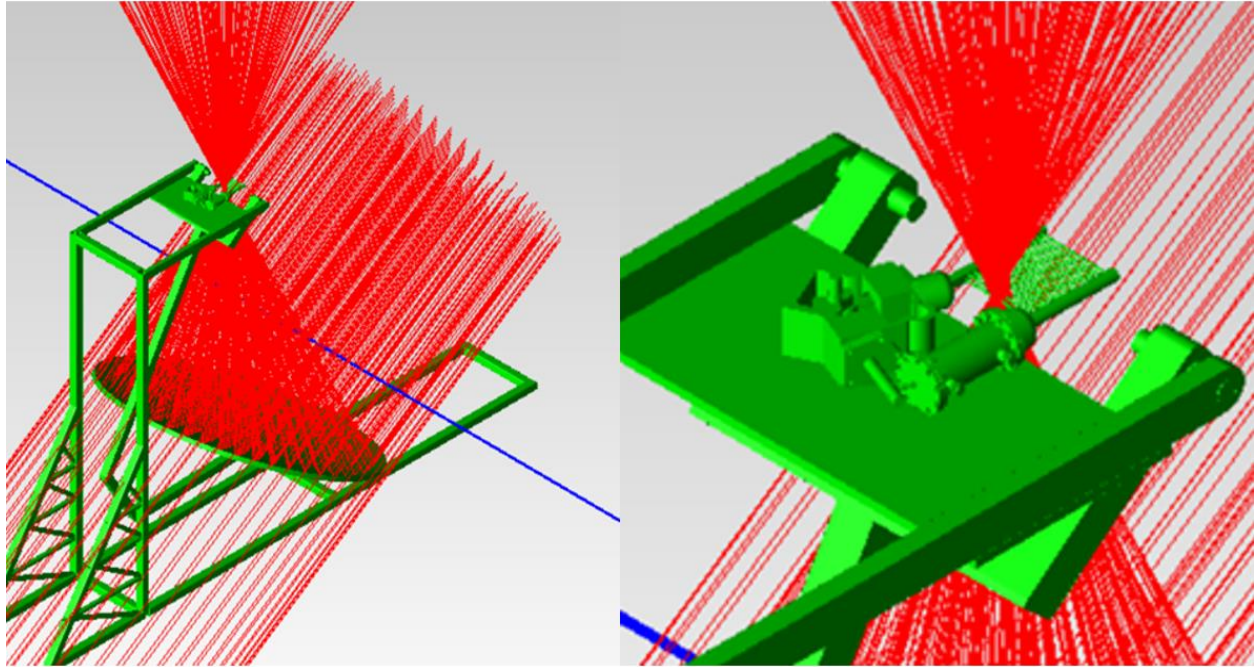


Figura 3.42. Estudio del trazado de rayos del sistema Scheffler-Stirling en solsticio de invierno a 12:00, hora solar.

Día con un nublado: Operación del sistema

Recordando que la simulación es en estado estable con incrementos de 10 minutos, se utilizó un día que contuviera una baja de irradiancia en un momento del día debido a la interferencia de nubosidad. Se realizó la evaluación de los sistemas en los cuatro modos de implementación en el día juliano 177, el cual está muy cercano al solsticio de verano. En la Figura 3.43 se muestra la irradiancia y el desempeño de los sistemas, en donde la irradiancia presenta dos máximos relativos y un mínimo local de 945.77, 696.14 y 416.6 W/m^2 , respectivamente. Con aproximadamente 14 horas de operación, presenta una irradiancia promedio de 484 W/m^2 . En la figura se puede observar que alrededor de las 13:00 horas se presenta un nublando importante, el cual merma la producción de energía eléctrica en los cuatro sistemas. Además, se observa que la perturbación no consigue desestabilizar la frecuencia de sus rangos permisibles, por lo que el sistema en modo 2 no se desconecta de la red en ningún momento de este día.

Por otra parte, en la Figura 3.44 se muestra la eficiencia global y de los motores de los cuatro sistemas evaluados en el día (177 juliano) nublando seleccionado, en donde el arranque de los sistemas 3 y 4 solo es 10 minutos antes que los sistemas 1 y 2. Además, cuando se presenta el nublando, las eficiencias de los motores Stirling en los sistemas 3 y 4 es 298% mejor que en los

otros modos, de este modo el uso del controlador reitera ser un potencializador de la tecnología de generación eléctrica cuando el calor suministrado es insuficiente.

O bien, en la Figura 3.45 se muestra la producción de energía eléctrica de los sistemas evaluados en este día nublado, en donde también se presenta la eficiencia promedio. La pequeña diferencia en el desempeño de los sistemas en modo 1 y 2, es debida a que el modo 1 utiliza un sistema de inversor eléctrico cuya eficiencia no es del 100%. Por otra parte, el sistema en modo 4 es el que tiene mejor desempeño, ya que no depende de otro equipo, sino solo del controlador. Es decir, que al utilizar un equipo menos (inversor) tiene un desempeño 26.18% mejor que el modo 1 y 4.86% mejor que el modo 2, por lo que es más atractivo económicamente.

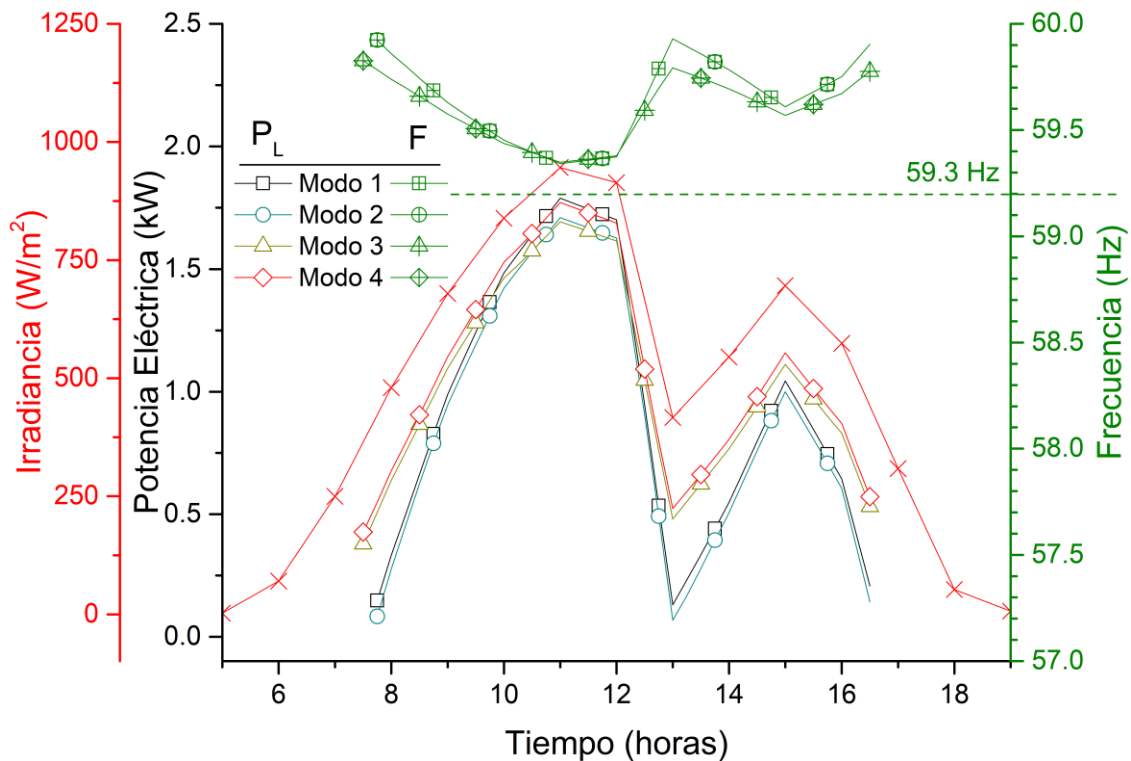


Figura 3.43. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler-Stirling en un día nublado.

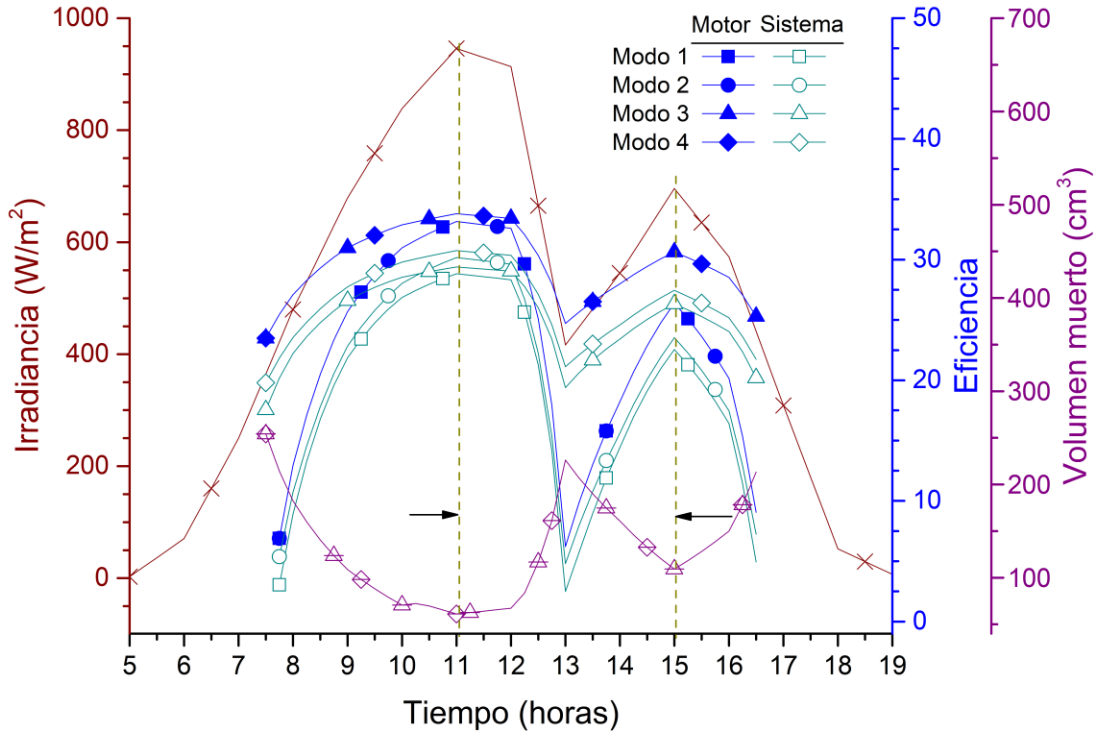


Figura 3.44. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en un día nublado.

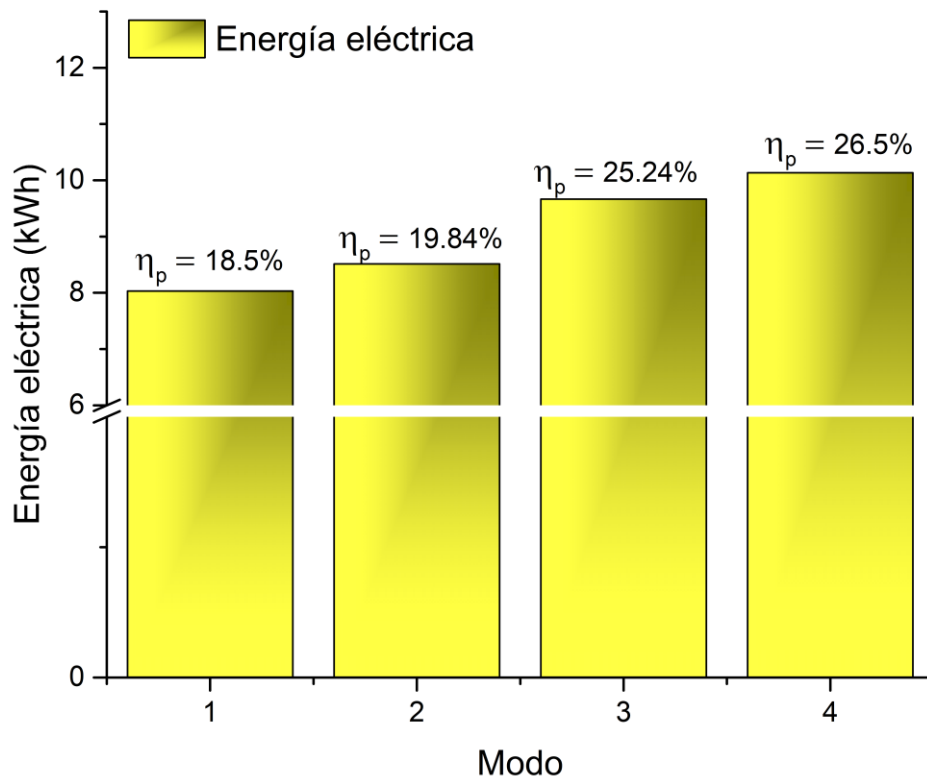


Figura 3.45. Energía eléctrica y eficiencia promedio de los diversos modos propuestos en el día nublado.

Día con la máxima irradiancia: Operación del sistema

Otro de los escenarios muy importantes a analizar, son los días que contengan irradiancias máximas, la cuales se presentan esporádicamente en el año para este caso de estudio. Sin embargo, lo que realmente determina si la irradiancia es máxima, es el dimensionamiento del disco Scheffler y/o del motor Stirling. Es decir, que un buen dimensionamiento también es fundamental para el correcto funcionamiento del controlador de volumen muerto. En la Figura 3.46 se muestra la irradiancia y la capacidad de generación de los sistemas en los cuatro modos de implementación, los cuales fueron evaluados en el día juliano 156. El sistema en modo 1 y 3 no presentan ningún problema o singularidad en su funcionamiento, debido al uso del inversor para la estabilización de los parámetros eléctricos. Sin embargo, el modo 2 sufre de desconexión a red a partir de 10:30 hasta la 13:30 horas, por lo que las horas de máxima producción no son aprovechadas. En cambio, el sistema en modo 4, en el lapso de 10:30 a 13:30 utiliza su sistema de control para manipular la cantidad de volumen muerto y mantener la mínima frecuencia permitida, reduciendo en un 3.4% la capacidad de generación máxima.

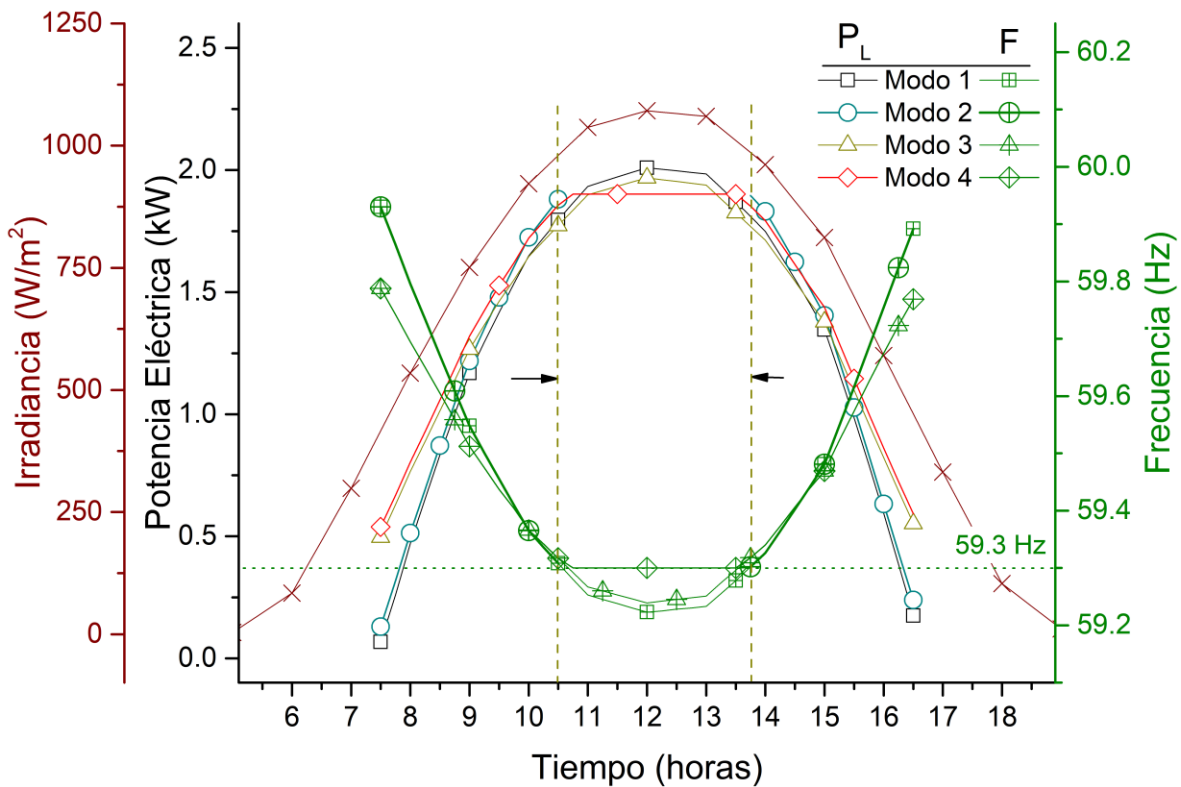


Figura 3.46. Evaluación de la potencia eléctrica del sistema Scheffler-Stirling en el día con máxima irradiancia.

En la Figura 3.47 se presentan las eficiencias globales y de los motores de los sistemas de generación eléctrica, en contraste con la irradiancia del día evaluado. Recordando que el mayor aporte del controlador de volumen muerto se presenta cuando el calor de entrada es insuficiente, es decir, en la mañana, tarde o nublado, es de esperarse que a medio día las eficiencias de los motores sean bastante similares. Sin embargo, a medio día solar en el sistema en modo 4 se puede observar la variación en la cantidad de volumen muerto, la cual mantiene la frecuencia en el rango permitido. En cambio, el modo 3 continua con su lógica de control para determinar el mejor punto de operación, ya que los parámetros eléctricos son estabilizados por el inversor.

No obstante, en la Figura 3.48 se muestra como el sistema en modo 4 presenta una eficiencia promedio de 28.7%, mayor que la del modo 3. Por lo que, la ventaja del modo 3 en estas condiciones de operación, es mitigada por la eficiencia del inversor. Aunque la mejora del sistema en modo 4 no sea mayor al 4%, sigue siendo mejor que el modo 3 y con un equipo menos, el inversor. En cambio, el hecho de no implementar un inversor, hace que el modo 2 produzca 43.14% menos energía eléctrica.

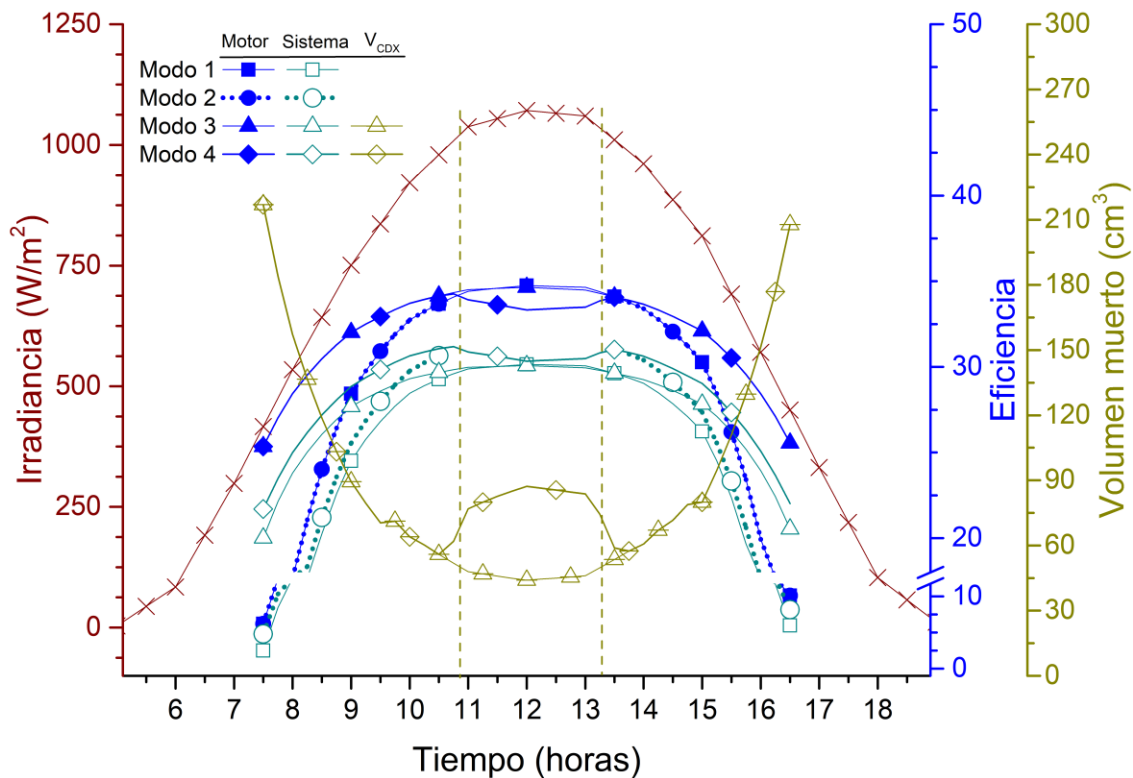


Figura 3.47. Evaluación de la eficiencia del motor y del sistema Scheffler Stirling en el día con máxima irradiancia.

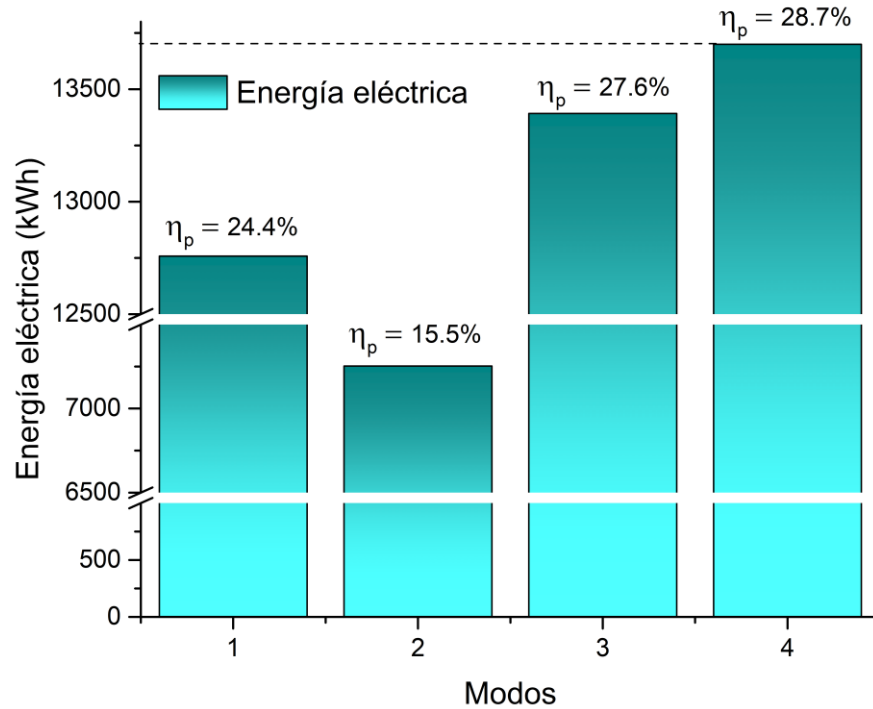


Figura 3.48. Energía eléctrica y eficiencia promedio de los diversos modos propuestos en el día con máxima irradiancia.

Resumen anual

En las secciones anteriores se realizaron las evaluaciones de los sistemas de generación eléctrica bajo a distintas condiciones de operación, a partir del análisis puntual del equinoccio, solsticios entre otras fechas. Sin embargos para determinar de manera más precisa el desempeño de los sistemas antes mencionados, estos fueron evaluados en los 365 días, con incrementos de 10 minutos, utilizando solo las horas en las cuales los sistemas han sido debidamente activado. En la Figura 3.49 se puede apreciar fácilmente que el modo 4 presenta la mayor generación de energía eléctrica, en comparación a los sistemas.

Por otra parte, en la Figura 3.50 se presenta la cantidad de energía térmica interceptada por el disco Scheffler y la energía eléctrica producida por los sistemas. Se presenta como mejor propuesta el sistema en modo 4, produciendo 2.7816 MWh con una eficiencia promedio de 24.52%. Por lo que, la implementación del controlador de potencia a partir de la variación de volumen muerto no solo mejora el desempeño de la maquina térmica, sino que también elimina el uso de un equipo costoso, como lo es el inversor de corriente eléctrica.

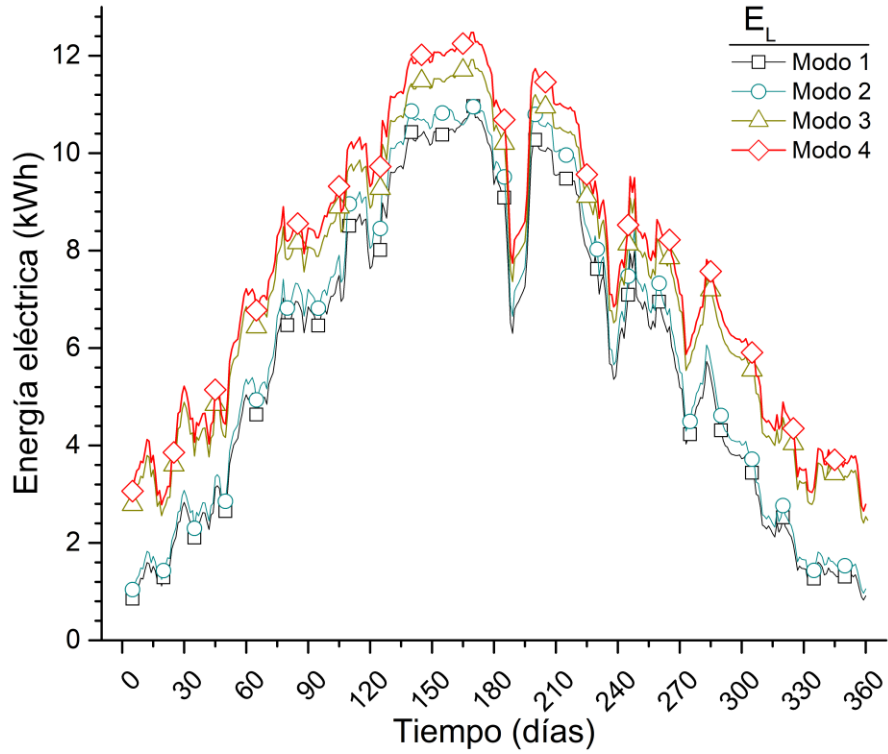


Figura 3.49. Evaluación de los 4 modos propuestos en el año.

