

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

MAESTRIA EN FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Diseño de un sistema de concentración solar de canal
parabólico para la generación de calor de proceso

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN FUENTES
RENOVABLES DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

PRESENTA

IRVING ELEAZAR PÉREZ MONTES

Director de tesis

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera

México, D.F. Agosto 2014

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

UACM3 TDV272

Dedico esta obra a todos mis hermanos latinoamericanos, porque desde el comienzo enfrentamos carencias para satisfacer nuestras necesidades más elementales, con el anhelo de que los conocimientos y técnicas presentadas, sirvan para mejorar nuestras condiciones de vida y disfrutemos de los recursos naturales que por derecho histórico nos pertenecen.

A todos los científicos, ingenieros, maestros y tecnólogos que han forjado las bases del desarrollo de las tecnologías limpias y que luchan por el cambio hacia el uso de las fuentes renovables de energía, con el fin de construir un futuro más sustentable y más justo.

A la memoria de mi abuelo Eleazar y para honrar a mi abuelo José quien siempre ha representado un ejemplo de lucha incansable.

A la memoria de mi gran amigo Biólogo Miguel Ángel Blanco Becerril, nuestro pacto de contribuir a la mejora de nuestro entorno sigue en pie, siendo este un paso importante para lograrlo... tu luz sigue viva.

“Nosotros iremos hacia el Sol de la libertad o hacia la muerte; y si morimos, nuestra causa seguirá viviendo. Otros nos seguirán”

Augusto César Sandino

AGRADECIMIENTOS

Esta obra es un sueño cumplido del autor; que no habría sido posible sin el apoyo de todas y cada una de las personas e instituciones que a continuación se enuncian, y a las que estoy profundamente agradecido:

A mi madre; por darme la oportunidad de vivir y por inculcarme todos los valores que me han convertido en el hombre que soy, tu amor incondicional ha sido el elemento clave para fraguar los pilares de mi ser, tu vida es un ejemplo de lucha constante y para honrarte te dedico todos mis logros . . . te amaré eternamente.

A mi padre, porque me orientaste a descubrir mi vocación de Ingeniero que me ayudó a tomar sin duda la decisión más importante de mi vida; a mis hermanos, por creer en mi y tenderme su mano en todo momento; a mis tías Vero, Ceci y Ruty, que desde siempre nos han apoyado para salir adelante.

A mis mejores amigos Arturo y Mercedes, por todo el apoyo que me han brindado en los momentos más difíciles, así como por compartir innumerables momentos de alegría.

A mis profesores de la U.A.C.M., y en especial al Dr. Álvaro E. Lentz Herrera, quien nos ha brindado su apoyo y confianza para emprender diversos proyectos.

A Claudia Chávez, quien desde siempre ha apoyado a todos los alumnos de la Maestría en Fuentes Renovables de Energía y Eficiencia Energética de la UACM.

A todo el personal del Laboratorio de Pruebas de Materiales del I.P.N., por su trabajo en la realización y validación de las pruebas mecánicas.

A los estudiantes que colaboraron en cada una de las fases del proyecto: Omar, Gloria, Emanuel, Sdai, Felipe, Roxana y Jaciel; su trabajo de excelencia ha sido fundamental para culminar de manera exitosa las metas planteadas.

Agradezco al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF), por el apoyo económico para la realización de este trabajo de alto nivel tecnológico.

Finalmente agradezco a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), por haberme permitido ser parte de su proyecto educativo y también por el apoyo recibido para la impresión y empastado de este trabajo de Tesis.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del proceso de diseño de un Sistema Termosolar de Concentración de Canal Parabólico (STCCP), para su aplicación en la producción de calor de proceso.

La implementación de una serie de innovaciones en la geometría estructural de un módulo Micro Concentrador Solar de Canal Parabólico (MCCP), la selección de materiales y la adopción de nuevos procesos de fabricación, permite un montaje rápido en el lugar de instalación y la reducción de los costos de producción y mantenimiento.

Basándose en la experiencia adquirida por las principales empresas a nivel mundial en la fabricación de MCCP, se identifican una serie de requerimientos de diseño que permiten hacer mejoras en el arreglo estructural de un MCCP, obteniendo una eficiencia óptica aceptable a través de la selección de materiales con mejores características de resistencia / peso y rigidez / peso.

Adicionalmente, la propuesta estructural del módulo MCCP permite implementar un novedoso sistema de movimiento de bajo consumo de energía y de alta precisión en el posicionamiento angular.

Por medio de un sistema de control y adquisición de datos basado en un Controlador Lógico Programable (PLC), es posible manipular y registrar las variables como temperatura, posición angular, flujo de agua. El empleo de un PLC también garantiza las condiciones de incidencia de la radiación solar sobre el receptor y registrar todas las variables involucrados en el sistema.

En resumen todas las mejoras conseguidas en el proceso de diseño, permiten reducir los costos de logística materia prima y mano de obra de un STCCP, así como reducir los tiempos de implementación.

Palabras clave: Modulo Micro Concentrador Solar de Canal Parabólico (MCCP), Calor de Proceso, Sistema de Movimiento, Controlador Lógico Programable.



ABSTRACT

In this work we present the results of the design process of a Parabolic Trough Solar Collector for a Thermal System (STCCP) , for use in the production of process heat .

The implementation of a number of innovations in the structural geometry of a Micro Parabolic Trough Solar Collector module (MCCP), as well as the selection of materials and the integration of new manufacturing processes, enables quick assembly on installation site and a reduction on the production and maintenance costs.