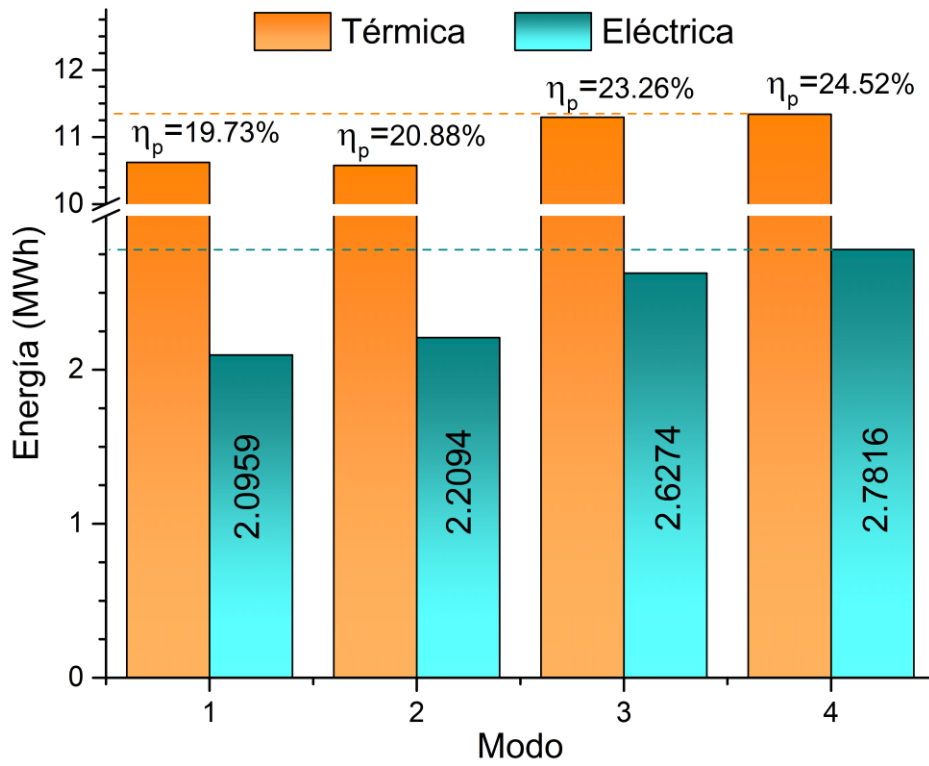


Figura 3.50 Cantidad de energía térmica y eléctrica de los 4 modos propuestos.

Capítulo 4 Desarrollo de la nano-banco de pruebas de motor Stirling

Se describe el nano-banco de pruebas, desarrollado para la comprobación de la Hipótesis. El diseño, modificación y construcción de los equipos y subsistemas es descrito a detalle, así como la instrumentación electrónica implementada y del desarrollo del sistema monitoreo y control para el nano-banco. Un estudio experimental de sensibilización del sistema es realizado para la caracterización de los parámetros que lo perturban. Por último, se presenta la operación el controlador de potencia del motor Stirling a través de la variación del volumen muerto.

4.1 Descripción del nano-banco de pruebas

En el capítulo 3 se realizó un estudio teórico de la viabilidad técnica del controlador de potencia de motor Stirling a través de la variación de su volumen muerto, en donde se determinó que es posible manipular los parámetros termodinámicos y eléctricos por medio de esta variable. Sin embargo, en este trabajo de tesis se estudió el estado estable del sistema para vislumbrar las zonas de trabajo y límites operativos, por lo que se propuso desarrollar un nano-banco de pruebas para analizar el estado transitorio del sistema, así como la comprobación de la Hipótesis inicial. Además, estudiar el sistema en estado estable de forma experimental y el efecto de la variación en la cantidad de volumen muerto en el motor Stirling. El nano-banco de pruebas consiste en un subsistema de calentamiento, enfriamiento, control del actuador de volumen muerto, generación de energía eléctrica, un motor Stirling tipo alfa y la adquisición de datos por medio de un sistema monitoreo y control, como se muestra en la Figura 4.1.

Subsistema de calentamiento: está compuesto por un par de resistencias termoeléctricas en contacto directo con el calentador del motor Stirling, las cuales son controladas desde el sistema monitoreo y control para proporcionar la energía para la activación de la máquina térmica. El calentador del motor cuenta con un termopar tipo “K”, diseñado para medición de temperatura de gases de escape (0 a 1023 °C).

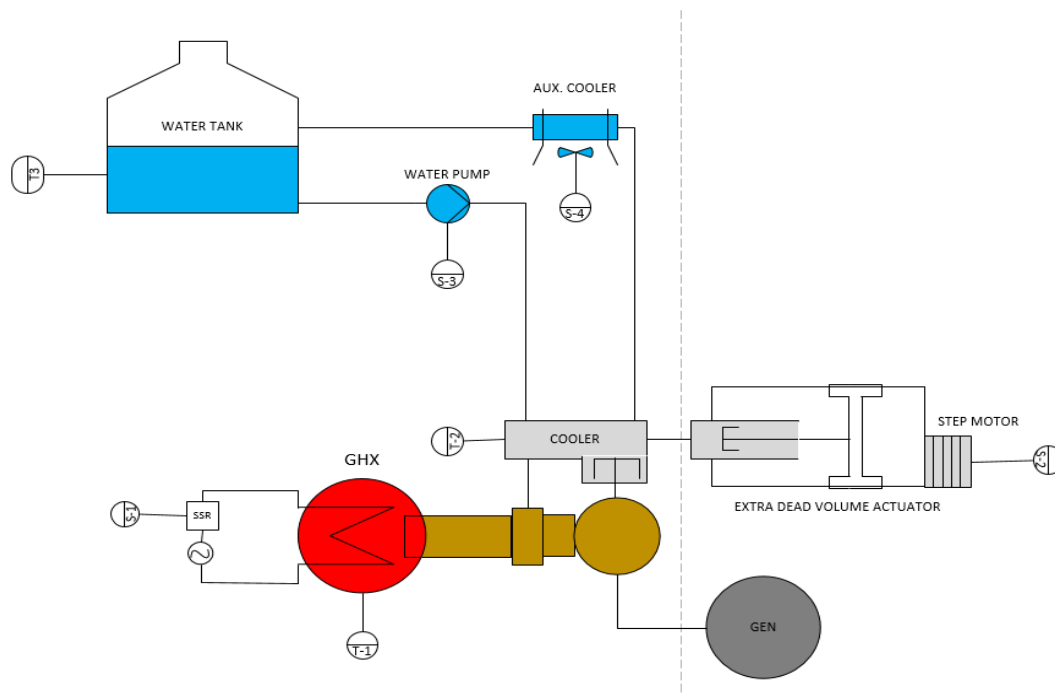


Figura 4.1. Esquemático del nano-banco de pruebas del motor Stirling con control de volumen muerto.

Subsistema de enfriamiento: está compuesto por un tanque de almacenamiento con líquido refrigerante, que por medio de una bomba eléctrica (12V DC) es circulado hacia el enfriador del motor Stirling. El fluido refrigerante pasa a través del enfriador y enfría de forma indirecta al fluido de trabajo (aire) del motor, para reestablecer la temperatura de compresión del ciclo termodinámico. A la salida del enfriador del motor, el fluido es enviado a un enfriador auxiliar, el cual se encarga de retirar el calor del fluido por convección forzada en caso de ser requerido. Posteriormente, a la salida de enfriador externo el líquido refrigerante es retornado al tanque de almacenamiento. El tanque de almacenamiento cuenta con un termopar tipo “K” de acero inoxidable, para evitar la corrosión. Por otra parte, el enfriador del motor tiene un termopar tipo “J” a manera de pegatina (-15 a 123 °C), el cual se encuentra bajo la superficie externa de este intercambiador de calor.

Subsistema de control del actuador del volumen muerto: Se conecta una jeringa de plástico de 5 ml entre el calentador y el enfriador del motor Stirling, la cual varía la cantidad de volumen muerto extra al sistema por medio del desplazamiento de su embolo. El movimiento lineal del embolo es realizado a través de un mecanismo tornillo Sin-fin, el cual es accionado por un motor a pasos controlado por el sistema monitoreo y control. La carrera del embolo cuenta con un

codificador rotativo acoplado a su mecanismo piñón-cremallera, de este modo puede determinar la cantidad de volumen muerto por añadido al motor por medio de un conteo de pasos. Además, se implementó un interruptor para delimitar el desplazamiento del embolo, así como para determinar la posición inicial para el conteo de pasos.

Subsistema motor Stirling: un pequeño motor térmico en configuración alfa prefabricado, fue modificado para los propósitos del estudio. Este motor se encuentra acoplado a través de un mecanismo de bandas y poleas a un generador de energía eléctrica.

Subsistema de generación de energía eléctrica: consiste en un pequeño motor de corriente directa con imanes permanentes, el cual está conectado a una carga (resistencia) y es utilizado como generador eléctrico. Sin embargo, a través de un arreglo electromecánico con relevadores, este motor también es empleado como arranque del motor.

Subsistema de adquisición de datos: implementando una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments myRIO NI-1900, se realiza la instrumentación y control de todo el nano-banco de pruebas del motor Stirling. El sistema monitoreo y control implementado a través de la plataforma de LabVIEW fue desarrollado en el laboratorio del CEENER.

4.2 Diseño, construcción y modificación de los subsistemas

El motor Stirling tipo Alfa utilizado en este nano-banco de pruebas parte de un modelo prefabricado, adquirido de forma comercial como se muestra en la Figura 4.2. Sin embargo, su diseño original contempla el calentamiento por medio de un mechero utilizando alcohol, etanol u algún otro combustible líquido. El subsistema de enfriamiento intercambia calor con el ambiente por convección natural, por lo que su temperatura está determinada por la temperatura del medio. Las bielas están conectadas a los pistones y al cigüeñal de forma directa, sin rodamientos. El cigüeñal y el generador están conectados por una simple liga, la cual fue sustituida por una banda de nylon.

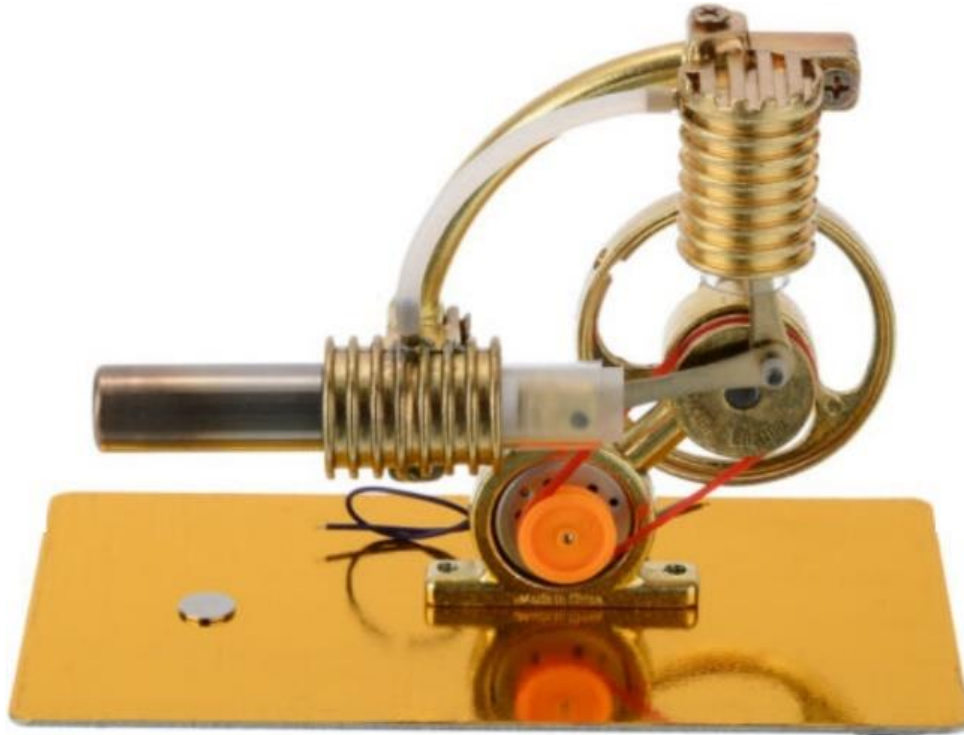


Figura 4.2. Motor Stirling tipo alfa prefabricado.

Motor

Dado que el diseño original del motor no cumplía con los requerimientos necesarios para el estudio experimental que se desea llevar a cabo, se realizaron una serie de modificaciones como en muestra a continuación. En la Figura 4.3 se presenta las bielas originales y las bielas propuestas, cuya modificación tiene la finalidad de reducir la fricción en el muñón del cigüeñal y en los pasadores de los pistones, así como la vibración y el ruido. Por lo que, se propusieron, diseñaron y construyeron nuevas bielas con rodamientos, para evitar lo antes mencionado. Las bielas fueron maquinadas en una cortadora CNC, empleando una hoja de aluminio de 3.3 mm de espesor y los baleros utilizados son de 3x5x2mm.

Por otra parte, se añadió separador de fibra cerámica para reducir las pérdidas de calor por conducción del calentador de motor hacia la estructura, como se muestra en la Figura 4.4. Las mejoras antes mencionadas fueron puestas a pruebas, en donde el ruido del motor disminuyó de manera considerable debido a los rodamientos. Además, la fibra de cerámica permite que el calentador incremente su temperatura con menos energía suministrada.



Figura 4.3. Diseño y construcción de las bielas con rodamientos para minimizar la fricción.

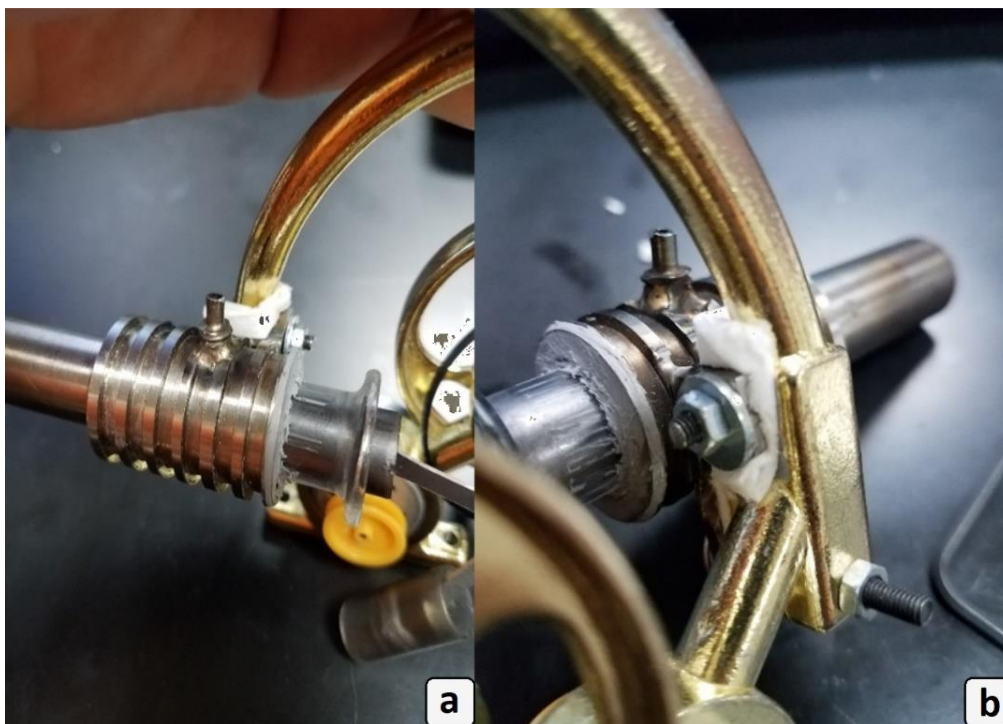


Figura 4.4. Colocación de fibra de cerámica como aislamiento entre el cuerpo del motor y el calentador.

Calentador del motor Stirling

El calentador del motor Stirling es el encargado de transferir el calor al fluido de trabajo, el cual se expande debido al incremento de temperatura, generando trabajo de frontera. En la Figura 4.5a se muestra una comparativa entre el calentador original y el de acero inoxidable que se maquinó en un taller comercial. El calentador prototipo fue construido para soportar las altas temperaturas causadas por el par de resistencias termoeléctricas, de este modo puede someter al motor a un mayor diferencial térmico e incrementar su potencia de salida. El par de resistencias térmicas tienen una capacidad nominal de 600 W, los cuales no pueden ser transferidos totalmente hacia al fluido de trabajo debido al área de transferencia de calor. Sin embargo, más de 80% de energía se va por las pérdidas térmicas, principalmente radiación. Además, cabe mencionar que la capacidad de las resistencias termoeléctricas está controlada por el sistema monitoreo y control del nanobanco de pruebas. Este calentador prototipo fue sometido a temperaturas superiores a los 700 °C sin sufrir daño alguno, caso contrario del calentador original, el cual sufrió daños irreparables.



Figura 4.5. Maquinado del calentador de acero inoxidable para temperaturas superior a los 700 °C.

Enfriador del motor

El enfriador del motor es el subsistema que permite la remoción del calor residual del ciclo, para reestablecer al fluido de trabajo a las condiciones termodinámicas necesarias para iniciar nuevamente el ciclo. En la Figura 4.6a se muestra el CAD del enfriador prototipo del motor, el cual fue construido con la cortadora CNC y láminas de aluminio de 6.5 mm de espesor. En las Figura 4.6b y Figura 4.6c se muestra las secciones donde circulan el fluido de trabajo y el refrigerante, respectivamente. Es ensamblado al igual que un intercambiador de placas, el cual intercambia calor indirectamente entre el fluido de trabajo y el refrigerante en contra corriente. El cilindro de compresión se encuentra en la parte inferior del enfriador (Figura 4.6d). Las dimensiones del enfriador no fueron optimizadas, ya que el subsistema de enfriamiento contempla el control del flujo del refrigerante para la estabilización de la temperatura de enfriamiento.

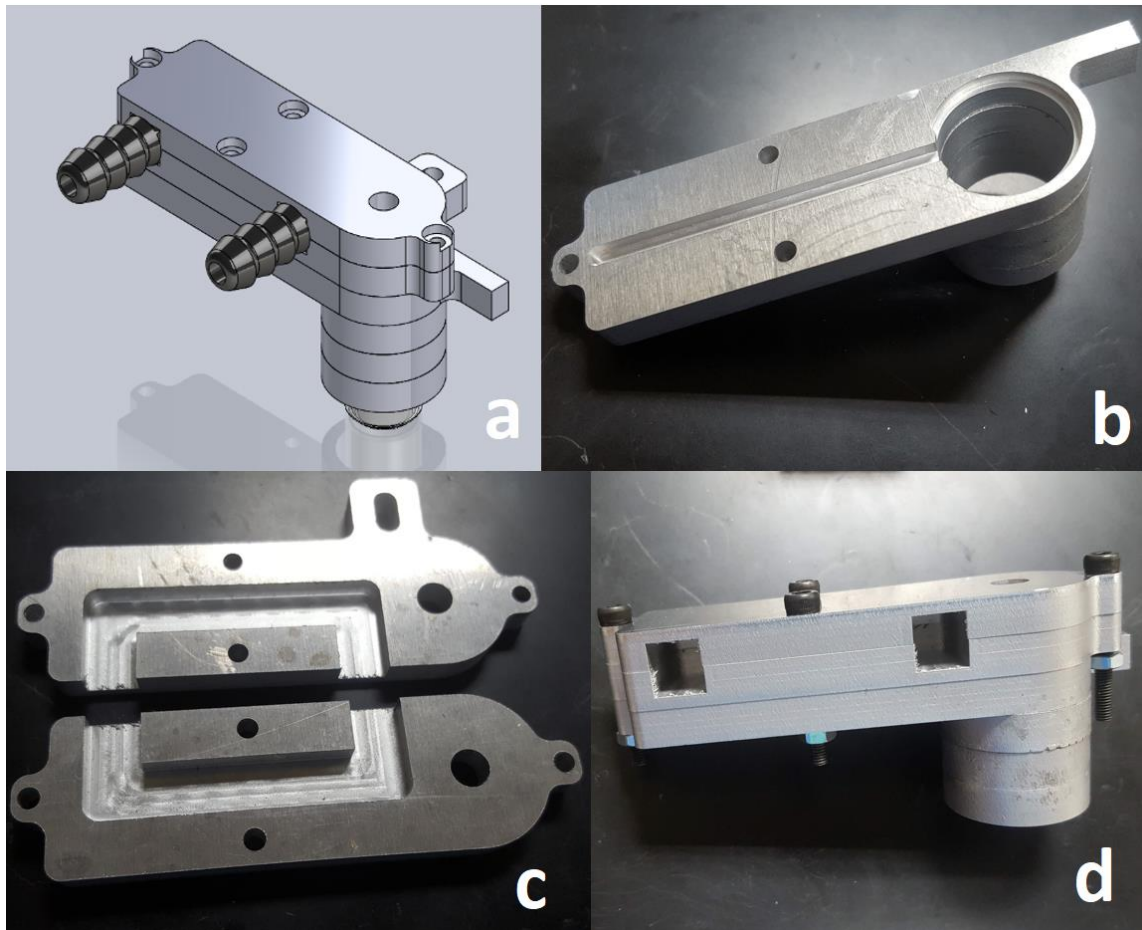


Figura 4.6. Diseño y construcción del enfriador; a) Dibujo asistido por computadora, b) sección inferior, c) sección media y superior, d) ensamble del enfriador prototipo.

Actuador de volumen muerto

En la Figura 4.7a y Figura 4.7b se muestra el CAD del subsistema actuador de volumen muerto, cuyas partes principales fueron construidas a partir de impresiones de plástico en 3D. Se utilizó un mecanismo tornillo sinfín para el desplazamiento lineal del embolo, el cual es accionado por un motor paso a paso marca Nema 17. Dicho mecanismo fue reforzado por dos barras de acero de 8 mm y baleros lineales, dando estabilidad y homogeneidad en el movimiento lineal (Figura 4.7d). Además, este subsistema cuenta con un mecanismo de piñón-cremallera para el conteo de pasos. La cantidad de volumen muerto se determina a partir de una ecuación lineal. Además, cuenta con un interruptor límite para terminar la posición inicial diseño original de actuador contempla una jeringa de 20 ml, pero debido a la experimentación a partir de los 10 ml añadidos, el ciclo del motor era detenido. Por lo que, se modificó para utilizar una jeringa de 5 ml y aumentar la resolución de volumen/desplazamiento.

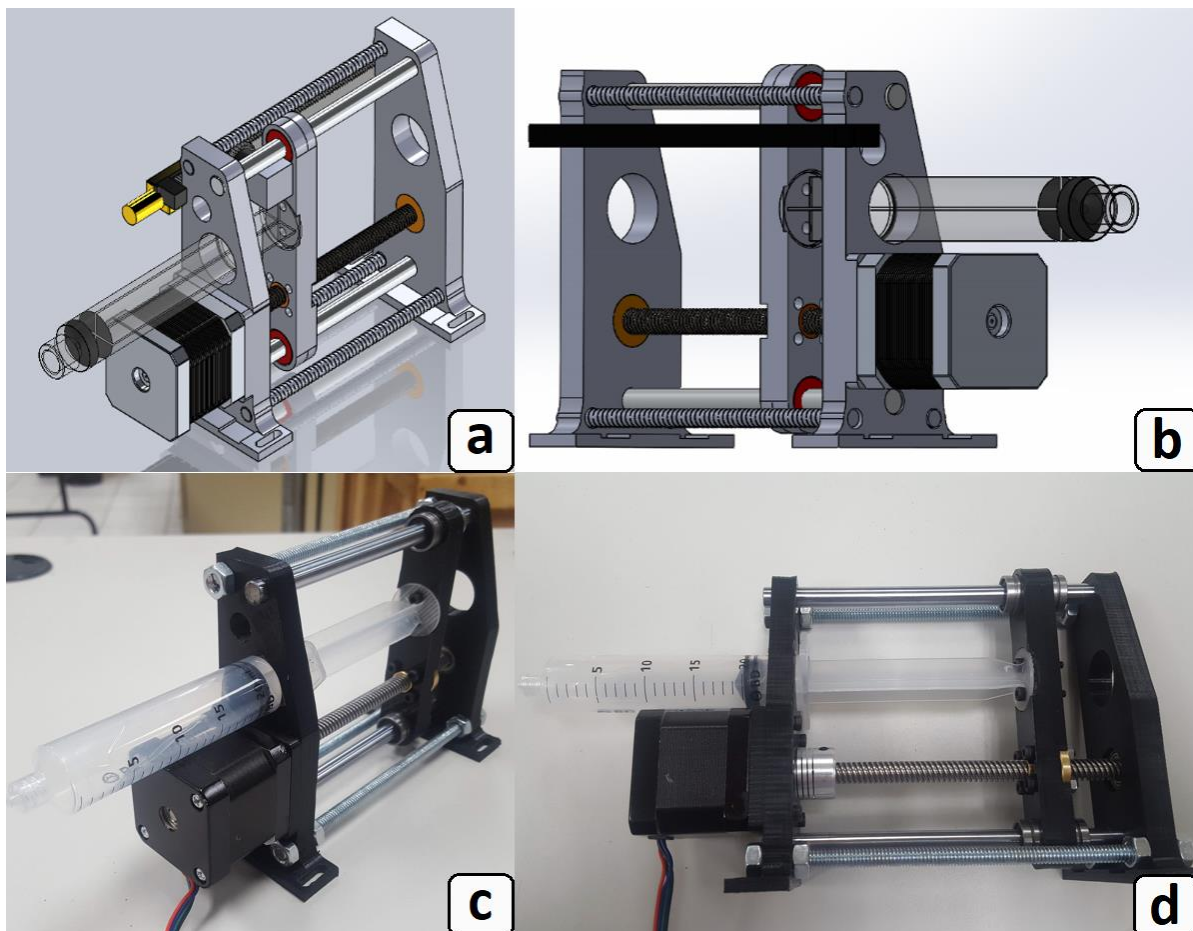


Figura 4.7. Diseño y construcción del actuador de volumen muerto por mecanismo tornillo sinfín.

Subsistema de enfriamiento

El subsistema de enfriamiento externo o auxiliar permite la remoción del calor que el fluido refrigerante tomo del ciclo Stirling, de este modo el refrigerante es retornado al tanque de almacenamiento con una temperatura cercana a la del ambiente. En la Figura 4.8a y Figura 4.8b se presenta el CAD del subsistema de enfriamiento externo, el cual fue maquinado con el uso de la cortadora CNC y láminas de aluminio de 6.5 mm de espesor como se muestra en la Figura 4.8c. Este subsistema intercambia calor de manera indirecta entre el refrigerante y el aire, en donde un ventilador de 12v circula el aire a través de un conjunto de aletas de aluminio como se observa en la Figura 4.8d.

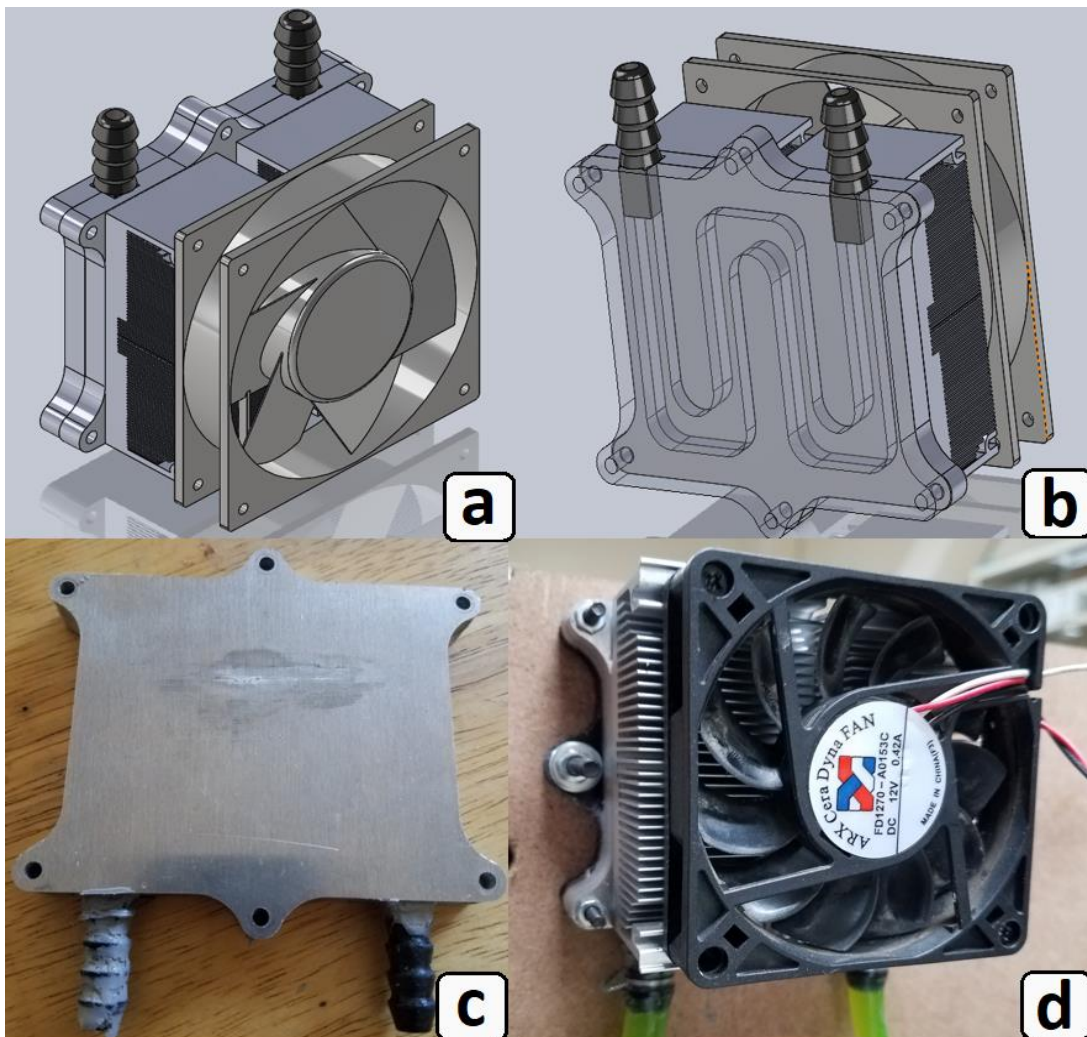


Figura 4.8. Diseño y construcción del enfriador auxiliar, el cual enfría el agua con el aire de manera indirecta.

Placa electrónica de pruebas

Una parte fundamental para el desarrollo de un sistema monitoreo y control e instrumentación es la sección electrónica en la etapa de potencia y el acondicionamiento de señales. En la Figura 4.9 se presenta un diagrama de conexiones eléctricas, en la cual distintos dispositivos están interconectados con el conector IDE principal de la tarjeta de adquisición de datos myRIO NI-1900. Cuatro circuitos integrados MAX6675 son implementados para la interpretación de la temperatura del calentador, enfriador, refrigerante y ambiente, los cuales convierten la información analógica de los termopares a información digital. En la etapa de potencia son utilizados 3 relevadores de estado sólido, los cuales suministran la energía eléctrica a las resistencias termoeléctricas, bomba de agua y ventilador de disipación auxiliar. El integrado A4988 es el accionador del motor a pasos del actuador de volumen muerto, en este dispositivo se determina la velocidad y el sentido de la rotación de la flecha. Además, es importante mencionar que todo el circuito es alimentado por una fuente de 12v a 10A, en la cual se implementaron reguladores de 5v (AMS51v) para la circuitería pertinente. Por último, se utilizó un circuito de inversión de señal TTL 7404 como amplificador de corriente y rectificador de las señales de los PWM (modulación por ancho de pulso por sus siglas en inglés) utilizados.

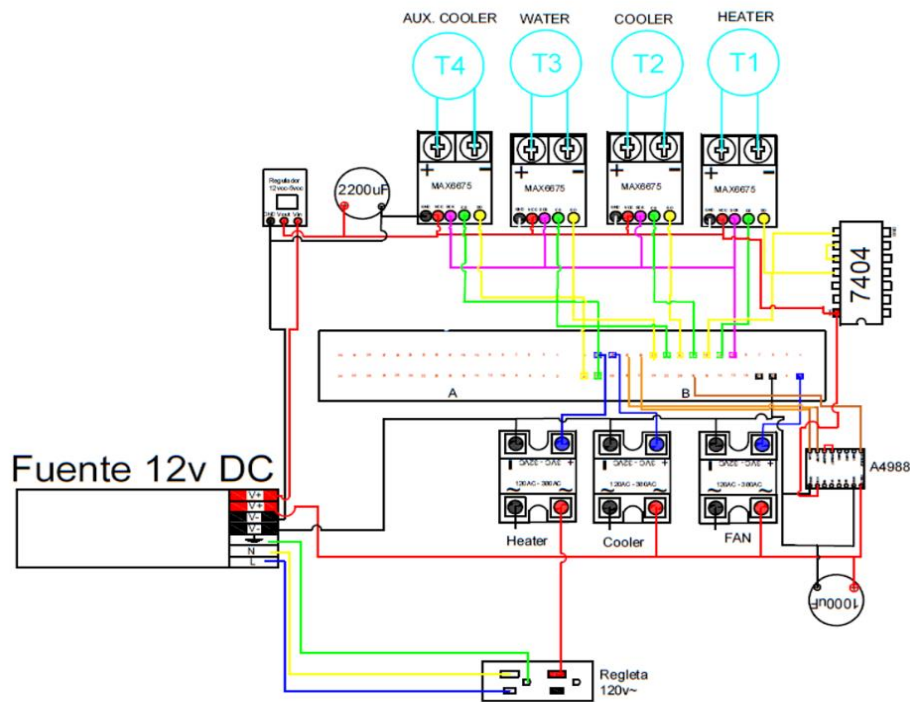


Figura 4.9. Diagrama eléctrico de las conexiones de los dispositivos para el sistema de adquisición de datos y control.

Presentación de la nano-planta con controlador de volumen muerto

Una vez desarrollados todos los subsistemas, se ensambló el nano-banco de pruebas de motor Stirling como se muestra en la Figura 4.10. Las dimensiones de este prototipo son de 400x500x400 mm, cual cuenta con una mesilla de montaje de aluminio para los subsistemas adyacentes y el motor Stirling. En la Figura 4.11 se presenta una vista frontal del nano-banco de pruebas, en donde se puede observar algunos de los subsistemas que lo componen.

1) El calentador del motor Stirling es mostrado sin la coraza aislante, la cual disminuye transferencia de calor hacia el ambiente por radiación y convección, principalmente. Además, se muestran el par de resistencias termoelectricas (1.1) y el termopar tipo “K” (1.2) que mide la temperatura del calentador (Figura 4.11).

2) En el subsistema de enfriamiento se indican la entrada (2.1) y salida (2.2) del refrigerante en enfriador del motor, el cual intercambia calor a contra corriente con el fluido de trabajo (Figura 4.11). Se utilizó un refrigerante automotriz para evitar la corrosión en los subsistemas de enfriamiento, así como los sensores implementados. En la parte inferior se encuentra el termopar (2.3) tipo “J” que mide la temperatura externa del enfriador. En la parte posterior del banco se encuentra el enfriador auxiliar (2.4), la bomba eléctrica (2.5) y el tanque de almacenamiento (2.6) con su sensor de temperatura (2.7) como se muestra en la Figura 4.13.

3) El actuador de volumen muerto, el cual es accionado por un motor a pasos (3.1) y desplaza el embolo (3.2) por medio de un mecanismo sinfín (3.3). Contiene un codificador rotativo (3.4) para la medición del volumen muerto y un interruptor limite (3.5) para determinar la posición inicial (Figura 4.12).

4) Motor eléctrico de imanes permanentes (4.1), el cual es utilizado como generador y arrancador del motor Stirling prototipo. Además, a la flecha del motor Stirling le fue colocado un vástago (4.2) para el conteo de revoluciones.

5) Tarjeta de adquisición de datos myRIO NI-1900 (5), la cual cuenta con su entrada de memoria de datos (5.1), transferencia de información (5.2), voltaje de alimentación (5.3) y de puerto A tipo IDE (5.4) para la interconexión de dispositivos como se muestra en la Figura 4.13. Es necesario el uso de una fuente auxiliar de voltaje (5.5).

6) En la parte electrónica se tiene la regleta principal de conexiones (6.1), la fuente 12V a 10A (6.2), la tableta electrónica de pruebas (6.3) en la que se encuentra montada todas las conexiones y circuitos para la instrumentación. Además, se presentan los relevadores de estado sólido (SSR) de las resistencias térmicas del calentador (6.4), de la bomba de agua (6.5) y del ventilador del enfriador auxiliar (6.6). todos los demás dispositivos electrónicos y conexiones son descritos en la Tabla 4.1 y son mostrados en la Figura 4.15



Figura 4.10. Nano-banco de prueba del motor Stirling controlado por volumen muerto.

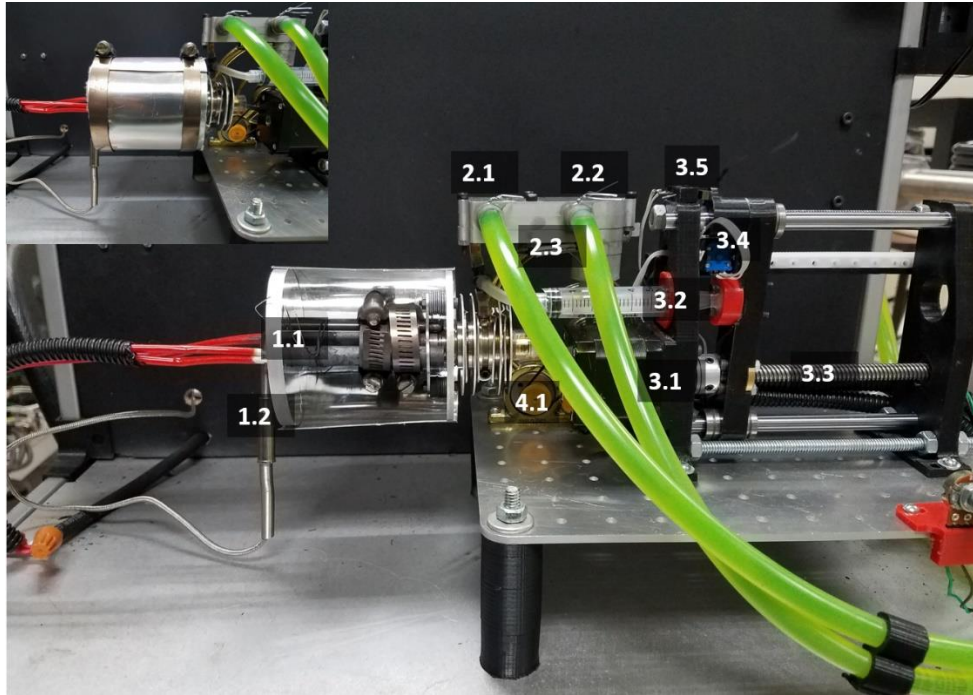


Figura 4.11. Subsistemas y sensores del motor Stirling controlado por volumen muerto parte frontal.

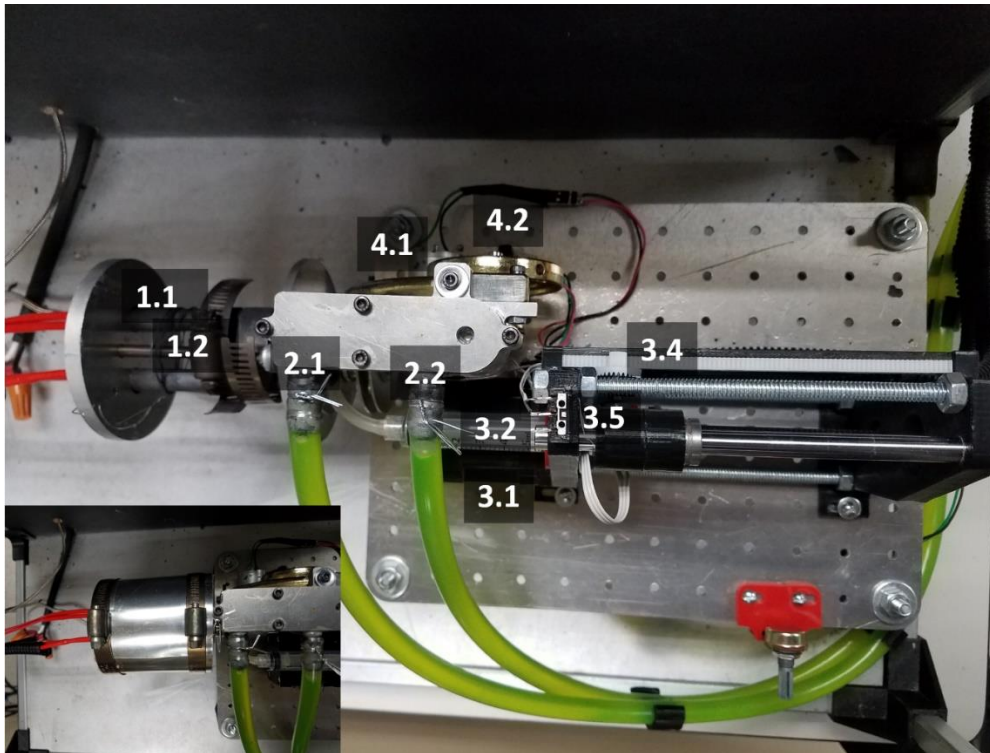


Figura 4.12. Vista superior del nano-banco de pruebas de motor Stirling.

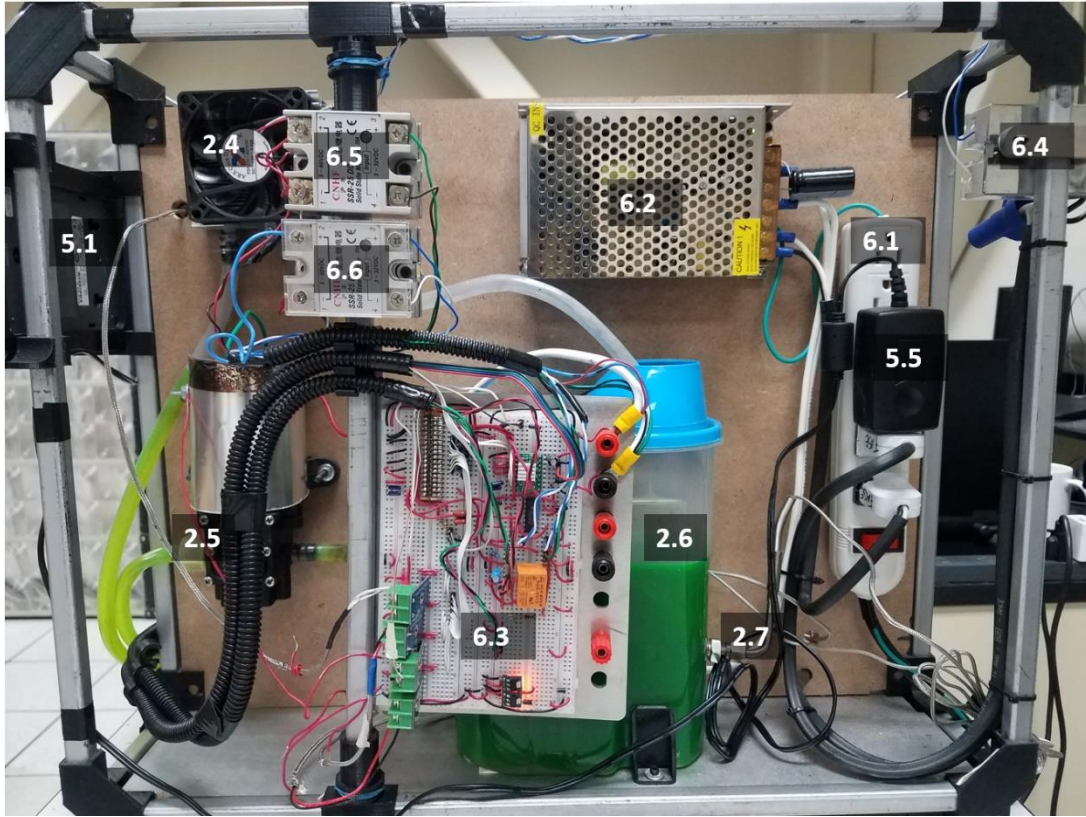


Figura 4.13. Subsistemas y sensores del motor Stirling controlado por volumen muerto parte posterior A.

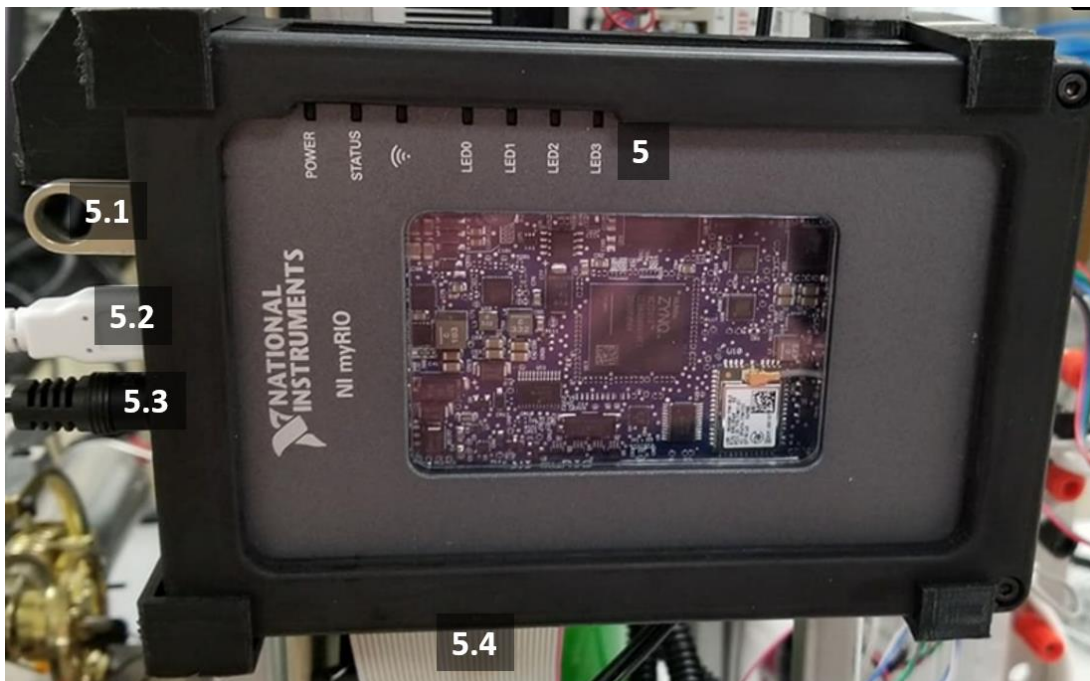


Figura 4.14. Almacenamiento de la adquisición de datos del sistema motor Stirling.

Tabla 4.1. Especificaciones de los componentes y conexiones eléctricas de la tableta electrónica de pruebas.

Etiqueta	Descripción
7.1	Conector IDE para myRIO NI-1900
7.2	MAX6675 para temperatura del calentador
7.3	MAX6675 para temperatura del enfriador
7.4	MAX6675 para temperatura del refrigerante
7.5	MAX6675 para temperatura del ambiente
7.6	Driver A4988 del motor a pasos
7.7	Circuito integrado inversor (74LS04)
7.8	Conexión a carga resistiva
7.9	Conexión a arrancador
7.10	Conexión a relevador del calentador
7.11	Conexión a relevador de la bomba de agua
7.12	Conexión a relevador del ventilador
7.13	Conexión del Interruptor límite
7.14	Conexión del motor a pasos
7.15	Conexión del codificador rotativo
7.16	Reguladores de voltaje a 5V (AMS51V)
7.17	Entrada de voltaje de 12V

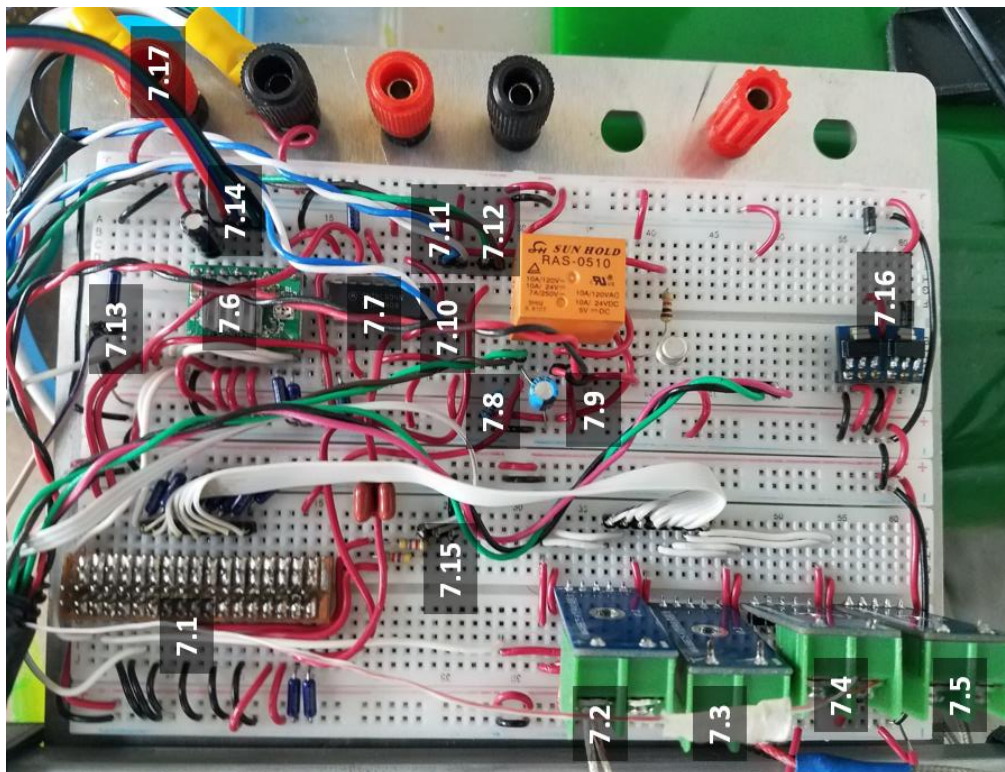


Figura 4.15. Sección de la tableta electrónica de pruebas del sistema motor Stirling.

Instrumentación y control: Sistema de monitoreo y control

En la Figura 4.16 se muestra la interfaz humano-maquina (HMI) del sistema monitoreo y control desarrollado en este trabajo de tesis, en donde se observa de manera esquemática todos los subsistemas del nano-banco de pruebas. En el HMI se presentan los principales parámetros termodinámicos y eléctricos del sistema, los cuales incluyen la temperatura del calentador, enfriador, ambiente y del refrigerante, así como los puntos de consigna de estos parámetros. Además, los botones de arranque, paro, control manual de energía, guardar información y tiempo de registró son de acceso al usuario.

En la Figura 4.17 se muestra el equipo Polyscience utilizado para la calibración de los sensores de temperatura, los cuales fueron implementados en el nano-banco de pruebas para medir la temperatura del enfriador, refrigerante y del ambiente. Por otra parte, el sensor de temperatura del calentador fue calibrado en el equipo AMETEK, debido a los intervalos de temperaturas utilizados.

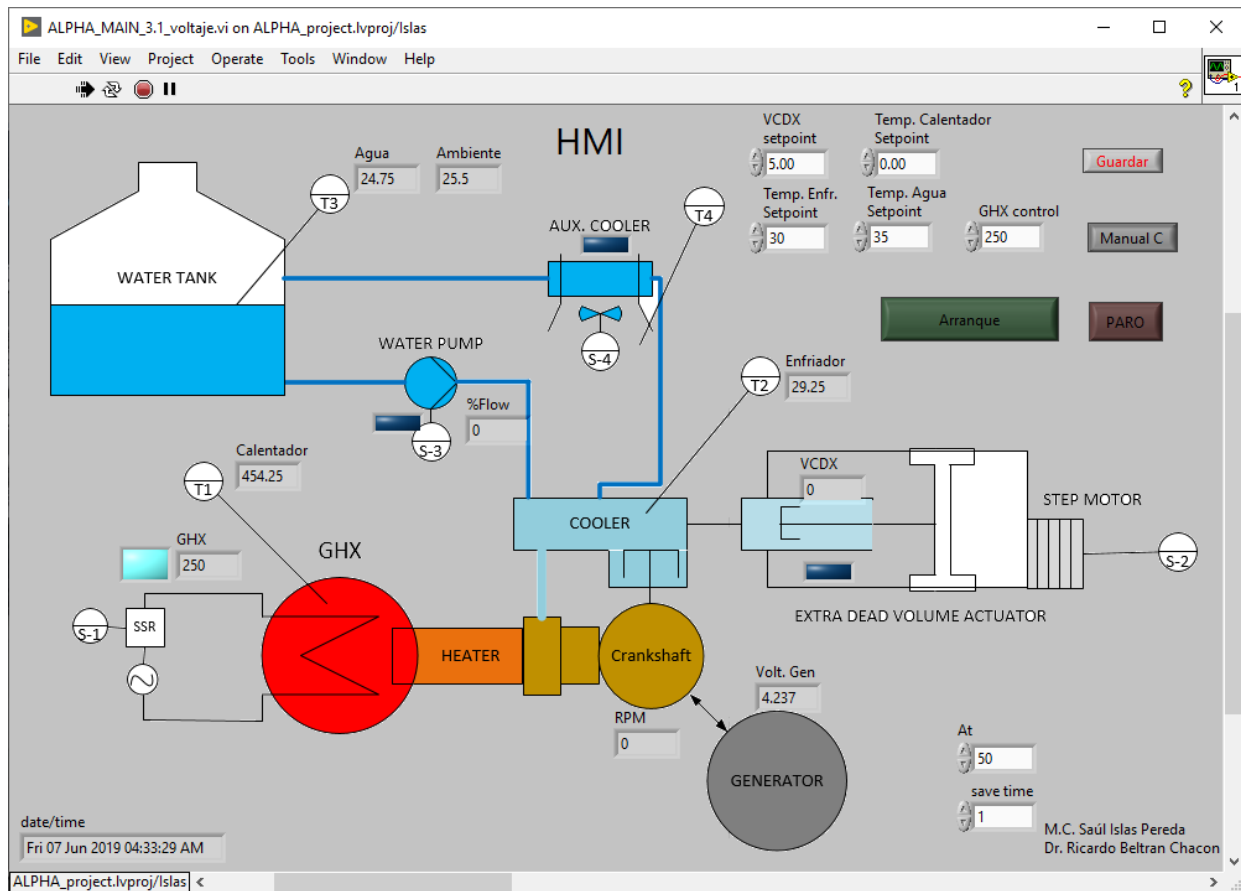


Figura 4.16. Diseño y desarrollo de la interfaz humano-máquina del sistema de monitoreo y control.



Figura 4.17. Implementación del equipo Polyscience para la calibración de los sensores de temperatura de la nano-planta.

Controladores de los subsistemas

Como se mencionó con anterioridad, el nano-banco de pruebas fue desarrollado principalmente para determinar el efecto de la manipulación del volumen muerto sobre el desempeño del sistema. Por lo que, para aislar de perturbaciones a la planta se realizaron los controladores de temperatura del calentador (Activador), enfriador (sumidero) y enfriador externo (auxiliar), de este modo las variaciones del sistema solo son debido a los cambios en la cantidad de volumen muerto. En la Figura 4.18 se muestra la sección de control del sistema de adquisición de datos desarrollado en la plataforma de LabVIEW, en donde se vislumbran los controladores PID de la posición del actuador de volumen muerto, de la temperatura de calentamiento y de la temperatura del enfriador del motor Stirling, así como el control on/off sin histéresis para el subsistema auxiliar de enfriamiento y el arranque del motor Stirling. A continuación, se describen las capacidades de los controladores del sistema.

El control de temperatura del calentador; Permite estabilizar la temperatura del calentador variando la cantidad de energía de entrada en las resistencias termoeléctricas, según lo requiera el motor Stirling. Se puede realizar la inyección de energía constante sin importar la temperatura ni las perturbaciones, simplemente el usuario delimita la cantidad de energía suministrada por las resistencias termoeléctricas. Por otra parte, se puede programar para incluir perturbaciones de

temperatura y/o energía en el calentador, para emular un día con un nublado parcial. O bien, para simular un día típico soleado, desde el amanecer con poca energía térmica, medio día con máxima energía y un atardecer con la disminución de energía.

El control de temperatura del enfriador; Permite la estabilización de temperatura del enfriador para determinar el efecto de la variación del volumen muerto, a partir de la regulación del flujo de refrigerante en el enfriador del motor. Por otra parte, se puede programar para incluir las perturbaciones de temperatura del enfriador, para emular las perturbaciones de la temperatura ambiente, por ejemplo; en el amanecer baja temperatura en el enfriador y el atardecer con una temperatura superior.

El control de posición de volumen muerto; a partir de un punto de consigna dado por el usuario, un controlador PID determina la salida de un variador de frecuencia para accionar el motor a pasos del mecanismo sinfín. Dicho mecanismo mueve el embolo de la jeringa de plástico, con la cual se manipula la cantidad de volumen muerto añadido al sistema. Se utiliza un mecanismo piñón-cremallera y un codificador rotativo para determinar el desplazamiento de la carrera del embolo, calculando el volumen añadido a través de una función lineal.

Arranque eléctrico del motor; por medio de un botón digital situado en el HMI del sistema monitoreo y control se cambia la configuración del generador eléctrico a modo arrancador, a través de un arreglo de relevadores electromecánicos. Cuando el arrancador es activado el voltaje del generador no puede ser medido, protegiendo la tarjeta de adquisición de datos.

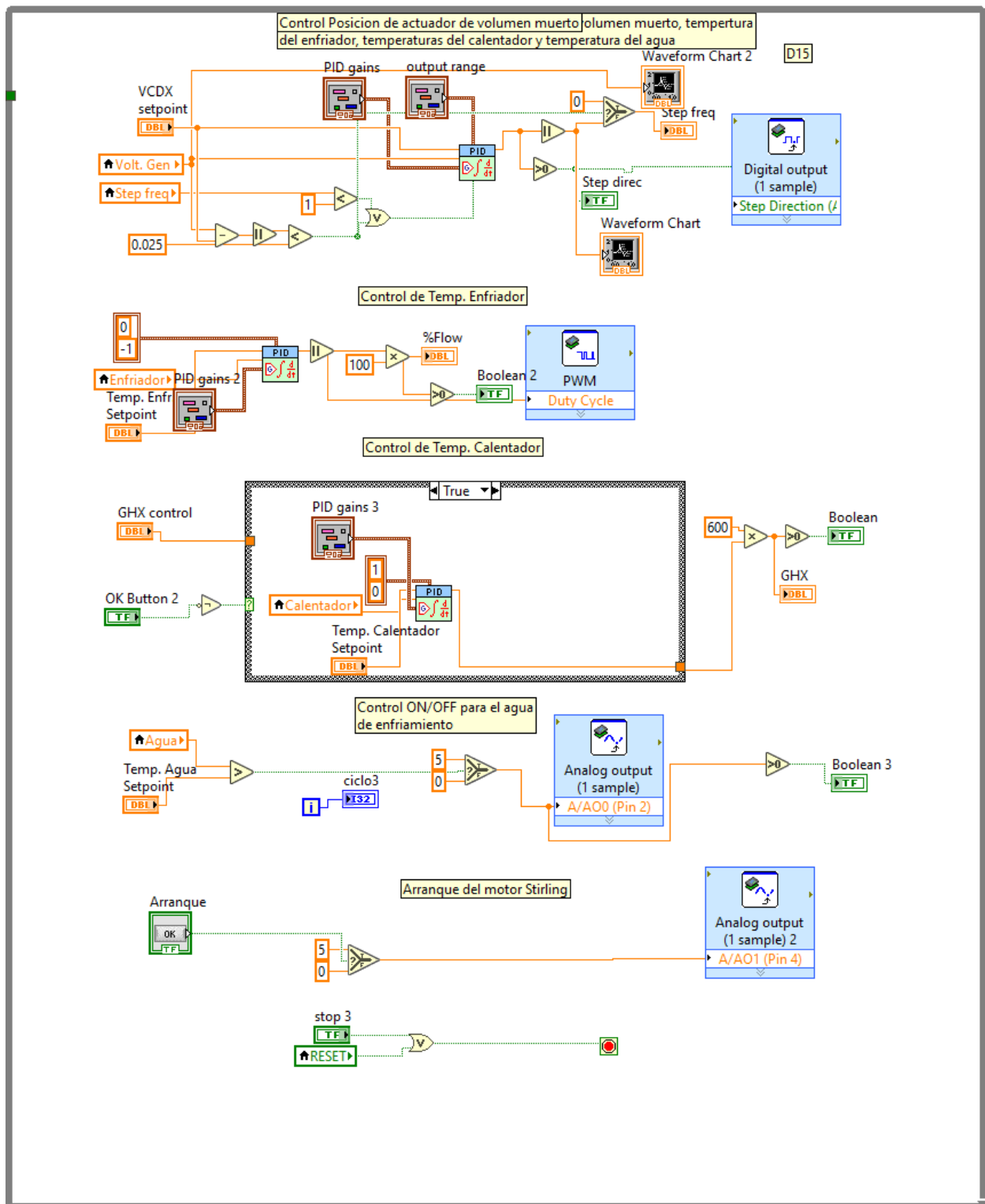


Figura 4.18. Desarrollo de los 4 controladores principales de la nano-planta; Calentador, enfriador, volumen muerto y enfriador auxiliar.

4.3 Sensibilización del sistema

La sensibilización del sistema es una parte del aprendizaje que se debe llevar de manera teórica y experimental, en donde un ingeniero o investigador entiende cada parte del proceso del sistema estudiado. De este modo, se pueden desarrollar mejoras en las áreas de oportunidad del proceso. La sensibilización del sistema propuesto del sistema de generación de energía eléctrica por Scheffler-Stirling se realizó de manera teórica, determinando el comportamiento termodinámico y como a través de la variación de la cantidad de volumen muerto el control de potencia puede ser llevado a cabo. Sin embargo, en esta sección se abordará una exploración experimental implementando el nano-banco de pruebas desarrollado en este trabajo de tesis.

Caracterización del calentador

El calentador es el intercambiador de calor que concede la activación de la máquina térmica, por lo que su caracterización permite determinar la cantidad de calor de entrada al ciclo. En la Figura 4.19a se muestran los perfiles de temperatura presentados en el calentador del motor Stirling nano-banco de pruebas, los cuales fueron establecidos con distintas cantidades de energía de suministrada. Dos resistencias termoeléctricas de 300 W están colocadas en el calentador, las cuales transfieren calor por conducción y radiación a la superficie externa del calentador. Se puede observar que cada una de las pruebas logra una temperatura estable a partir de 50 minutos, por lo que esta temperatura puede ser considerada para el análisis en estado estable. A partir de estas temperaturas estables se realizó un polinomio de cuarto orden para determinar la cantidad de energía de entrada en función de la temperatura, como se muestra en la Figura 4.19b. Dada la información de la caracterización y el polinomio desarrollado se denota que, a diferenciales de temperatura constantes es necesario incrementar la energía suministrada mientras más alejada de la temperatura ambiente (punto muerto) este, lo cual es termodinámicamente correcto.

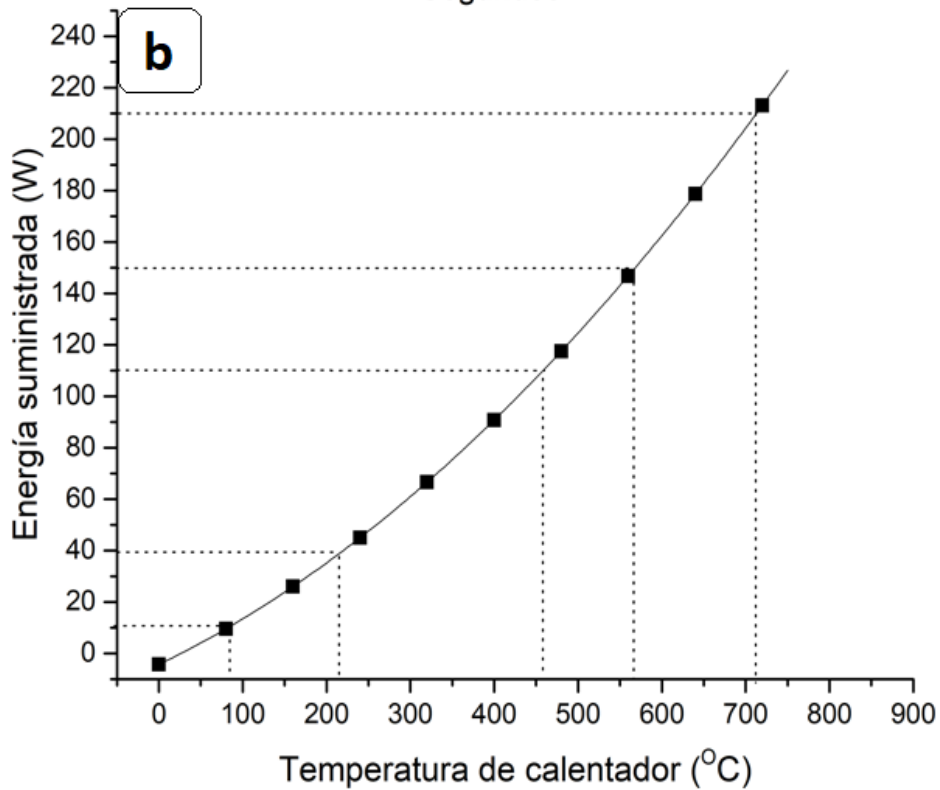
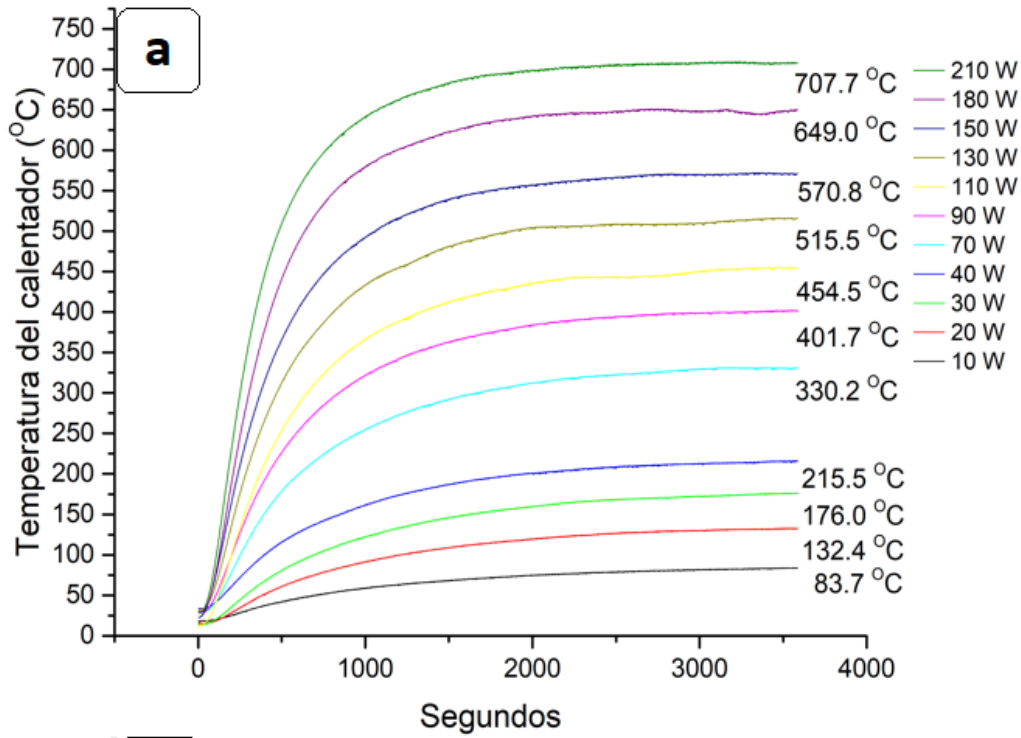


Figura 4.19. Función de la cantidad de energía suministrada en el calentador.

Caracterización del actuador

Es importante determinar las constantes del controlador PID con base al intervalo de valores en la entrada y de la salida, los cuales deben coincidir con los valores aceptados por el actuador. En la Figura 4.20a se presenta el comportamiento del actuador y la posición del volumen muerto a diferentes velocidades de activación, las velocidades son representadas por la frecuencia del tren de pulsos que recibe el motor a pasos. La etapa de potencias del motor a pasos se encuentra configurada para realizar un octavo de paso por pulso, por lo que requiere de 1600 pulsos para una revolución completa. Dadas las características del tornillo sinfín utilizado, por cada revolución la tuerca de bronce se desplaza 8 mm equivalentes a 909 mm^3 , resultando en un factor de conversión como se muestra en la ecuación 39.

$$0.278195 * f = \text{velocidad del actuador} \quad (39)$$

A partir del factor de conversión se puede determinar la velocidad del actuador, de tal modo que en la Figura 4.20b se presenta la relación entre la frecuencia y la velocidad a partir de los datos obtenidos experimentalmente. Se observa que, a partir de la frecuencia de 1000 Hz y superiores, la velocidad del actuador ya no tiene un comportamiento lineal, por lo que este dispositivo o subsistema solo será utilizado en el rango de 50 a 1000 Hz (salida del controlado PID). Las frecuencias inferiores a 40 Hz no pueden ser admitidas dadas las características de los controladores internos (PWM) de la tarjeta NI-1900 myRIO.

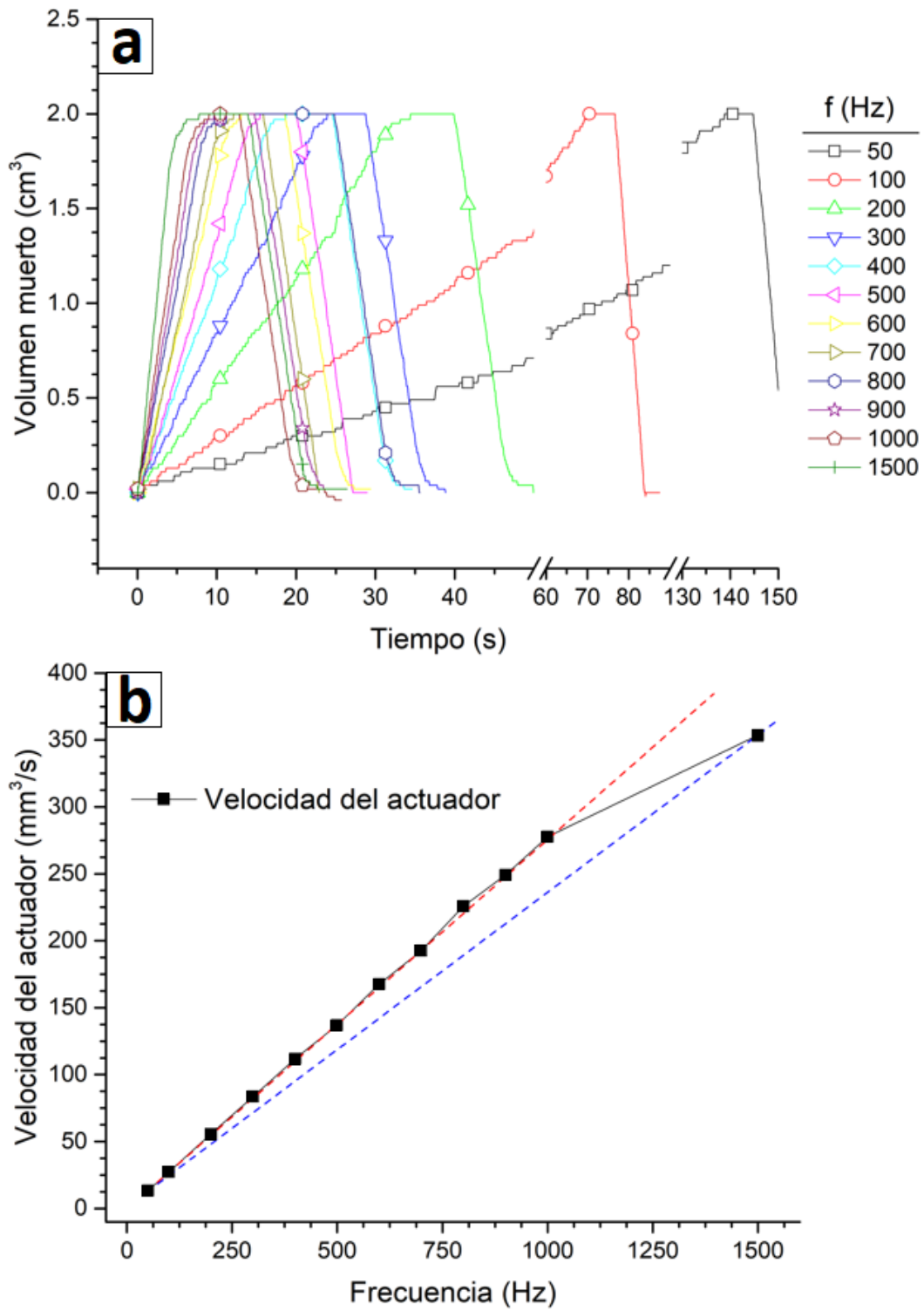


Figura 4.20. Caracterización del actuador de volumen muerto y determinación de la zona de trabajo; a) Velocidades, b) Zona de operación lineal.

Arranque, estabilización y paro

Por heurística se utilizó la temperatura de 425 °C para la activación del motor Stirling del nano-banco de pruebas, para determinar si los parámetros del sistema tendían a la estabilización u oscilaban. En la Figura 4.21a se muestra algunos de los parámetros eléctricos y termodinámicos del motor Stirling del nano-banco de pruebas, en donde se observa que se necesitaron más de 1500 segundos en la estabilización de las temperaturas del calentador y enfriador. El punto de consigna de la temperatura del calentador es obtenido a través de un controlador PID, el cual delimita la cantidad de energía eléctrica suministrada a las resistencias térmicas, el cual es nombrado PID_{cal} . En cambio, si el controlador PID_{cal} no es utilizado, es necesario más de 3000 segundos para la estabilización de la temperatura, como se muestra en la Figura 4.19a. Por otra parte, la temperatura de enfriamiento también es controlada por un PID, el cual permite la estabilización de la temperatura a 30 ± 0.5 °C. Este segundo controlador PID es nombrado PID_{enf} . Debido que el nano-banco no cuenta con un medidor de flujo, se definió al flujo como un porcentaje de la capacidad nominal de la bomba cuando es energizada a 12v. El flujo máximo alcanzado es del 25% del flujo nominal, para poder mantener la temperatura de consigna del enfriador.

A los 1850 segundos realizo el arranque del motor Stirling, en la Figura 4.21b se muestra una imagen ampliada del intervalo de trabajo del motor. Al iniciar la operación, se denota un sobre impulso e voltaje y posteriormente la estabilización de este parámetro electro. Este sobre impulso es debido al arranque eléctrico del motor desde el HMI del sistema monitoreo y control, ya que el generador eléctrico es utilizado como un motor al inicio y debido a la inercia del volante, registra un sobre impulso al entrar como generador. Las temperaturas del tanque de almacenamiento del refrigerante y del ambiente permanecen prácticamente constantes a aproximadamente 24 °C. Sin embargo, el voltaje del generador se encuentra a 1.4 V, el cual va decreciendo debido a cuestiones mecánicas posteriormente solucionadas.

El sistema monitoreo y control fue configurado para obtener un registro de datos cada 500 milisegundo, esta prueba se realizó dentro del laboratorio por lo que la temperatura ambiente permanece prácticamente constante. El refrigerante tenía una temperatura de 24 °C al inicio de la prueba y de 25 °C al termino.

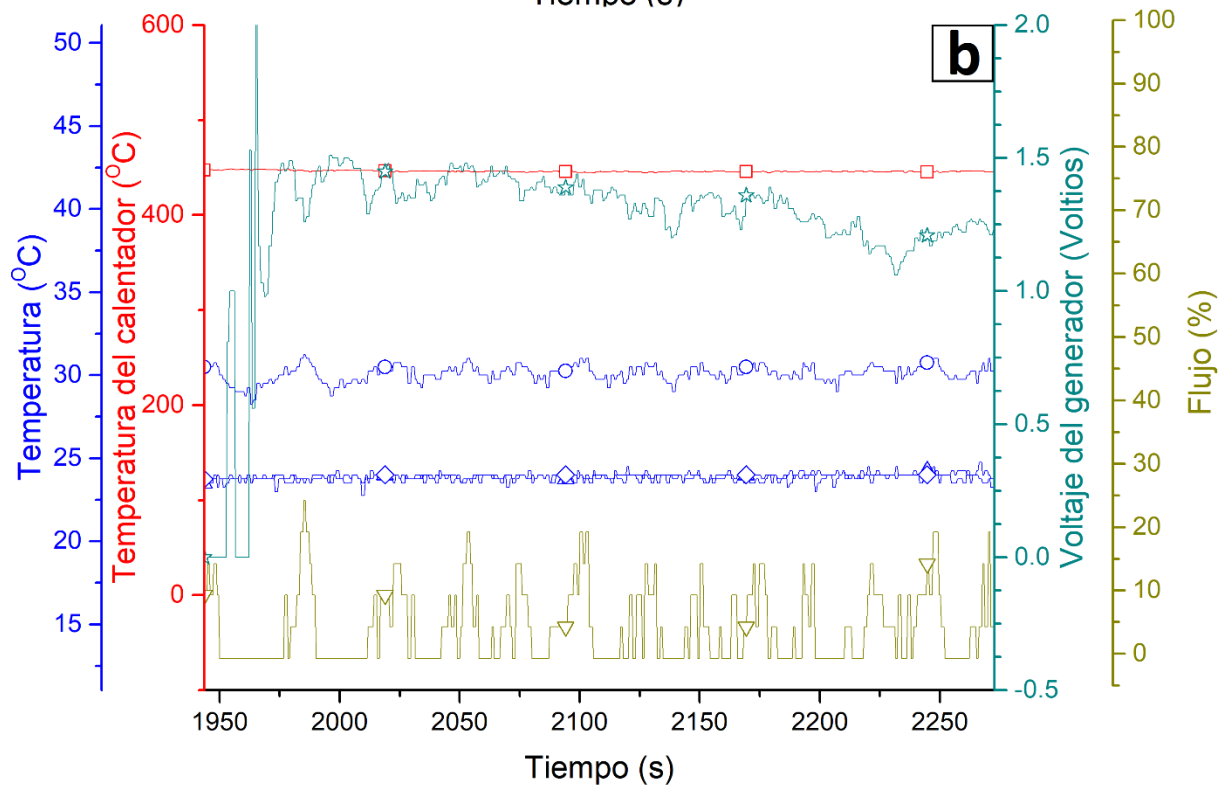
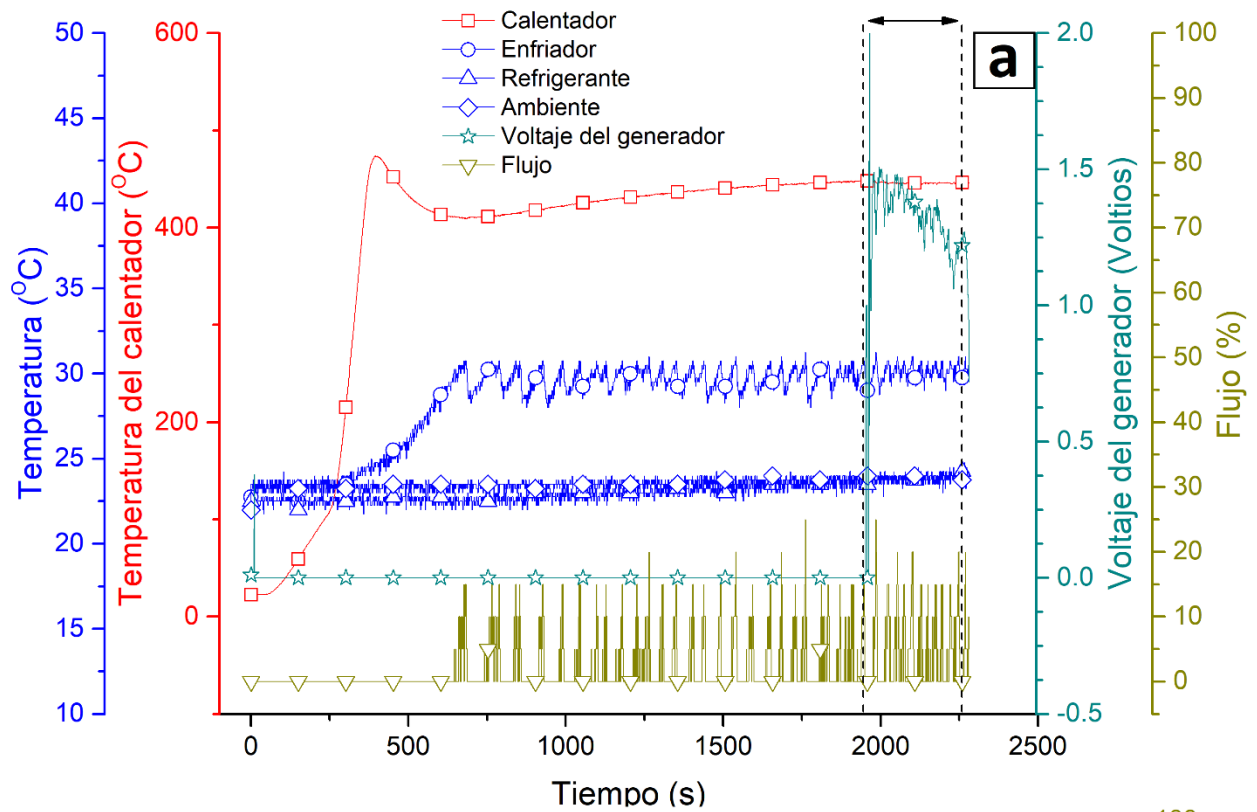


Figura 4.21. Arranque, estabilización y paro del motor Stirling del nano-banco de pruebas.

Interacción entre la temperatura del calentador, enfriador y cantidad de volumen muerto.

El motor Stirling en una maquina térmica cuyo rendimiento está en función de la diferencia de temperaturas de expansión y compresión, por lo que es necesario vislumbrar la operación del sistema a diversas temperaturas, Sin embargo, este prototipo se limita a controlar la temperatura del calentador y del enfriador, de este modo la estabilización de dichas temperaturas nos permite indicar de manera indirecta la controlabilidad de la temperatura de expansión y compresión (estado estable). Además, dado el trabajo de investigación de esta tesis, es necesario variar la cantidad de volumen muerto y observar la influencia de estos tres parámetros en el comportamiento operativo del sistema.

En la Figura 4.22a se presenta una compilación de pruebas experimentales realizadas en el nanobanco del motor Stirling para determinar la influencia de la temperatura del calentador y el volumen muerto extra a una temperatura constante del enfriador de 30 °C. Se observa que al suministrar 370 W eléctricos a las resistencias térmicas el calentador logra una temperatura de 470 °C estable. A los 400 segundos el motor es activado, produciendo 5 V de salida del generador con 0 cm^3 volumen muerto extra, hasta el siguiente cambio. A los 600 segundos, es agregado 1 cm^3 a una velocidad correspondiente a 75 Hz. Se obtienen 4.1 V en la salida del generador de manera estable. A los 800 s, se añadió otro centímetro cubico de volumen muerto a la misma velocidad de prueba, de este modo el voltaje se estabilizo a los 3.2 V. Posteriormente, a los 1000 s otro centímetro cúbico fue añadido a la velocidad de prueba y el sistema se estabilizo a 1.8 V. Sin embargo, al agregar otro centímetro cubico el sistema se detuvo, ya que las condiciones termodinámicas no permitían el funcionamiento del ciclo.

Con una temperatura de activación de 430 °C (300 W) se realizó el arranque a los 400 s y con 0 cm^3 volumen muerto extra, el sistema se estabilizo con 4.6 V a la salida del generador. Se añadió un centímetro cúbico de volumen muerto a los 600 s y el generador presento un voltaje estable de 3.6 V. Otro centímetro cubico fue agregado a los 800 s, estabilizando al sistema 2.8 V. El ciclo Stirling colapso cuando una cantidad de 3.5 cm^3 fue agregada. Las pruebas anteriormente descritas fueron repetidas con las temperaturas de 380 °C (250W) y 350 °C (200 W), las cuales colapsaron con un volumen muerto de 3 cm^3 y 1 cm^3 , respectivamente. Posteriormente al colapso o paro del motor, se trató iniciar nuevamente el ciclo, tratando de discriminar efectos transitorios. Sin embargo, después del paro, el motor ya no volvió a arrancar dadas sus condiciones operativas.

Dadas las pruebas anteriores, se denota que los intervalos de trabajo del actuador de volumen muerto se reducen debido al decremento de la diferencia de temperatura de la activación y de enfriamiento.

Además, el voltaje de salida del generador de imanes permanentes es inversamente proporcional a la cantidad de volumen muerto añadido al sistema, por lo que la constante proporcional del controlador PID debe ser negativa.

De manera similar la Figura 4.22a, se realizaron las pruebas descritas por la Figura 4.22, pero con una temperatura de enfriamiento de 40 °C. Además, las temperaturas de las pruebas fueron estabilizadas de una temperatura superior al punto de consigna, en donde el tiempo de arranque se presentó a los 100 s. A una temperatura de 470 °C (370 W) y con 0 cm^3 de volumen muerto agregado se obtuvo un voltaje estable de 5 V. Posteriormente a los 400 s, se añadió medio centímetro cúbico de volumen muerto a la velocidad de prueba (75 Hz), de este modo el sistema se estabilizó a los 4.7 V de salida. Este proceso de incremento continuo hasta que el ciclo se detuvo con una cantidad de 2.5 cm^3 cómo se observa en el intervalo T_4 .

En las pruebas con las temperaturas de activación de 430 °C (300 W) y 380 °C (250 W) los ciclos se detuvieron con la cantidad de volumen muerto de 1.5 cm^3 y 1 cm^3 , respectivamente. Sin embargo, debido a la disminución del diferencial de temperatura, en la prueba a 350 °C el motor no arranco en ningún momento.

Por lo anterior, se deduce que al incrementar la temperatura de compresión los intervalos de trabajo del actuador de volumen muerto son severamente reducidos, esto es debido a la disminución del diferencial de temperaturas.

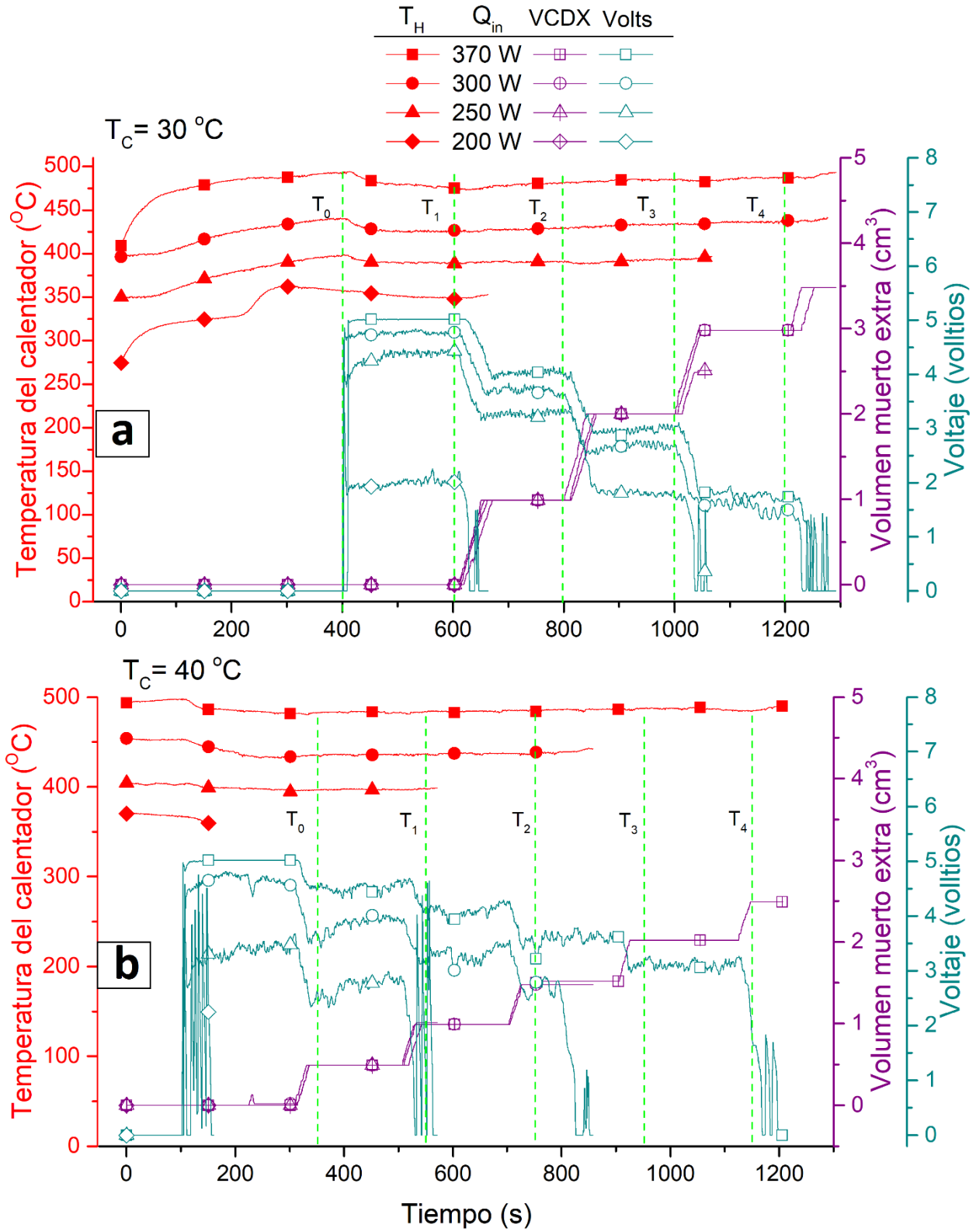


Figura 4.22. Estudio de la influencia del volumen muerto extra sobre el voltaje del generador con diferentes temperaturas de activación: a) con $T_c = 30\text{ }^\circ\text{C}$, b) $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$.

Dadas las pruebas experimentales previamente discutidas, es posible sintetizar la información en dos mapas que determinen la relación entre temperatura de calentador, enfriador y cantidad de volumen muerto. En la Figura 4.23a se presentan los mapas o superficies de respuesta, en donde se observan las zonas de operación según la temperatura del calentador y su volumen muerto a una temperatura de enfriamiento de 30 °C. En cambio, en la Figura 4.23b se presenta dicha relación a una temperatura de enfriamiento de 40 °C.

Las isolíneas vislumbrar puntos de operación a voltaje constante, de este modo en función de la variación de la temperatura de calentamiento es posible modificar la cantidad de volumen muerto para continuar operando a voltaje constante. Si observamos la isolínea de 4.37V podemos denotar que el intervalo de trabajo para mantener este voltaje constante es bastante corto. En cambio, la isolínea de 2.5 V presenta el intervalo de operación con mayor libertad. De igual modo, con una temperatura de enfriamiento de 40 °C se observa que la isolínea de 2.5 V determinar el mayor intervalo de trabajo a voltaje constante y que, mientras nos acerquemos al máximo (5V) el intervalo de trabajo es reducido hasta su mínimo. El área azul marino presenta los puntos donde el motor Stirling no puede operar.

Debido a lo anterior la zona de operación del motor Stirling no solo se desfasa o recorre en función del diferencial de temperaturas, sino que también se comprime.

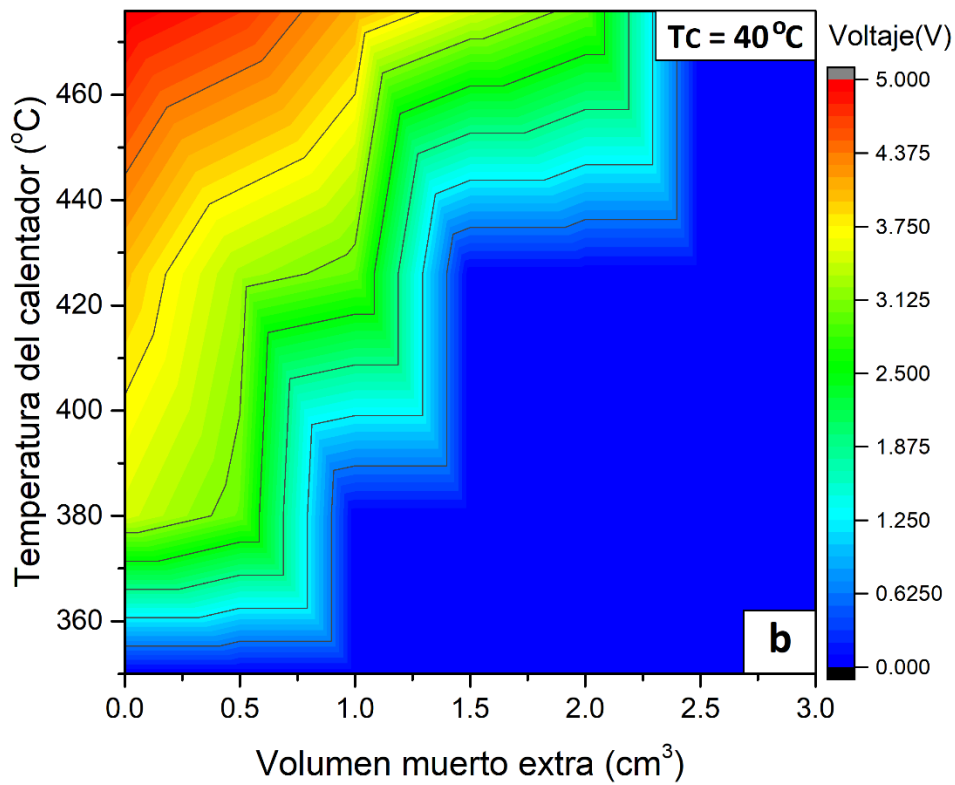
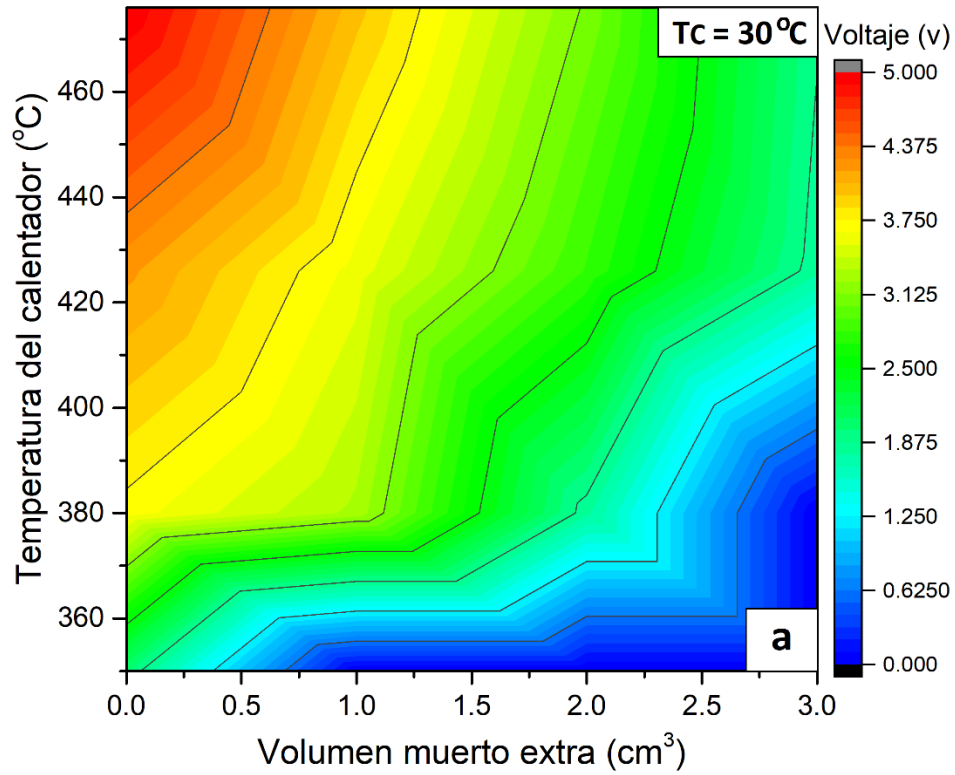


Figura 4.23. Superficies de respuesta de la relación entre la cantidad de volumen muerto añadido y la temperatura de activación: a) con $T_c = 30\text{ °C}$, b) $T_c = 40\text{ °C}$.

Transitorio de VCDX

En el estudio previo, la influencia de la cantidad de volumen muerto en el comportamiento operativo del sistema fue analizado en estado estable. Sin embargo, para fines de control es necesario estudiar el efecto transitorio en el sistema debido a la variación del volumen muerto.

Se realizaron algunas pruebas con un tiempo de registro de información de 10 ms, en donde la tarjeta de adquisición de datos y el sistema monitoreo y control desarrollado no tuvieron ningún problema. Sin embargo, el tiempo mínimo de registro de temperatura es de 200 ms debido al tiempo de respuesta de los circuitos integrados MAX6675. Además, ciertos cálculos y promedios son determinados en el sistema monitoreo y control los cuales toman intervalos de tiempo superiores a 10 ms. Por lo que se propuso un tiempo de registro de 50 ms para no saturar el bus de información ni la memoria interna del dispositivo.

En la Figura 4.24 se presentan las diversas pruebas que se realizaron para estudiar el estado transitorio debido a la variación del volumen muerto a una temperatura de activación y de enfriamiento de 412 °C y 30 °C, respectivamente. Las pruebas se realizaron de la siguiente manera:

- 1) Se estabilizaron los parámetros termodinámicos y eléctricos del sistema con 0 cm^3 volumen muerto.
- 2) A los 40 s se agregó un centímetro cúbico de volumen muerto a determinada velocidad “x Hz”. Se observó la perturbación y estabilización de los parámetros del sistema
- 3) A los 250 s se retiró el centímetro cúbico de volumen muerto previamente agregado a la misma velocidad “x Hz”, dejando al motor con 0 cm^3 volumen muerto extra. Se observó la perturbación y estabilización de los parámetros del sistema.
- 4) Los pasos 1 al 3 se realizaron varias veces, pero con diversas velocidades.

En la Figura 4.24a se observa como incrementar el volumen muerto de forma gradual, a una velocidad de 27.81 mm^3/s (100 Hz) la variación del voltaje es prácticamente lineal. Es decir, pasa linealmente de un estado estable de 4.87V con 0 cm^3 de volumen muerto a otro estado estable de 3.6V con 1 cm^3 de volumen muerto. En esta prueba se comprueba que, si el incremento o decremento de una variable es extremadamente lento (movimiento tiende a 0 cm), entonces el comportamiento del sistema se comportará como la superposición de todos los estados estables.

En cambio, al repetir el experimento, pero la adición de volumen muerto se realiza a una velocidad de $83.45 \text{ mm}^3/\text{s}$ (300 Hz) como se presenta en la Figura 4.24b, se observa que un pequeño efecto transitorio. Es decir, justo en el momento en el que el actuador de volumen muerto llega a la posición de 1 cm^3 , se observa como el voltaje baja poco mas del correspondiente al estado estable y posteriormente, incrementa para llegar a la estabilidad. Además, se muestra como decrementar la cantidad de volumen muerto no presenta perturbaciones notables.

Al repetir el experimento, pero con una velocidad de $139 \text{ mm}^3/\text{s}$ (500 Hz) en el actuador de volumen muerto, se muestra como existe el mismo fenómeno en donde se presenta un voltaje subamortiguado al pasar de un estado estable a otro (Figura 4.24c). Sin embargo, para fines de control las magnitudes de este fenómeno no son críticas para estas condiciones.

En cambio, cuando en la prueba se utilizó una velocidad de $194.7 \text{ mm}^3/\text{s}$ (700 Hz) en el actuador de volumen muerto, este fenómeno se incrementó alcanzando un voltaje mínimo de 3.13V (Figura 4.24d). Posteriormente se estabilizo a un voltaje promedio de 3.68V. Además, al retirar el volumen muerto previamente añadido no se observa a simple vista un fenómeno transitorio. Sin embargo, se presenta un pequeño sobre impulso el cual alcanza un voltaje máximo de 4.81V y posteriormente se estabiliza en 4.68 V.

Anteriormente se delimito que la velocidad máxima que tendría el actuador de volumen muerto es de $278.19 \text{ mm}^3/\text{s}$ (1000 Hz), se analizo una velocidad máxima de $250.37 \text{ mm}^3/\text{s}$ (900 Hz). En la Figura 4.24e se observa que el efecto subamortiguado alcanza un voltaje mínimo de 2.89V para después estabilizarse en 3.5V. Después de los 300 s en estado estable se le retiro todo el volumen muerto extra (1 cm^3), y debido a esto se presenta un pequeño sobre impulso con un voltaje máximo de 4.77V y se estabilizo a un voltaje de 4.62V.

De lo anterior se denota que el fenómeno de subamortiguamiento se presenta cuando las velocidades del actuador de volumen muerto son altas. Sin embargo, este fenómeno se presenta de manera crítica al incrementar la cantidad de volumen muerto en el sistema, ya que básicamente se extrae trabajo de frontera de forma súbita.

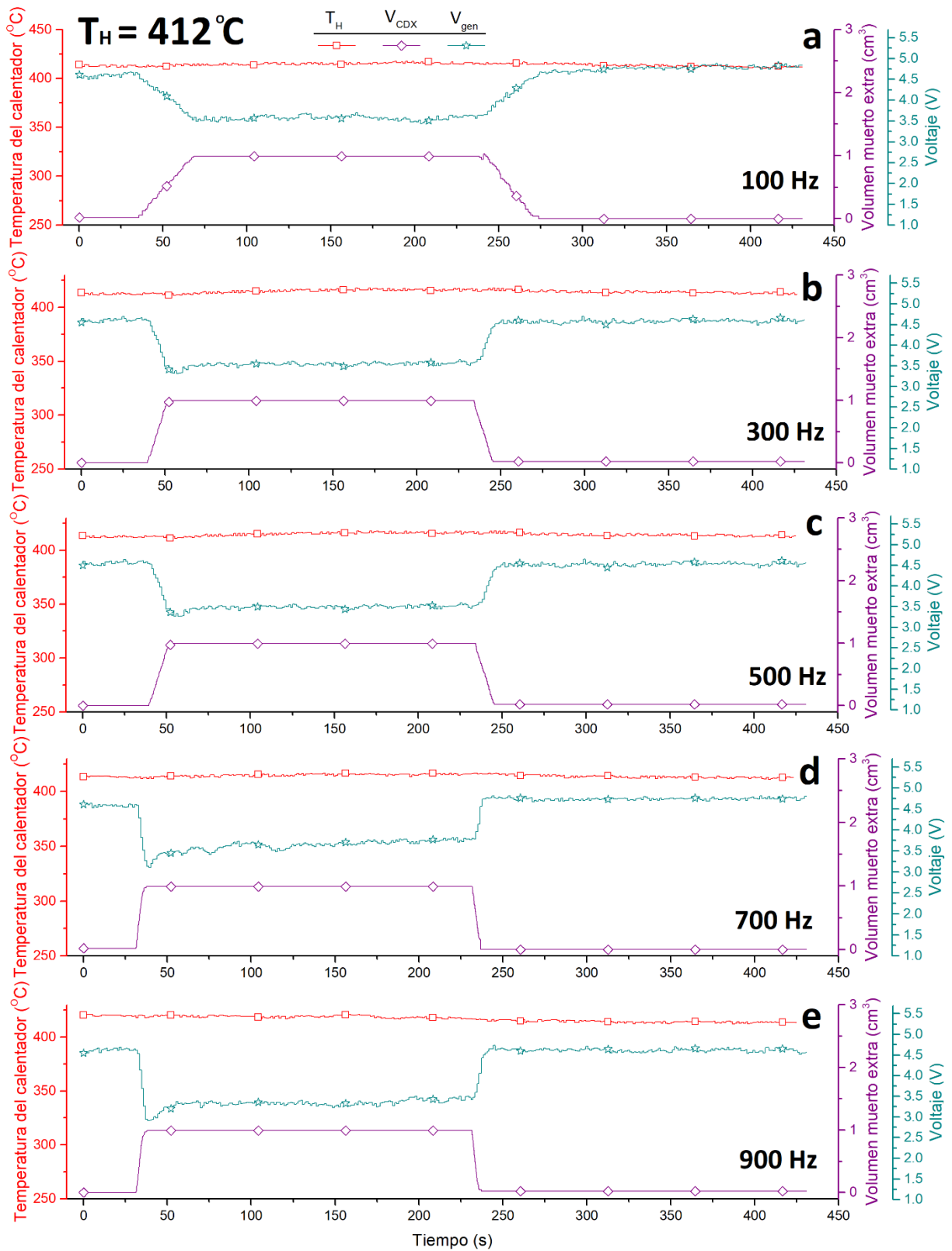


Figura 4.24. Evaluación del estado transitorio del voltaje del sistema debido a la variación del volumen muerto extra con una temperatura de activación de 412°C .

No obstante, a los resultados de las pruebas previas y con fines de comparación, se realizó el mismo experimento, pero con una temperatura de activación superior ($470\text{ }^{\circ}\text{C}$), pero la temperatura del enfriado se mantuvo a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la Figura 4.25a se muestra la primera prueba con estas nuevas condiciones, en las que se presentan 5V en la salida del generador con 0 cm^3 de volumen muerto. Además, a los 30 s se agregó un centímetro cúbico de volumen muerto a una velocidad de $27.87\text{ mm}^3/\text{s}$ (100 Hz). Se observa que a pesar de ser una velocidad de desplazamiento baja el efecto del voltaje subamortiguado (4.11V) se presenta y tarda más tiempo en alcanzar el estado estable (4.38V). Por lo que, la temperatura de activación juega un papel importante en la variación del volumen muerto.

En la Figura 4.25b se muestra la prueba realizada con una velocidad $83.45\text{ mm}^3/\text{s}$ (300 Hz) en el actuador de volumen muerto, en donde se observa que el fenómeno de subamortiguamiento presenta un voltaje mínimo de 2.77V y estabilizando a un voltaje 3.91V . Sin embargo, al retirar la cantidad de volumen muerto previamente suministrada, el efecto de sobre impulso de voltaje es prácticamente nulo, lo cual es debido a los límites del generador eléctrico. De manera similar, cuando el volumen muerto es agregado a una velocidad de $139\text{ mm}^3/\text{s}$ (500 Hz), el voltaje presenta un voltaje mínimo de 3.42V y logra estabilizarse después de 120 s alcanzando un voltaje de 4.12V promedio (Figura 4.25c).

Para finalizar este análisis comparativo del estado transitorio debido a la variación del volumen muerto extra en el motor Stirling, se incrementó la cantidad de volumen muerto a una velocidad de $250.37\text{ mm}^3/\text{s}$ (900 Hz) (Figura 4.25e). El voltaje en la salida del generador alcanzó un mínimo de 3.34V y posteriormente se estabilizó a los 4.12V promedio.

Por lo que, cuando el motor Stirling es sometido a una alta temperatura de activación ($470\text{ }^{\circ}\text{C}$) las perturbaciones debidas a la variación del volumen muerto son más significativas, que cuando es sometido a una baja temperatura de activación ($412\text{ }^{\circ}\text{C}$). Lo anterior indica que la presión promedio del motor es mayormente afectada con un alto diferencial de temperaturas, y a su vez, la disminución del flujo másico decrementa la transferencia de calor y el desempeño del motor.

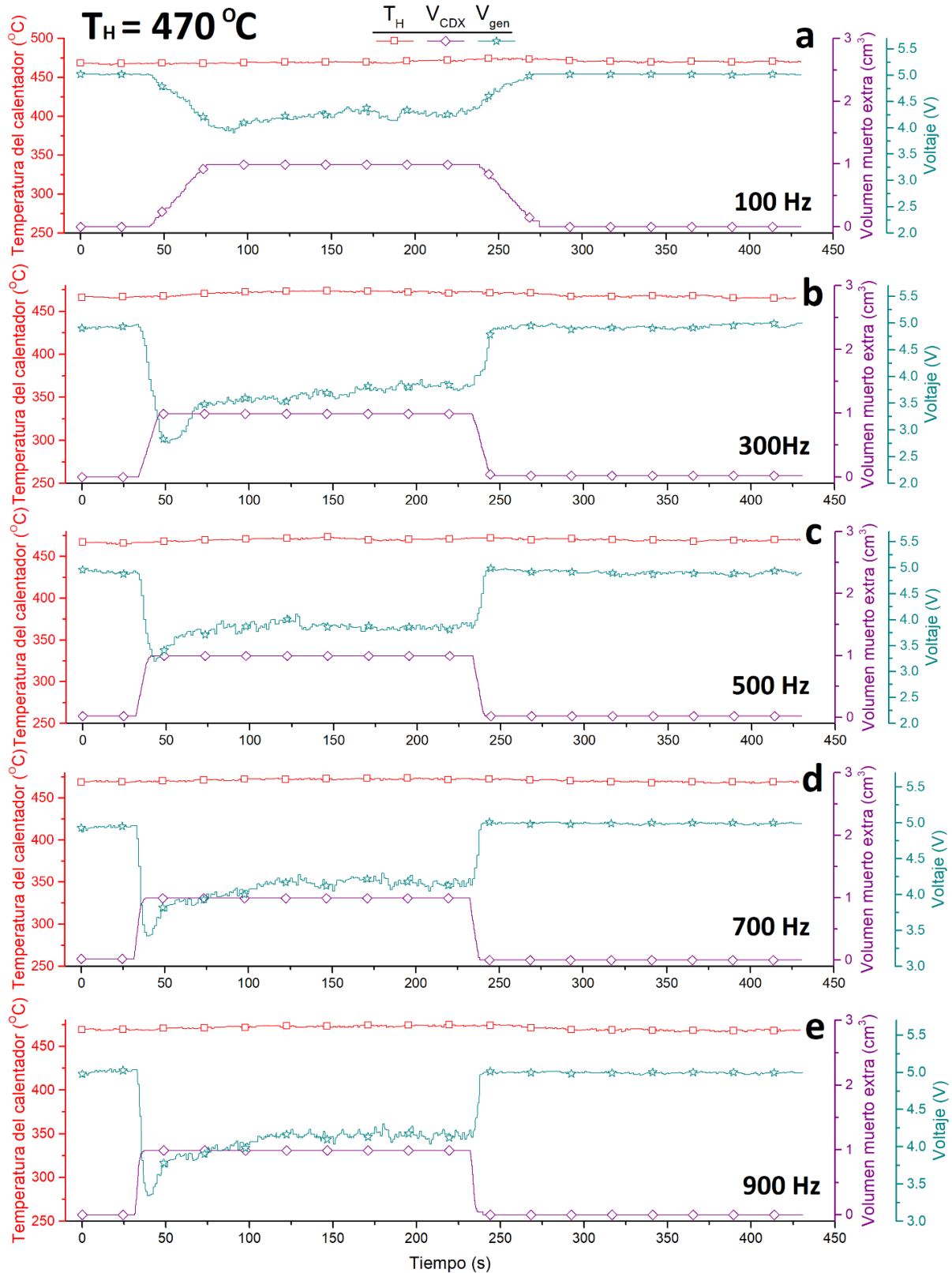


Figura 4.25. Evaluación del estado transitorio del voltaje del sistema debido a la variación del volumen muerto extra con una temperatura de activación de 470°C .

4.4 Control del volumen muerto para voltaje constante

Una vez realizado el estudio de sensibilización del nano-banco de pruebas se realizaron los ajustes en los controladores de los subsistemas, así como de los contadores de registros y ligeros cambios en la tarjeta de circuitos electrónicos. Se realizó un estudio comparativo entre las constantes proporcionales de los controladores PID, cuyo objetivo es mantener el voltaje de consigna. Sin embargo, para verificar su funcionalidad y robustez, fue puesto a diversas perturbaciones, como se muestra a continuación.

En la Figura 4.26a se presenta el comportamiento operativo del controlador de potencia del motor Stirling a través de la variación de su volumen muerto con una $K_p = -500$, en donde se mantuvo una temperatura de activación de 470 °C, generando un voltaje de 4.98 V. Una vez iniciada la prueba, a los 50 s se cambió el punto de consigna de 5V a 4V, de este modo el actuador de volumen muerto debe determinar la cantidad de volumen añadido. En aproximadamente 15 segundos el sistema logra el punto de consigna de 4V, añadiendo una cantidad de 1 cm^3 promedio. Estas condiciones se mantienen durante 200 segundos, hasta que nuevamente el punto de consigna es reestablecido de 4V a 5V. En 21 segundos el controlador estabiliza el voltaje de la salida del generador en 5V, reduciendo la cantidad de volumen muerto a 0 cm^3 . En $t = 318$ s se presenta una pequeña perturbación del medio, la cual es mitigada por el controlador de volumen muerto.

En la Figura 4.26b se muestra la información adquirida de la siguiente prueba, en donde una vez estables todos los parámetros termodinámicos y eléctricos medidos (instrumentación), se cambió el punto de consigna de 5V a 3V en $t = 50$ s. El controlador PID tarda aproximadamente 25 segundos en converger al voltaje de consigna (3V), posteriormente mantiene el punto de estable los parámetros durante 200 segundos después de haber añadido 2.8 cm^3 de volumen muerto. En $t = 250$ s el punto de consigna es nuevamente es cambiado de 3V a 5V. El tiempo de convergencia es de 24 segundos, manteniendo un voltaje estable de 5V hasta el final de la prueba, con 0 cm^3 de volumen muerto.

En cambio, en la Figura 4.26c se muestra la tercera prueba del controlador de volumen muerto, en donde a los 50 segundos se cambió el punto de consigna de 5V a 2V. Sin embargo, dadas las características del sistema descritas en los mapas o superficies de la Figura 4.23, se observa que el

punto de consigna de 2V tiene una amplia zona de convergencia, sin embargo, debido a la elevada magnitud de la constante proporcional, el controlador oscila.

Por otra parte, en la cuarta prueba de este experimento, se observa que el controlador converge hacia el punto de consigna de 1.5V sin problema. Sin embargo, el comportamiento en la cantidad de volumen muerto no presenta un perfil lineal o proporcional. Debido a la rápida respuesta del controlador, existe un fenómeno de oscilación en la temperatura del calentador. Es decir, si el volumen muerto incrementa rápidamente el flujo másico y por ende, la temperatura del calentador incrementa. Al incrementar la temperatura del calentador, el desempeño del motor incrementa, por lo que más volumen muerto debe ser agregado.

Por lo que, una K_p con una gran magnitud hará que el controlador oscile para ciertos puntos de consigna. Además, recordando que el estudio del estado transitorio de la variación del volumen muerto demostró que la velocidad de desplazamiento del embolo del actuador de volumen muerto influye en las oscilaciones del sistema. Por otra parte, el hecho de que el controlador varié la velocidad del actuador en función de la diferencia del voltaje de consigna y el voltaje medido (señal de error) reduce súbitamente el efecto de subamortiguamiento del voltaje.

Con la finalidad de implementar un controlador que tenga un mejor comportamiento se realizaron un conjunto de pruebas utilizando una $K_p = -250$, las cuales se presentan en la Figura 4.27. En la primera prueba de este conjunto todos los parámetros termodinámicos y eléctricos medidos han sido estabilizados, en donde a partir de los 50 segundos se cambió el punto de consigna de 5V a 4V. El controlador presenta un comportamiento sobre amortiguado en la señal del voltaje de salida del generador al añadir 1.2 cm^3 de volumen muerto, ninguna oscilación es observada (Figura 4.27a). Los parámetros permanecen estables durante 200 segundos hasta que el punto de consigna es nuevamente modificado de 4V a 5V. El controlador converge al punto de consigna en aproximadamente 80 segundo con un comportamiento sobre amortiguado, extrayendo todo el volumen muerto agregado. Posteriormente en $t = 250 \text{ s}$ el voltaje de consigna es cambiado a 5V, de este modo el controlador converge aproximadamente 50 segundos.

En la Figura 4.27b se presenta el comportamiento del controlador el sistema cuando el punto de es variado de 5V a 3V ($t = 50 \text{ s}$), en donde el control PID converge en 78 segundos y mantiene sus

parámetros termodinámicos y eléctricos estables. En $t = 250 \text{ s}$ el punto de consigna es cambiado nuevamente a 5V, de este modo el controlador reduce a 0 cm^3 de volumen muerto en el actuador.

En las Figura 4.27c y Figura 4.27d se presentan las pruebas del sistema, para estudiar su comportamiento al cambiar su punto de consigna de 5V a 2V y de 5V a 1.5V, respectivamente. Se observa que al tener una constante proporcional adecuada, la respuesta del controlador no oscila ni presenta cambios abruptos. En contraste con las pruebas mostradas en las Figura 4.26c y Figura 4.26d presentan una respuesta no ideal para el control del sistema. En cambio las pruebas presentadas en las Figura 4.27c y Figura 4.27d muestran un comportamiento suave, que a pesar de ser sobre amortiguado, convergen en el punto de consigna sin problema alguno.

Por lo que, a partir de este estudio comparativo entre las constantes proporcionales del controlador de potencia de motor Stirling a través de la variación de su volumen muerto, se obtuvieron los primeros indicios de la operatividad del motor y la sintonización de las constantes del controlador PID en la plataforma de LabVIEW.

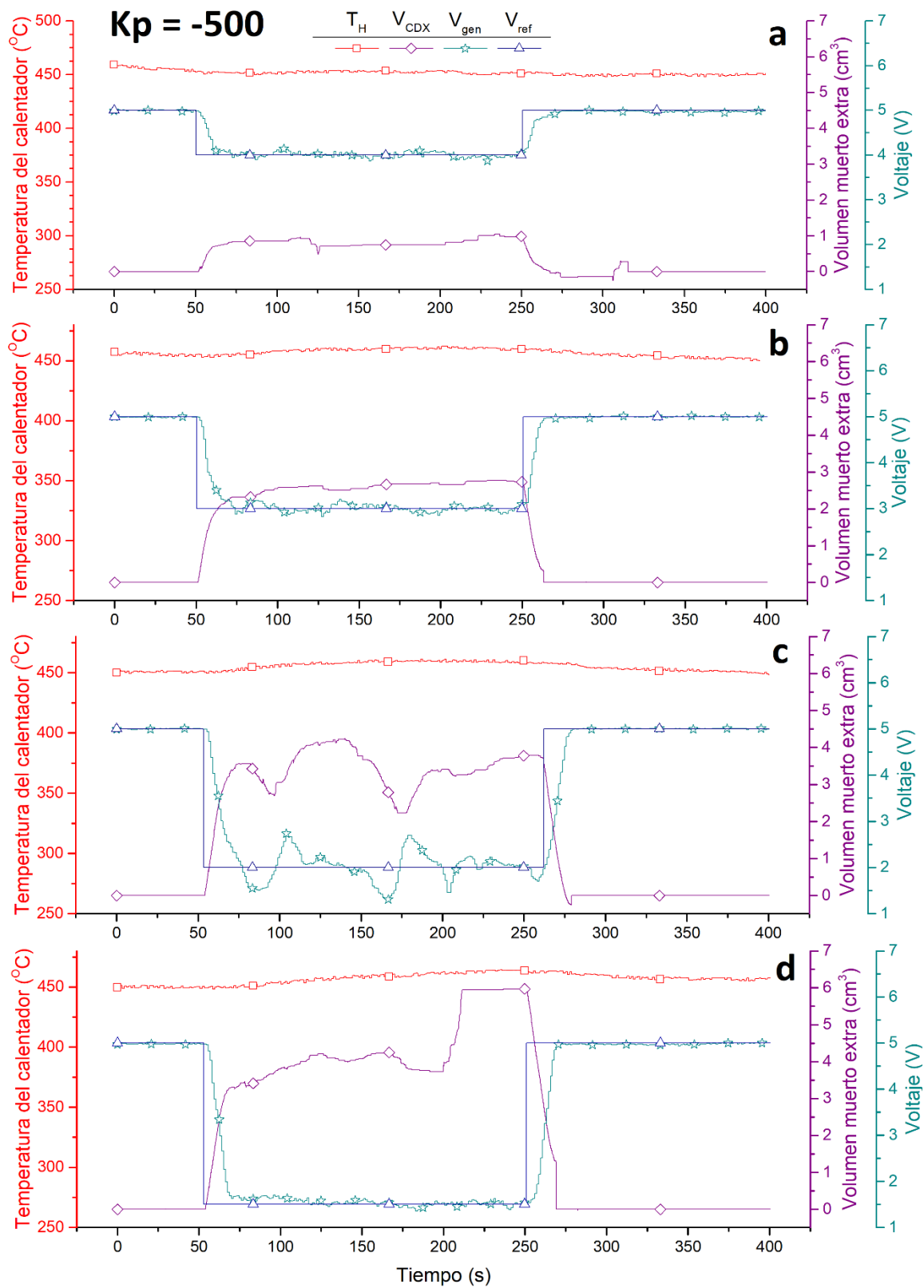


Figura 4.26. Controlador de voltaje a través de la variación del volumen muerto con $K_p = -500$ y los puntos de consigna de: a) 4V, b) 3V, c) 2V y d) 1.5V.

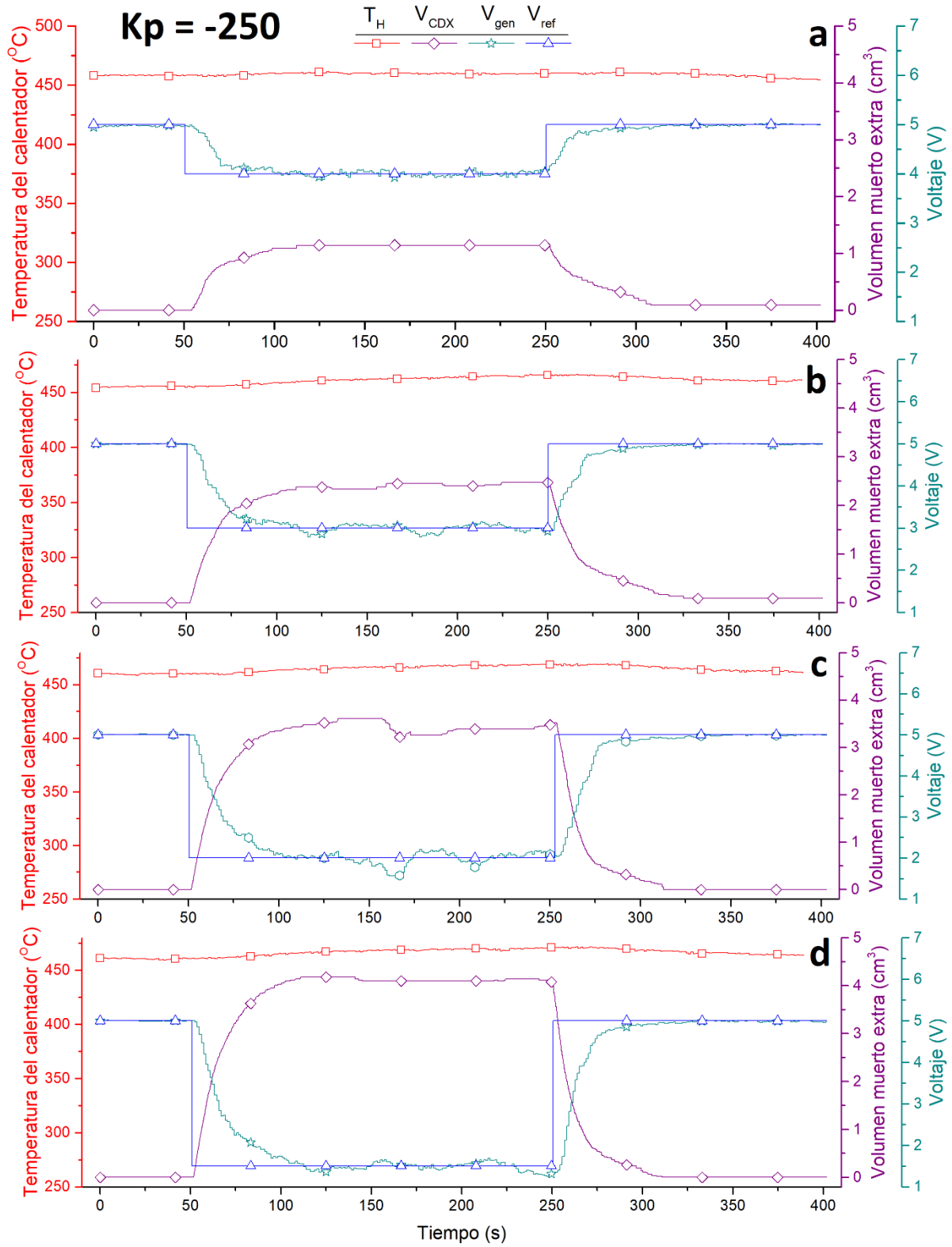


Figura 4.27. Controlador de voltaje a través de la variación del volumen muerto con $K_p = -250$ y los puntos de consigna de: a) 4V, b) 3V, c) 2V y d) 1.5V.

Perturbaciones en el calentador

Este tipo de perturbaciones fueron consideradas para emular el cambio en la potencia de la radiación solar en un concentrador solar de gran escala, nublados parciales o desenfocos del concentrador solar, además de ráfagas de viento que mermen la estabilidad de temperatura debido a las pérdidas de calor por convección. Las perturbaciones en el calentador se realizaron de manera controlada por medio del sistema monitoreo y control, en el cual se programó un perfil de energía no constante para variar las condiciones termodinámicas del motor Stirling.

En la Figura 4.28 se observa el comportamiento del sistema y su controlador PID al variar de forma controlada la energía suministrada en las resistencias térmicas del calentador del motor Stirling. Se estabilizaron los parámetros al inicio de esta prueba, una temperatura del calentador de 470 °C (370 W) y un voltaje de salida del generador de 5V en los primeros 100 segundos. Se impuso 3.5V como voltaje de consigna, de este modo el controlado suministra la cantidad de volumen muerto apropiada. Posteriormente a los 250 segundos se redujo la cantidad de energía suministrada a las resistencias del calentador a 300 W. Por lo que, el controlador PID disminuye la cantidad de volumen muerto para aumentar el desempeño del motor y poder mantener el voltaje de consigna, logrando la estabilidad a los 500 segundos. A los 650 segundos la cantidad de energía suministrada a las resistencias es cambiada a 200 W, por lo que nuevamente el volumen muerto debe ser reducido para aumentar aún más el desempeño del motor Stirling. El voltaje de rizo oscila dentro de un intervalo limitado por el voltaje de consigna en todo momento, comprobando que el controlador de potencia de motor Stirling a través de la variación del volumen muerto puede mantener la estabilidad de sus parámetros eléctricos a pesar de la variación de la temperatura del calentador.

Por otra parte, se puede observar como la temperatura del refrigerante incremento 2.3 °C a lo largo de toda la prueba. No obstante, dicho incremento no es significativo para la controlabilidad de la temperatura del enfriador, la cual por medio del PID_{enf} mantiene una temperatura de 30 °C.

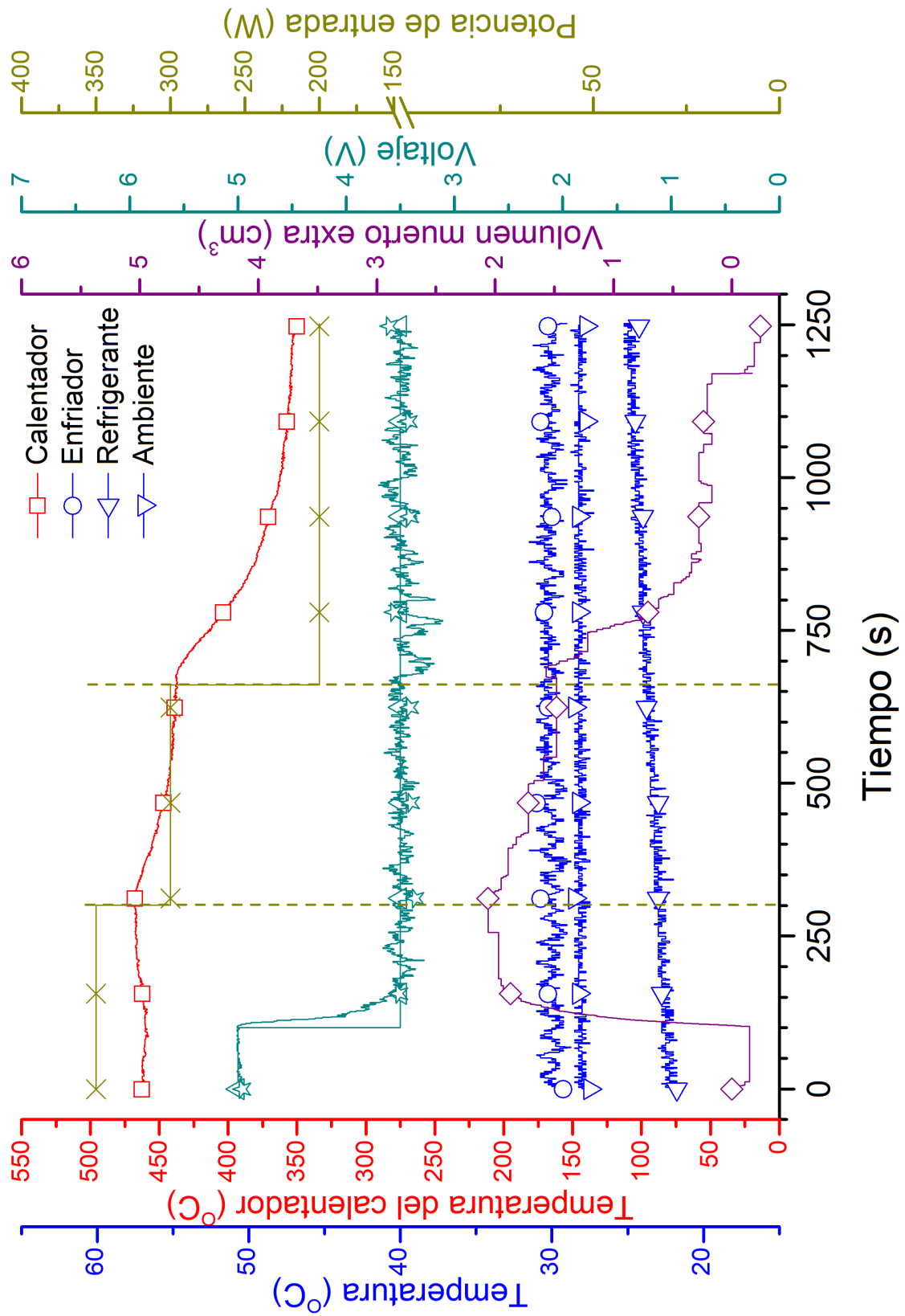


Figura 4.28. Implementación del control de potencia para la mitigación de las perturbaciones de la temperatura de activación.

Perturbaciones en el enfriador

Este tipo de perturbaciones fueron consideradas para emular el cambio de temperatura ambiente y la velocidad de viento, la cuales se presentan de forma continua en un día. Las perturbaciones en el enfriador se realizaron de manera controlada por medio del sistema monitoreo y control, el cual controla el flujo del refrigerante del sistema por medio de una bomba de 12V energizada por un relevador de estado sólido manejado por un PWM a 100 Hz.

En la Figura 4.29 se presenta el comportamiento del controlador de potencia de motor Stirling a través de la variación de volumen muerto, en donde las perturbaciones de la planta fueron dadas en la temperatura del enfriador. La prueba inicio con una temperatura del calentador de 460 °C, una temperatura del enfriador 20 °C y un voltaje en la salida del generador de 3.5V. Con la finalidad de mantener un gradiente de temperatura viable entre el enfriador y el fluido de trabajo, el líquido refrigerante fue previamente enfriado hasta tener una temperatura de 14 °C. Lo anterior permitió realizar las pruebas con temperaturas menores a la del ambiente.

En el intervalo T_0 el voltaje se mantiene cercano a los 3.5V, ya que las pequeñas perturbaciones del calentador y del medio son mitigada por la regulación de la cantidad de volumen muerto realizada por el controlador. En $t = 350$ s se cambia la temperatura de consigna del enfriador de 20 °C a 30 °C, por lo que la bomba de agua deja de funcionar. La zona de compresión comienza a calentarse gradualmente hasta que se alcanzan los 30 °C en el enfriador ($t \approx 460$ s), de este modo el controlador PID_{enf} opera nuevamente para converger en la temperatura de consigna. En el intervalo T_1 se estabilizan los parámetros del sistema para el nuevo punto de consigna. Sin embargo, los cambios en la cantidad de volumen muerto son similares a los ejecutados en T_0 . Por lo que, las perturbaciones del calentador y del medio aún son más significativas que las presentadas por el cambio de temperatura del enfriador.

En el intervalo T_2 , se provoca un cambio en la temperatura de enfriamiento y se estabiliza cerca de los 40 °C, pero en esta ocasión esta variación si afecta significativamente el desempeño del sistema, de este modo el controlador de potencia del motor Stirling disminuye la cantidad de volumen muerto para aumentar la potencia de este. En el último intervalo (T_4), se redujo nuevamente la temperatura de enfriamiento de 40 °C a 30 °C, pero el voltaje del generador se mantiene en el mismo intervalo de trabajo debido al controlador de volumen muerto.

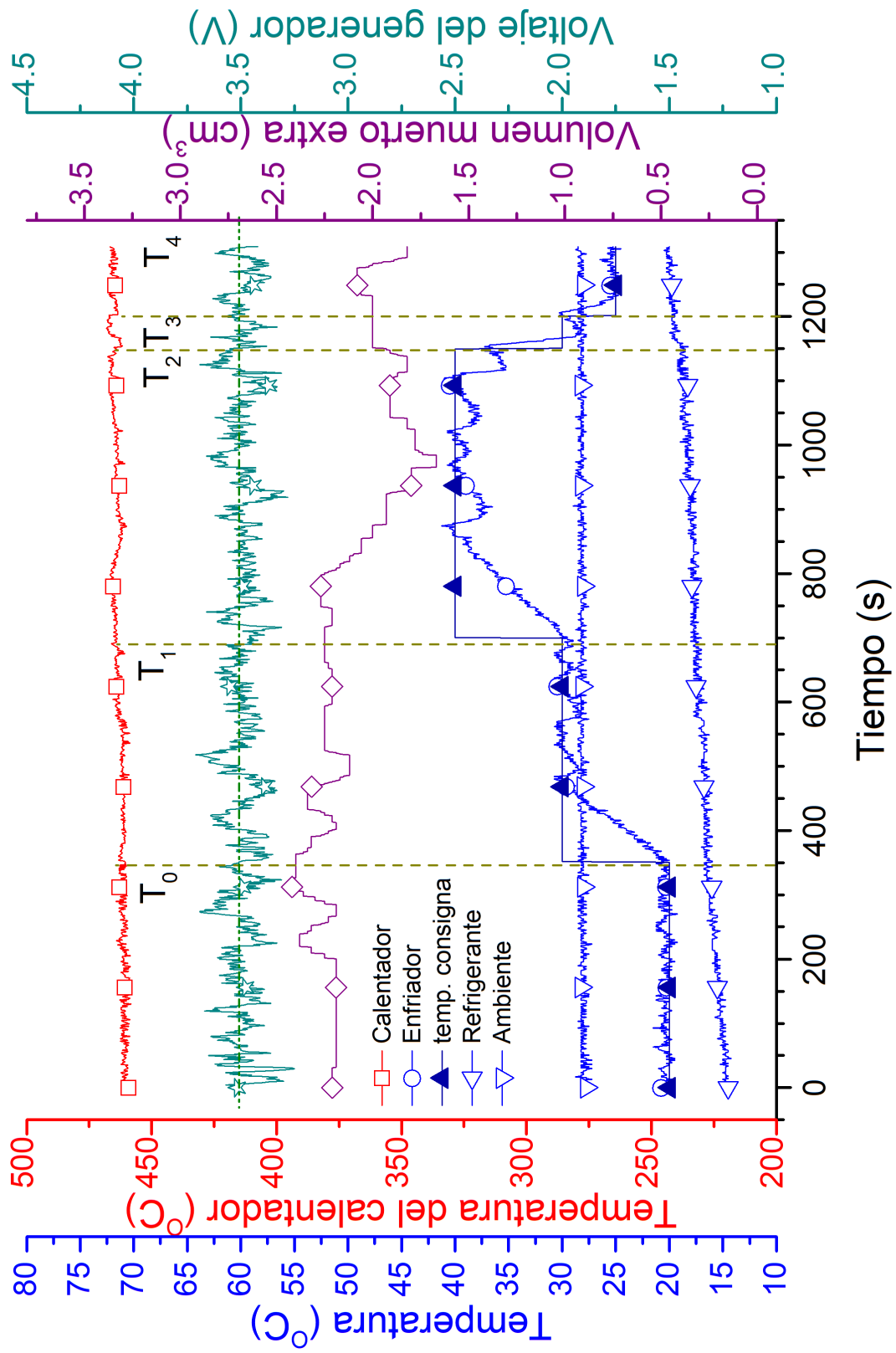


Figura 4.29. Implementación del control de potencia para la mitigación de las perturbaciones de la temperatura del sumidero.

Capítulo 5 Conclusiones

En este capítulo se plasman las conclusiones generales de la propuesta tecnológica y sus modos de implementación, así como de los estudios experimentales realizados. Además, se presentan como trabajos futuros aquellas ideas que surgieron en el transcurso de este trabajo de tesis, así como las recomendaciones para los investigadores de esta área de interés.

Conclusiones

En este trabajo de tesis se realizó un análisis comparativo de distintos modos de implementación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando un motor Stirling como primo motor y un concentrador Scheffler de foco fijo como activador. Se propuso la implementación de un controlador de potencia del motor Stirling, el cual varía la cantidad de volumen muerto añadido al sistema. Además, los subsistemas concentradores Scheffler, motor Stirling y controlador fueron analizados a detalle, con los cuales se determinó una serie de conclusiones.

Concentrador Scheffler; Los discos con Θ_{int} menores a 60° presentan menos horas de operación y más energía térmica interceptada y reflejada al punto focal fijo. En cambio, Los discos con Θ_{int} superior a 60° presentan más horas de operación y menos potencia captada. El disco con $\Theta_{int} = 57^\circ$ presenta el mejor compromiso entre tiempo y operación y potencia captada, con un tiempo de operación de 7.84 horas, una potencia promedio de 6.54 KW.

La metodología propuesta para el análisis de las interacciones de las variables de diseño muestra que existen efectos que influyen conjuntamente en la eficiencia, así como las condiciones en las que los efectos de una variable predominan sobre los efectos de otra. El indicador propuesto de la interacción global del sistema Φ representa cómo una variable influye sobre las demás variables del sistema, constituyendo una jerarquía de variables de diseño para un motor Stirling.

Motor Stirling; El estudio de las interacciones de las variables de las 240 superficies de respuesta mostró que la carrera del pistón tiene un mayor número de efectos de articulación o interacciones significativas con el resto de las variables y seguido por el diámetro del cilindro. El número y la longitud de los tubos del enfriador son el segundo par de variables con más alta jerarquía y su relación óptima está limitada por el área de transferencia de calor, el volumen muerto y el

compromiso entre las pérdidas térmicas y de presión. Por otro lado, la corona del pistón no presenta interacción considerable alguna; sin embargo, tiene una influencia importante en la eficiencia del sistema ya que disminuye las pérdidas térmicas en la zona de expansión.

Además, Se determino para un volumen barrido, la carrera del pistón tiene que ser mayor al diámetro del cilindro para reducir las pérdidas térmicas en la zona de expansión. Los ángulos de fase inferiores a 90° presentan ventajas cuando la entrada de calor es insuficiente, ya que la reducción del caudal másico permite aumentar la temperatura de expansión y el trabajo de P-V. Con las interacciones del volumen muerto de la zona de compresión, es posible determinar la cantidad de V_{CS} necesaria para hacer el sistema más eficiente.

Experimental; la manipulación en la cantidad de volumen muerto añadido al motor influye sobre su desempeño, siendo una variable practica para la controlabilidad de la potencia del motor Stirling. Existe una relación entre la temperatura de expansión y la cantidad de volumen muerto que determina el intervalo de trabajo del motor Stirling y los límites de su controlabilidad.

Las perturbaciones debidas a la variación del volumen muerto son más significativas cuando temperatura de activación es mayor (470°C). El fenómeno de subamortiguamiento se presenta cuando las velocidades del actuador de volumen muerto son superiores a los 700 Hz. Sin embargo, este fenómeno se presenta de manera crítica al incrementar la cantidad de volumen muerto en el sistema, ya que básicamente se extrae trabajo de frontera de forma súbita y no al decrementar. A partir un estudio experimental comparativo se determinaron las constantes proporcionales del controlador de potencia de motor Stirling.

Recomendaciones y trabajos futuros

En desarrollo de este trabajo de tesis se realizaron diversas herramientas de cómputo, estudios, prototipos e investigaciones adyacentes de los motores Stirling y su controlabilidad, por lo que a continuación se describen algunos de los trabajos futuros que se contemplan de manera inmediata para su desarrollo e implementación:

- Desarrollo e implementación del sistema monitoreo y control para el motor Stirling tipo Alfa con capacidad de 2 kW nominal.

- Desarrollo de un motor Stirling tipo Alfa robusto de baja capacidad, en el cual se implementará el sistema de control previamente desarrollado en este trabajo de tesis.
- Desarrollo de un concentrador Scheffler de foco fijo para la corroboración de los resultados preliminares, así como para la generación de artículos científicos.
- Propuesta de motor de pistón libre de baja capacidad para el desarrollo de comunidades rurales como fuente de energía eléctrica a través del uso de las energías renovables.

Referencias

- Ahmadi, Mohammad et al. 2013. "Application of the Multi-Objective Optimization Method for Designing a Powered Stirling Heat Engine: Design with Maximized Power, Thermal Efficiency and Minimized Pressure Loss." *Renewable Energy* 60: 313–22. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113002504> (October 23, 2018).
- Almajri, Ahmad, Saad Mahmoud, and Raya Al-Dadah. 2017. "Modelling and Parametric Study of an Efficient Alpha Type Stirling Engine Performance Based on 3D CFD Analysis." *Energy Conversion and Management* 145: 93–106. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417303898> (October 23, 2018).
- Almstrom S.H., Bratt C., Neiving H.G. 1981. "Control Systems for United Stirling 4-95 Engine in Solar Application." *Proc., Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.* <https://www.osti.gov/biblio/5352750-control-systems-united-stirling-engine-solar-application> (March 15, 2020).
- Alvarez-Aguirre, Alejandro, Eloísa García-Canseco, and Jacqueliem M.A. Scherpen. 2010. "Linear Dynamics and Control of a Kinematic Wobble-Yoke Stirling Engine." *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*: 2747–52.
- Automotive Stirling Engine Development Program*. 1978. Michigan, United States.
- Babaelahi, Mojtaba, and Hoseyn Sayyaadi. 2015. "Modified PSVL: A Second Order Model for Thermal Simulation of Stirling Engines Based on Convective–Polytropic Heat Transfer of Working Spaces." *Applied Thermal Engineering* 85: 340–55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115002331> (November 1, 2018).
- Beale, William T. 1969. "Free Piston Stirling Engines - Some Model Tests and Simulations." In *SAE Technical Papers*, SAE International.
- Beltrán-Chacon, Ricardo et al. 2015. "Design and Analysis of a Dead Volume Control for a Solar Stirling Engine with Induction Generator." *Energy* 93, Part 2: 2593–2603.
- Brown, J.E., and O.I. Butler. 1953. "A General Method of Analysis of Three-Phase Induction Motors with Asymmetrical Primary Connections." *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering* 100(73): 25–34.
- Carrillo Caballero, Gaylord Enrique et al. 2017. "Optimization of a Dish Stirling System Working with DIR-Type Receiver Using Multi-Objective Techniques." *Applied Energy* 204: 271–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.053>.
- Chen, N., and F. Griffin. 1983. *A Review of Stirling Engine Mathematical Models*. Oak Ridge National Laboratory, Report No. ORNL/CON-135, Tennessee. <https://www.osti.gov/servlets/purl/5948203> (January 27, 2020).
- Chen, Wen, Yu Yang, and Jose Salazar. 2015. "A CFD Parametric Study on the Performance of a Low-Temperature-Differential γ -Type Stirling Engine." *Energy Conversion and Management* 106: 635–43.

- Dineen, John J, and N H Durham. 1980. *STIRLING ENGINE CONTROL SYSTEM*.
- García-Canseco, Eloísa, Alejandro Alvarez-Aguirre, and Jacquelin M.A. Scherpen. 2015. “Modeling for Control of a Kinematic Wobble-Yoke Stirling Engine.” *Renewable Energy* 75: 808–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.038>.
- Hanes, Bryan, and Randall Robert Gaiser. 1998. “Electric Swashplate Actuator for Stirling Engines.”
- Hirata, Koichi, and Shoichi Iwamoto. 1999. “Study on Design and Performance Prediction Methods for Miniaturized Stirling Engine.”
- Holland, Ray. 1989. “Appropriate Technology: Rural Electrification in Developing Countries.” *IEE Review* 35(7): 251. https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ir_19890112 (January 19, 2020).
- Howard, Dustin F., Jiaqi Liang, and Ronald G. Harley. 2010. “Control of Receiver Temperature and Shaft Speed in Dish-Stirling Solar Power Plants to Meet Grid Integration Requirements.” *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings*: 398–405.
- Jan, Wrona, and Prymon Marek. 2016. “Mathematical Modeling of the Stirling Engine.” *Procedia Engineering* 157: 349–56.
- Kalogirou, Soteris. 2003. “The Potential of Solar Industrial Process Heat Applications.” *Applied Energy* 76(4): 337–61.
- Kongtragool, Bancha, and Somchai Wongwises. 2005. “Investigation on Power Output of the Gamma-Configuration Low Temperature Differential Stirling Engines.” *Renewable Energy*.
- . 2006. “Thermodynamic Analysis of a Stirling Engine Including Dead Volumes of Hot Space, Cold Space and Regenerator.” *Renewable Energy* 31(3): 345–59.
- Kumar, Anil, Om Prakash, and Ajay Kumar Kaviti. 2017. “A Comprehensive Review of Scheffler Solar Collector.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77(March 2016): 890–98.
- Li, Ruijie, Lavinia Grosu, and Wei Li. 2017. “New Polytropic Model to Predict the Performance of Beta and Gamma Type Stirling Engine.” *Energy* 128: 62–76.
- Li, Y., S. S. Choi, and C. Yang. 2014. “Dish-Stirling Solar Power Plants: Modeling, Analysis, and Control of Receiver Temperature.” *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5(2): 398–407.
- Li, Yang, San Shing Choi, and D. Mahinda Vilathgamuwa. 2018. “Primary Frequency Control Scheme for a Fixed-Speed Dish-Stirling Solar-Thermal Power Plant.” *IEEE Transactions on Power Systems* 33(2): 2184–94.
- Mancini, Thomas et al. 2003. “Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status.” *Journal of Solar Energy Engineering* 125(2): 135. <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=145673> 2 (September 19, 2018).

- Martini, W. 1983. *Stirling Engine Design Manual*. DOE/NASA/3152-78/1, NASA, CR-13518.
- Mohammadnia, Ali et al. 2020. “Utilizing Thermoelectric Generator as Cavity Temperature Controller for Temperature Management in Dish-Stirling Engine.” *Applied Thermal Engineering* 165: 114568. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114568>.
- Munir, A., O. Hensel, and W. Scheffler. 2010. “Design Principle and Calculations of a Scheffler Fixed Focus Concentrator for Medium Temperature Applications.” *Solar Energy* 84(8): 1490–1502. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10002021> (October 3, 2018).
- Naomasa Nakajima, Kohji Wada, Masaru Hirata. 1982. “Study on Speed Control of Stirling Engine by Phase-Angle Variation.”
- Philips. 1951. “PHILIPS AIR-ENGINE GENERATOR MP1002CA.” *ResearchGate*.
- Roldan, Constantino, Pedro Pieretti, and Luis Solorzano. 2010. “Conceptual and Basic Design of a Stirling Engine Prototype for Electrical Power Generation by Solar Means.” *ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability, ES 2010 2*: 239–49.
- Ruelas, José, Nicolás Velázquez, and Jesús Cerezo. 2013. “A Mathematical Model to Develop a Scheffler-Type Solar Concentrator Coupled with a Stirling Engine.” *Applied Energy* 101: 253–60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912004138> (August 23, 2018).
- Sayapin, S. N. 2017. “Control System for the Stirling Engine.” *Russian Engineering Research* 37(10): 841–44.
- Scollo, Leonardo, Pablo Valdez, and Jorge Barón. 2008. “Design and Construction of a Stirling Engine Prototype.” *International Journal of Hydrogen Energy* 33(13): 3506–10.
- Shendage, D., S. Kedare, and S. Bapat. 2011. “An Analysis of Beta Type Stirling Engine with Rhombic Drive Mechanism.” *Renewable Energy* 36(1): 289–97.
- . 2017. “Dynamic Balancing and Experience during the Development of a Single Cylinder Beta-Configuration Stirling Engine Using Rhombic Drive.” *Energy* 140: 224–39.
- Singh, Uday Raj, and Anil Kumar. 2018. “Review on Solar Stirling Engine: Development and Performance.” *Thermal Science and Engineering Progress* 8(August): 244–56. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.016>.
- Stine, W.B. *Stirling Engines*. In: Kreith F, Editor. *The CRC Handbook of Mechanical Engineers*. Boca Raton: <http://www.sciencedirect.com/reference/49942> (January 19, 2020).
- Tartière, Thomas. 2017. “A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market.” *Energy Procedia* 129: 2–9.
- Tavakolpour-Saleh, A. R., and H. Jokar. 2016. “Neural Network-Based Control of an Intelligent Solar Stirling Pump.” *Energy* 94: 508–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.006>.
- Thombare, D.G., and S.K. Verma. 2008. “Technological Development in the Stirling Cycle

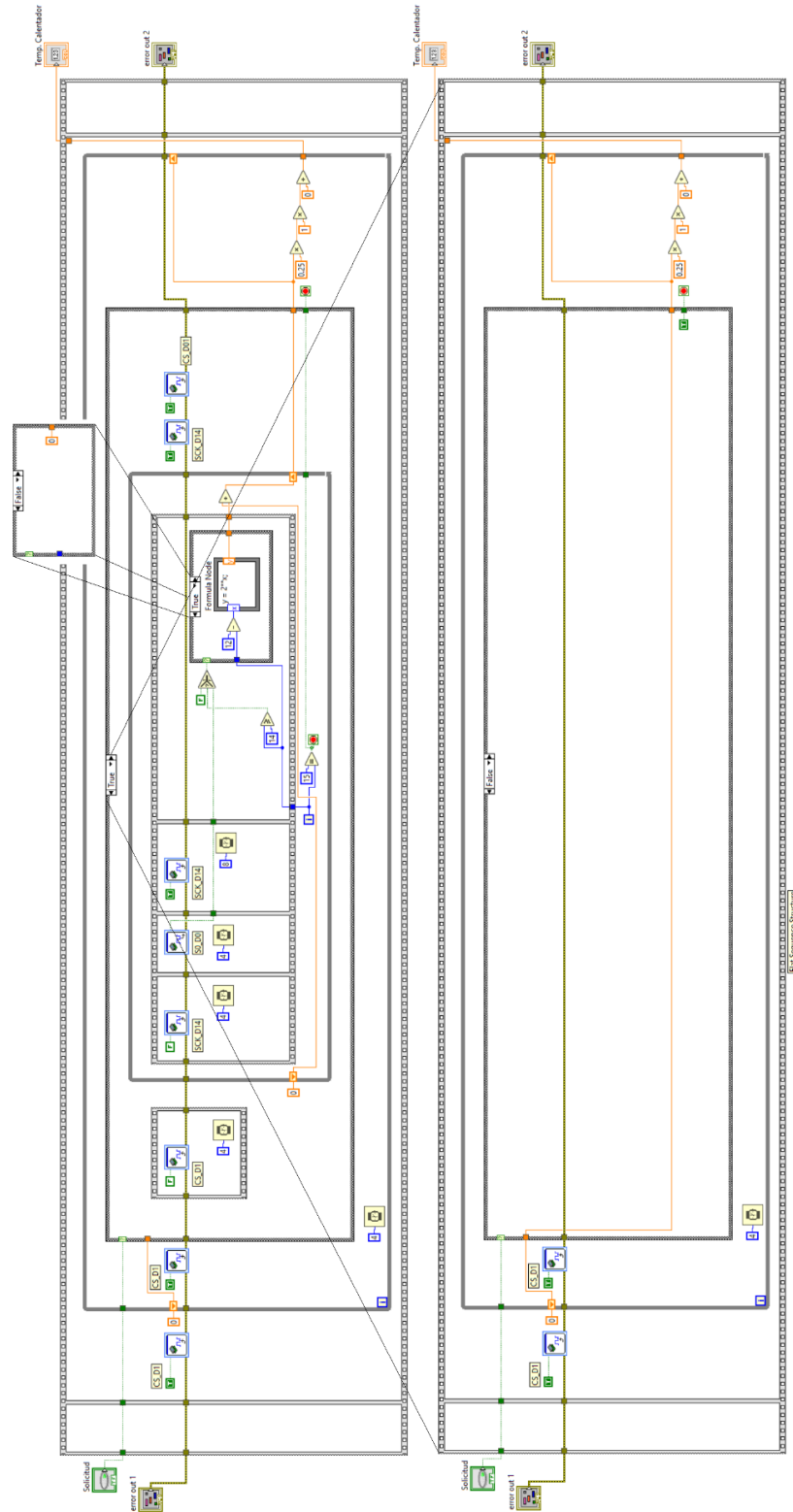
- Engines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1): 1–38.
- Tlili, Iskander, and Sa’ed A. Musmar. 2013a. “Thermodynamic Evaluation of a Second Order Simulation for Yoke Ross Stirling Engine.” *Energy Conversion and Management* 68: 149–60.
- . 2013b. “Thermodynamic Evaluation of a Second Order Simulation for Yoke Ross Stirling Engine.” *Energy Conversion and Management* 68: 149–60.
- Urieli, Israel. 1977. PhD Thesis “A Computer Simulation of Stirling Cycle Machines.” PhD Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
- Walker, Graham. 1980. *Stirling Engines*. Oxford University Press, New York, NY. <https://www.osti.gov/biblio/6710046> (March 9, 2019).
- Walker, Graham, and J. Senft. 1985. *12 Free Piston Stirling Engines*. New York: Springer-Verlag.
- Weenen, Van. 1979. “Phase-Angle Controller for Stirling Engines.”
- West, Colin. 1986. *Principles and Applications of Stirling Engines*. 1 edition. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Winkelmann, Anna, and Eric John Barth. 2016. “Design, Modeling, and Experimental Validation of a Stirling Pressurizer with a Controlled Displacer Piston.” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 21(3): 1754–64.
- Zare, Sh, A. R. Tavakolpour-Saleh, and T. Binazadeh. 2019. “Passivity Based-Control Technique Incorporating Genetic Algorithm for Design of a Free Piston Stirling Engine.” *Renewable Energy Focus* 28(00): 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.11.003>.

Apéndice

A.1 Artículos y memorias

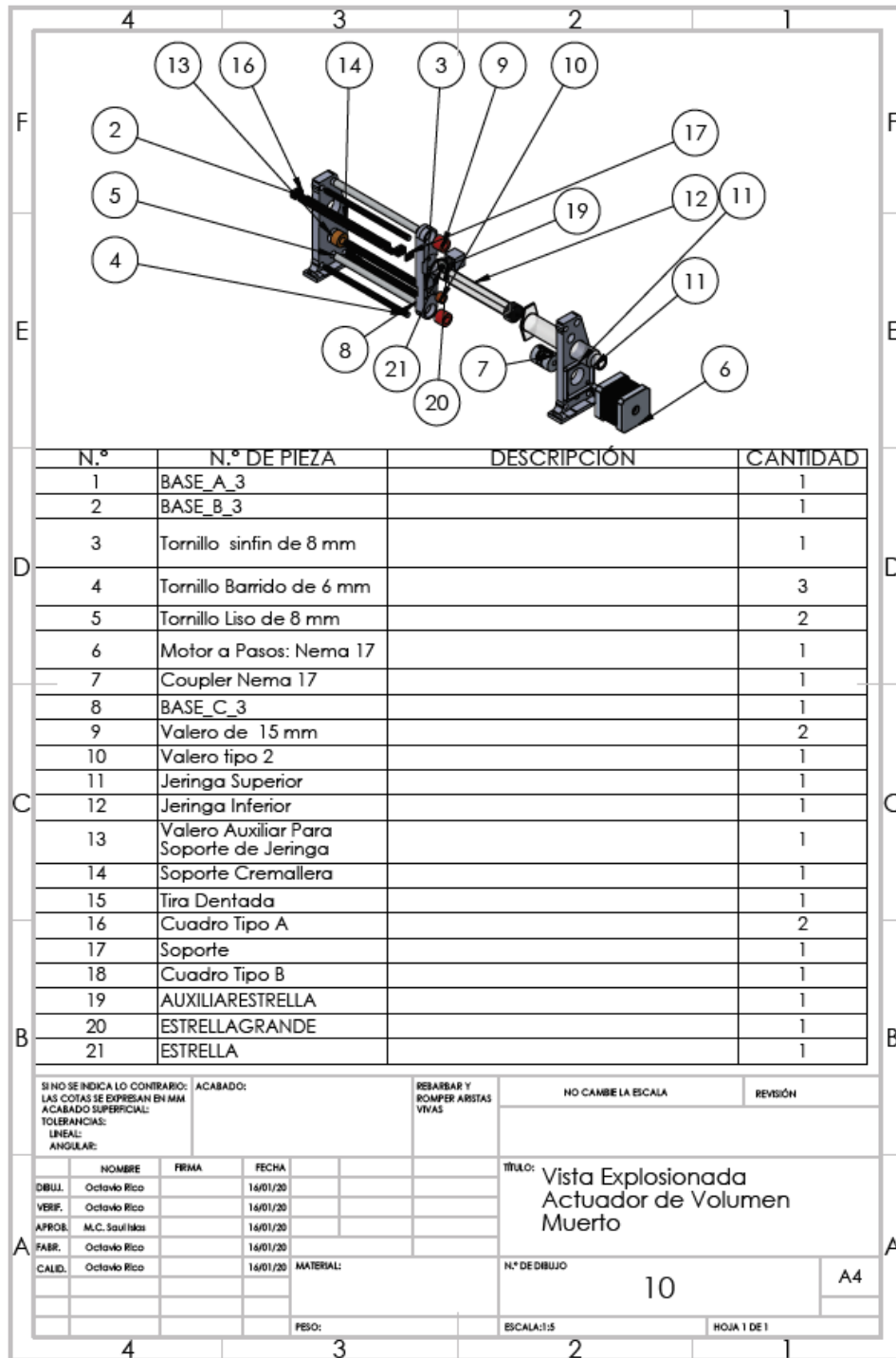
- ELSEVIER
Quartyl: Q1
CiteScore:5.24 **Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids.**, Solar Energy, J.A. Aguilar-Jiménez, N. Velázquez, A. Acuna, R. Cota, E. González, L. González, R. López, S. Islas, CEENER, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.078>
- ELSEVIER
Quartyl: Q1
CiteScore:3.83 **A novel LiBr/H₂O absorption cooling and desalination system with three pressure levels.**, International Journal of Refrigeration, R. López-Zavala, N. Velázquez-Limón, L.A. González-Uribe, J.A. Aguilar-Jiménez, J. Alvarez-Mancilla, A. Acuna, S. Islas., CEENER, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.003>
- ELSEVIER
Quartyl: Q1
CiteScore:7.01 **Absorption cooling and desalination system with a novel internal energetic and mass integration that increases capacity and efficiency.**, Desalination, R. López-Zavala, N. Velázquez-Limón, L.A. González-Uribe, K.M. Quezada-Espinoza, J.A. Aguilar-Jiménez, S. Islas, M. Nakasima-López, E. González, CEENER, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114144>
- ELSEVIER
Quartyl: Q1
CiteScore:4.05 **A numerical study of the influence of design variable interactions on the performance of a Stirling engine System.**, Applied Thermal Engineering, Saúl Islas, Ricardo Beltran-Chacon, Nicolás Velázquez, Daniel Leal-Chávez, R.López-Zavala ,J. A. Aguilar-Jiménez, CEENER 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115039>
- ELSEVIER
Quartyl: Q1
CiteScore:3.83 **Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico.**, International Journal of Refrigeration, J. A. Aguilar-Jiménez, N. Velázquez-Limón, R. López-Zavala, L. A. González-Uribe, S. Islas, R. Beltrán. CEENER 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.12.010>
- MDPI
Quartyl:
CiteScore: **Design and Analysis of the Domestic Micro-Cogeneration Potential for an ORC System Adapted to a Solar Domestic Hot Water System.**, Entropy, Daniel Leal-Chavez, Ricardo Beltran-Chacon, Paola Cardenas-Terrazas, Saúl Islas, Nicolás Velázquez. CIMAV 2019.
<https://doi:10.3390/e2109091>

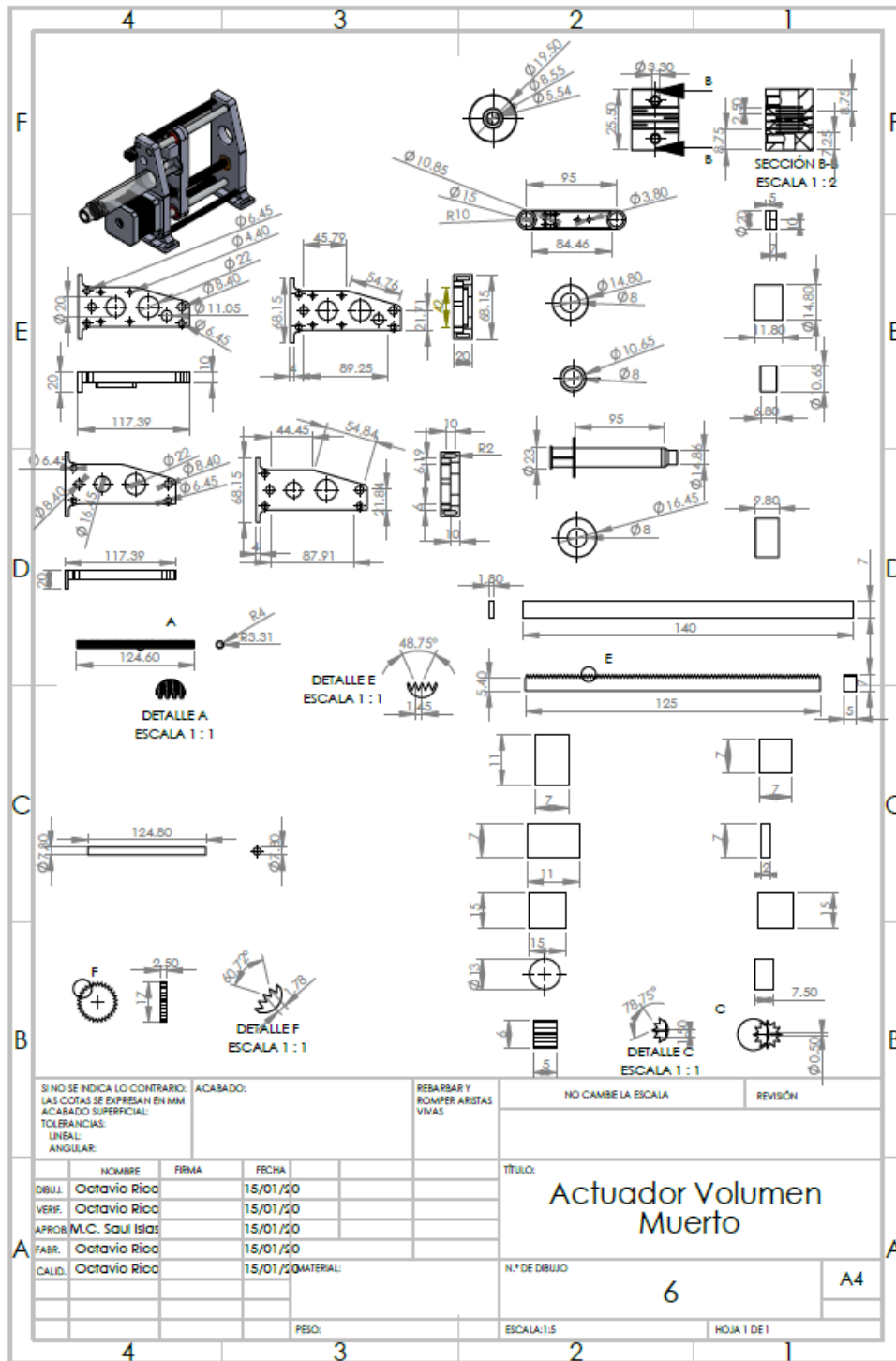
A.2. Adaptación de max6675 a LabVIEW

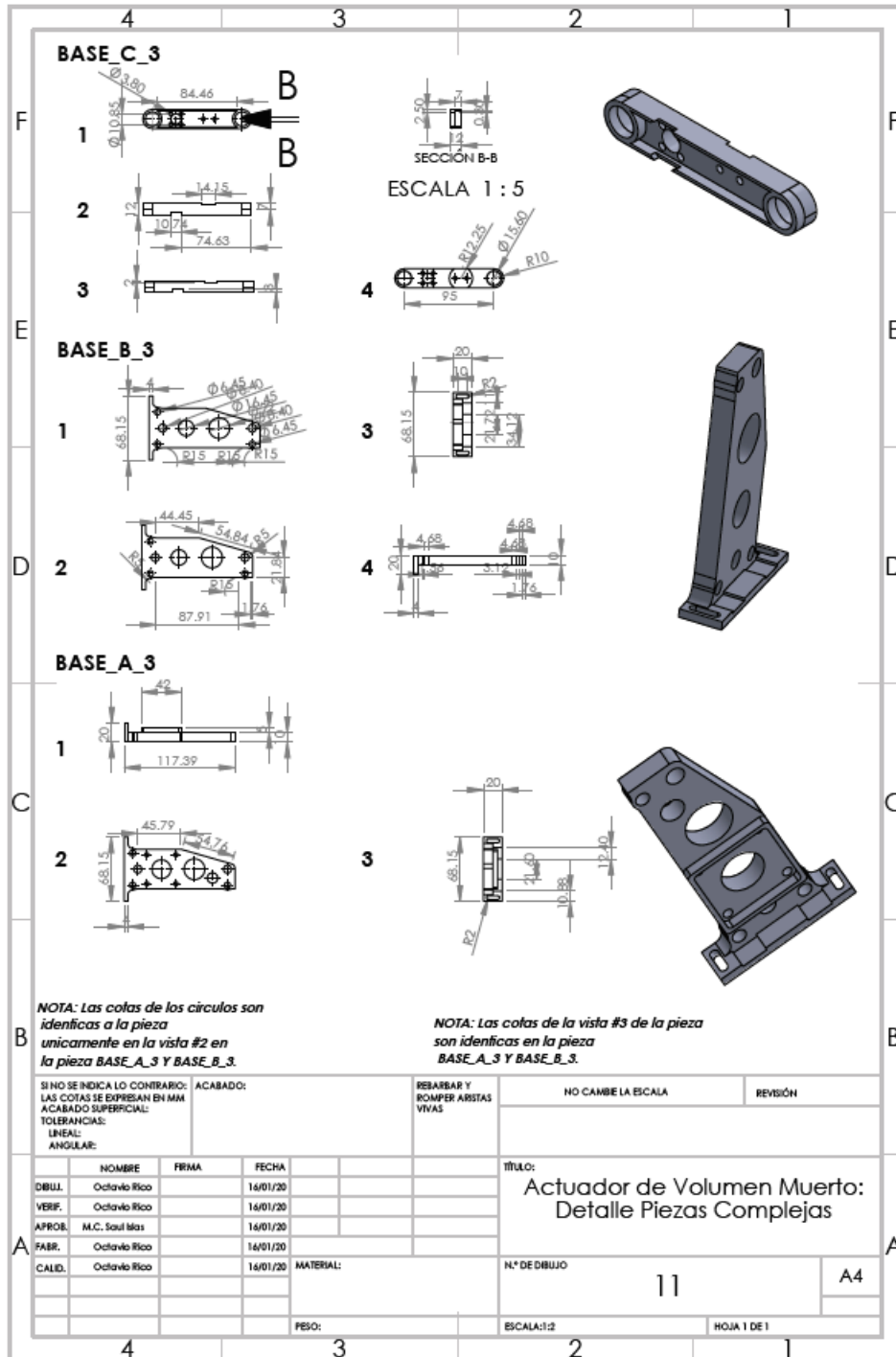


A.3 Planos de los componentes

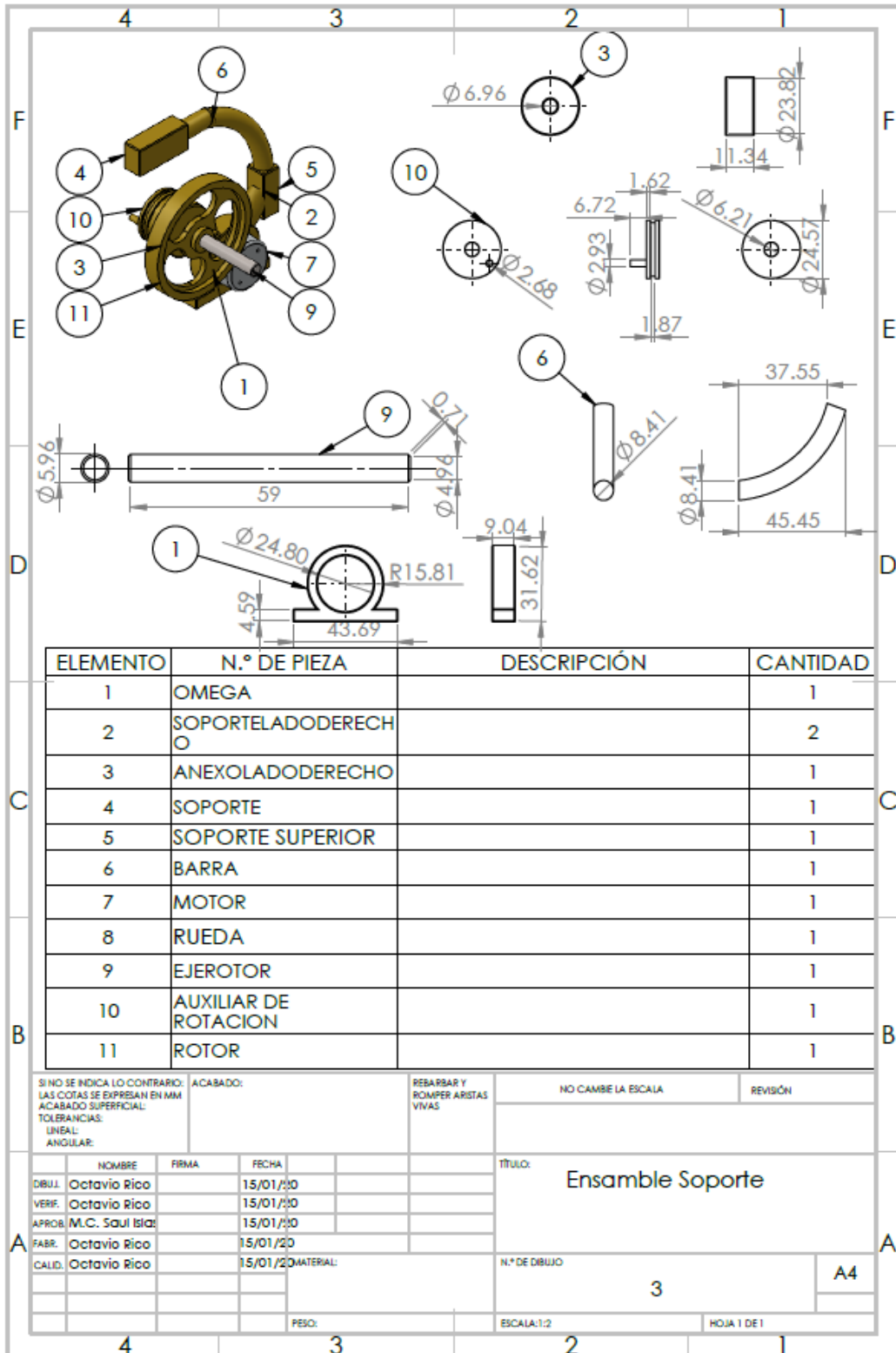
Actuador de volumen muestra

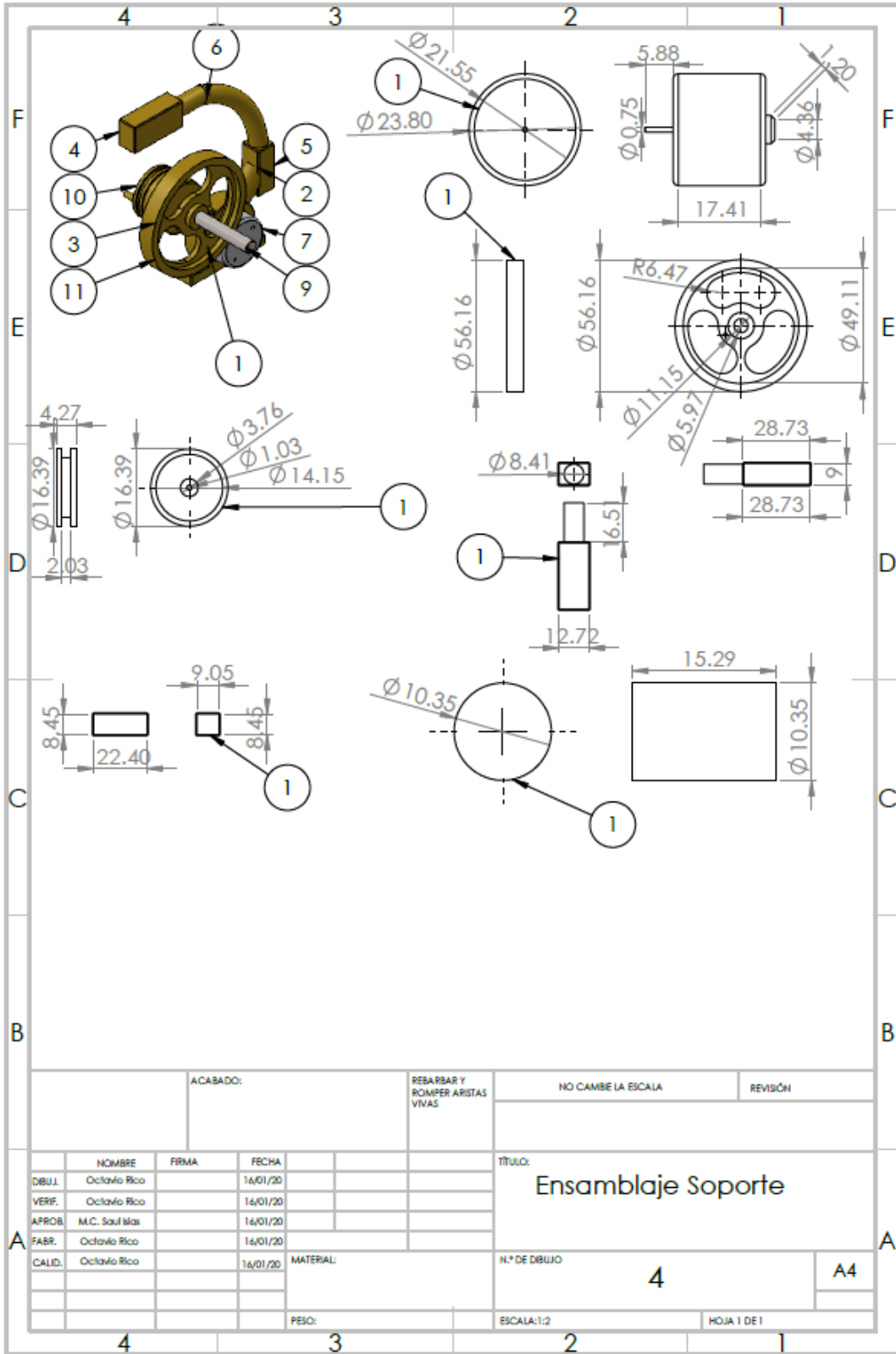




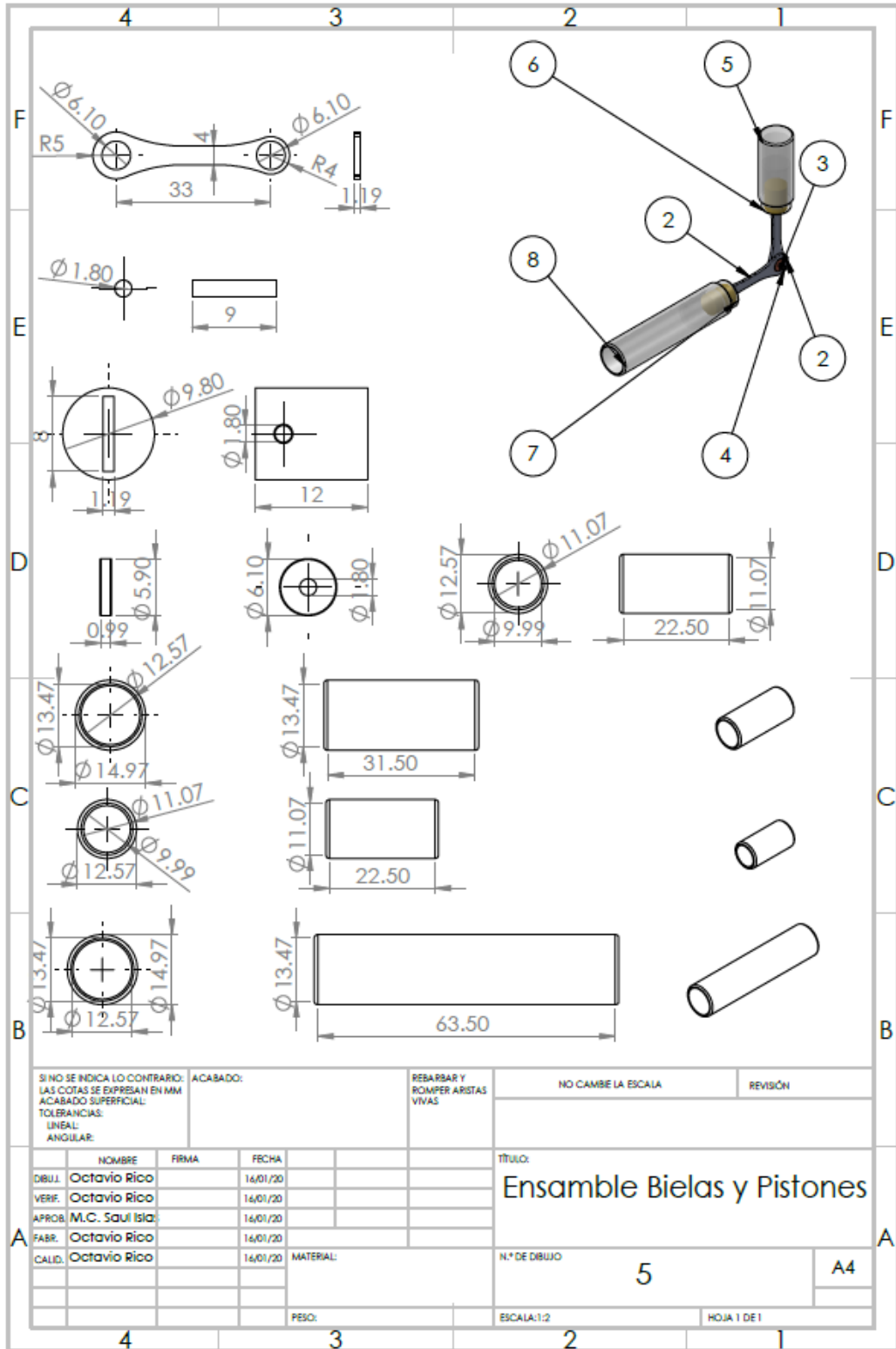


Motor Stirling





ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ. Octavio Rico</td> <td></td> <td>16/01/20</td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF. Octavio Rico</td> <td></td> <td>16/01/20</td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB. M.C. Saul Blas</td> <td></td> <td>16/01/20</td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR. Octavio Rico</td> <td></td> <td>16/01/20</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID. Octavio Rico</td> <td></td> <td>16/01/20</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA		DIBUJ. Octavio Rico		16/01/20		VERIF. Octavio Rico		16/01/20		APROB. M.C. Saul Blas		16/01/20		FABR. Octavio Rico		16/01/20		CALID. Octavio Rico		16/01/20		TÍTULO: Ensamblaje Soporte			
NOMBRE	FIRMA	FECHA																													
DIBUJ. Octavio Rico		16/01/20																													
VERIF. Octavio Rico		16/01/20																													
APROB. M.C. Saul Blas		16/01/20																													
FABR. Octavio Rico		16/01/20																													
CALID. Octavio Rico		16/01/20																													
MATERIAL:				N° DE DIBUJO 4		A4																									
PESO:				ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1																									



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:
 REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

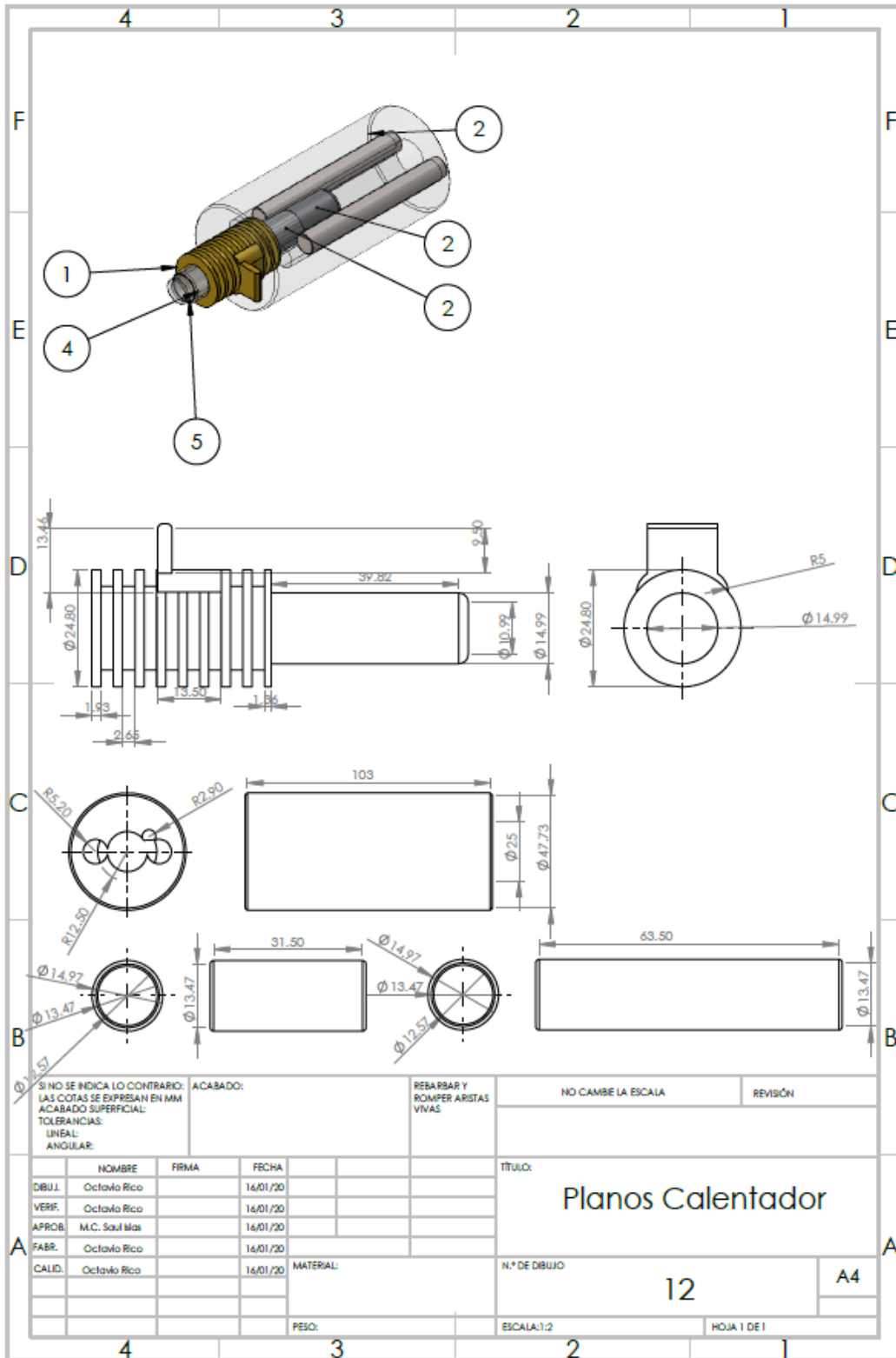
NO CAMBE LA ESCALA REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Octavio Rico		16/01/20
VERIF.	Octavio Rico		16/01/20
APROB.	M.C. Saul Isla		16/01/20
FABR.	Octavio Rico		16/01/20
CALID.	Octavio Rico		16/01/20

TÍTULO:
Ensamble Bielas y Pistones

N.º DE DIBUJO: **5**
 ESCALA: 1:2
 HOJA 1 DE 1

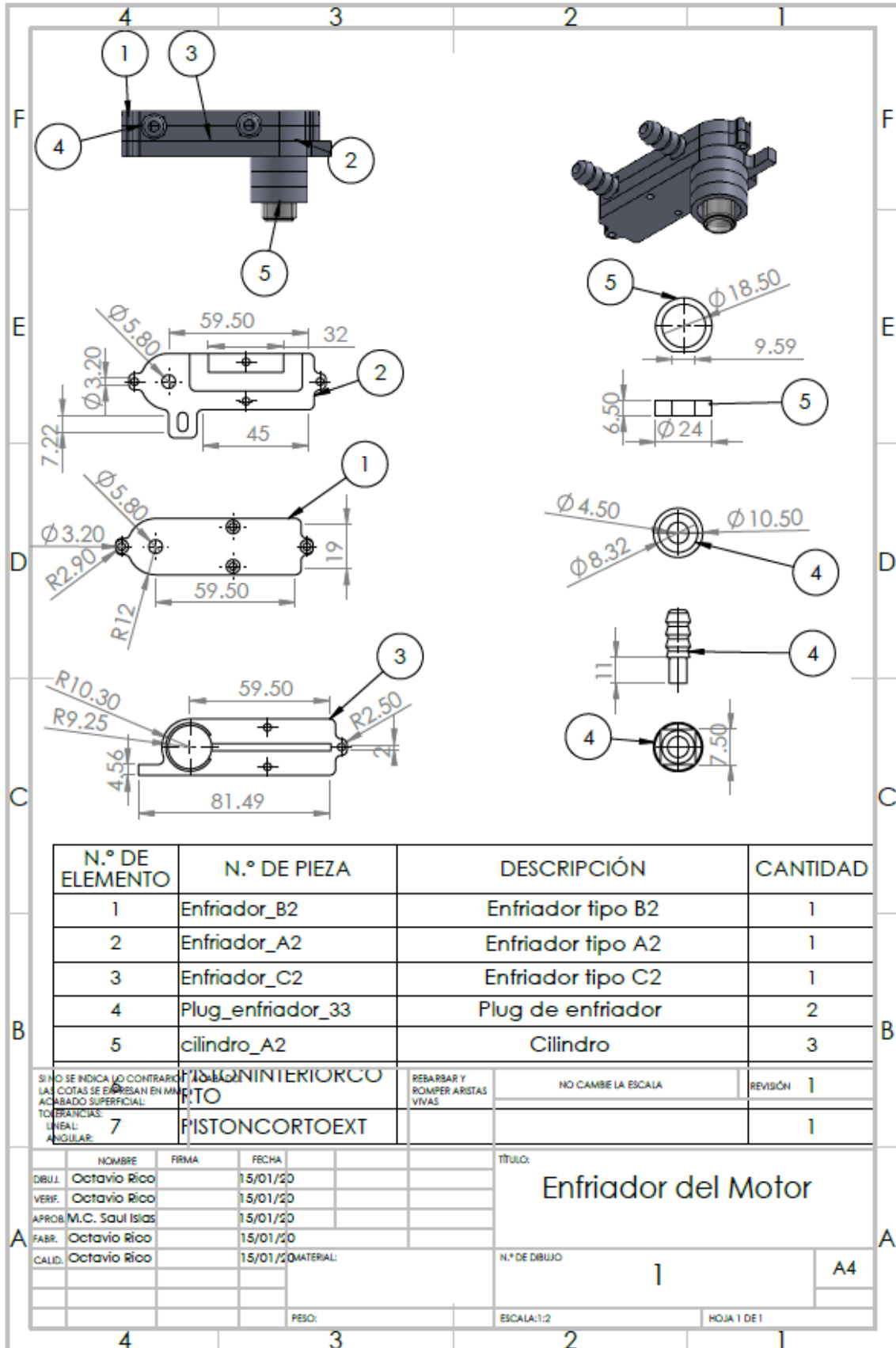
Calentador del motor Stirling



Enfriador del motor Stirling

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Enfriador_B2	Enfriador tipo B2	1
2	Enfriador_A2	Enfriador tipo A2	1
3	Enfriador_C2	Enfriador tipo C2	1
4	Plug_enfriador_33	Plug auxiliar de manguera	2
5	cilindro_A2	Cilindro tipo A2	3
6	PISTONINTERIORCORT	Piston interior	1
7	PISTONCORTOEXT	Piston Exterior	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	RESARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: Vista Explosionada de Enfriador del Motor		
DIBUJ. Octavio Rico		16/01/20	N.º DE DIBUJO 8 A4		
VERIF. Octavio Rico		16/01/20			
APROB. M.C. Saul Iba		16/01/20			
FABR. Octavio Rico		16/01/20			
CALID. Octavio Rico		16/01/20	MATERIAL:	ESCALA:1:5	
PESO:			HOJA 1 DE 1		



Enfriador Externo (auxiliar)

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Enfriador_TOP_22	Placa superior de enfriador	2
2	Plug_enfriador_33	Plugs auxiliares de manguera	2
3	ENFRIADORRADIADO R	Placa con canales para flujo de liquido	2
4	Ventilador	Ventilador	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLEBAS/CIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
VERIF.	Octavio Rico		16/01/20	Vista Explosionada Enfriador Exterior Auxiliar	
APROB.	Octavio Rico		16/01/20		
FABR.	M.C. Saul Blas		16/01/20		
CALID.	Octavio Rico		16/01/20		
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO		A4
PESO:			9		
ESCALA: 1:5			HOJA 1 DE 1		