Based on the experience of the leading companies worldwide in the manufacture of MCCP, we identify a variety of design requirements that allow improvements in the structural arrangement of a MCCP. These requirements lead to obtain acceptable optical efficiency through the selection of materials with better characteristics of strength / weight and stiffness / weight.

Additionally , the proposed structural MCCP module, allows to implementing a new movement's system of low energy consumption and high precision angular positioning.

By means of a control system and data acquisition based on a Programmable Logic Controller (PLC), it is possible to manipulating and recording variables such as temperature, angular position, water flow. This provides to better survey of the conditions of incidence of solar radiation on the receiver and to record all the variables involved in the system.

Finally, all the improvements in the design can reduce costs in logistics, raw material and labor of a STCCP as well as implementation time.

Keywords: Micro Parabolic Trough Solar Concentrator, Process Heat, Motion System, Programmable Logic Controller.



TABLA DE CONTENIDO

i RESUMEN

ii ABSTRACT

iii TABLA DE CONTENIDO

iv ÍNDICE DE CAPÍTULOS

v ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS

vi ÍNDICE DE FIGURAS

ix SIMBOLOGÍA

xii OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

	PÁG.	
I	ESTADO DEL ARTE	
	1.1 SISTEMAS TERMOSOLARES DE CONCENTRACIÓN	2
	1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO	4
	1.3 TECNOLOGÍAS DE MCCP EN EL MERCADO GLOBAL	11
	1.4 NORMALIZACIÓN Y ESTÁNDARES	15
II	PROPUESTA DE DISEÑO	
	2.1 METODOLOGIA DE DISEÑO	18
	2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS	22
	2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR	29
	2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO	36
	2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO	48
	2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL	54
	2.7 SUBSISTEMA ELÉCTRICO	68
III	CONFIGURACIÓN DEL DISEÑO	
	3.1 MODULO MICRO CONCENTRADOR DE CANAL PARABÓLICO (MCCP)	71
	3.2 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO	74
	3.3 SUBSISTEMA HIDRÁULICO	76
	3.4 SUBSISTEMA DE CONTROL Y ELÉCTRICO	77
IV	RESULTADOS	
	4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO	79
	4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
V	CONCLUSIONES	
	5.1 CONCLUSIONES	102
	5.2 TRABAJOS FUTUROS	103
VI	BIBLIOGRAFIA	104
VII	ANEXOS	
	7.1 PLANOS PRE-CONSTRUCTIVOS DEL MCCP	107
	7.2 INGENIERÍA DETALLADA DEL SUBSISTEMA DE CONTROL	110
	7.3 MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA REPÚBLICA MEXICANA	113

TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Empresas y características de MCCP más destacados en el mercado de U.S.A.	11
Tabla 1.2. Empresas y características de MCCP más destacados en Francia y Suecia.	12
Tabla 1.3. Empresas y características de MCCP más destacados en Alemania, Italia y Suiza.	13
Tabla 1.4. Empresas y características de MCCP más destacados en Canadá y México.	14
Tabla 2.1. Resumen de elementos principales que integran el subsistema hidráulico.	53
Tabla 2.2. Elementos y componentes principales del subsistema de control.	55
Tabla 2.3. Procesos principales del STCCP.	56
Tabla 2.4. Mandos de la HMI.	56
Tabla 2.5 Alarmas del STCCP.	56
Tabla 2.6. Registro de variables en la memoria de PLC.	57
Tabla 2.7. Visualización de variables en el Panel Touch.	57
Tabla 2.8. Visualización de estado de actuadores.	57

GRÁFICAS

Gráfica 2.1. Perfil de descarga intermitente con alta demanda de agua caliente.	25
Gráfica 2.2. Perfil de descarga continua con baja demanda de agua caliente.	25
Gráfica 2.3. Perfil parabólico 2D del módulo MCCP resultado de la simulación en MATLAB.	35
Gráfica 2.4. Temperatura dentro del termotanque TD, resultado de la simulación en MATLAB.	35
Gráfica 2.5. Curvas de seguimiento solar de un módulo MCCP con eje de giro en la dirección (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur.	38
Gráfica 2.6. Comportamiento y esquema de una bomba para recirculación de agua caliente.	52
Gráfica 4.1. Temperaturas en grados Celsius alcanzadas en el termotanque, los puntos trazados corresponden al promedio por hora.	97
Gráfica 4.2. Radiación solar incidente sobre el plano recto de la parábola (a) En la escala de tiempo de la hora local para la Ciudad de México (b) Comparada con su curva aproximada de sexto orden.	98
Gráfica 4.3. Ángulos solares (a) Ángulo Azimutal (b) Ángulo Zenital (c) Posición angular del reflector leída por el encóder incremental.	99

	Pág.
Figura 1.1. Colectores solares (a) tipo placa plana convencional (b) tipo concentrador solar de canal parabólico.	2
Figura 1.2. Concentradores solares tipo (a) canal parabólico, (b) disco parabólico, (c) tipo fresnel lineal, (d) tipo torre central.	3
Figura 1.3. Primeros Colectores Solares Modernos (a) Oxición de Agustín Mouchot, presentado por primera vez en la Exposición Universal de París de 1878, (b) Imprenta operada por Abel Pifre e impulsada a vapor generado por energía solar en el Jardín de las Tullerías en París en 1882. Grabados de la Époque.	4
Figura 1.4. Colector Solar Parabólico de John Ericsson.	5
Figura 1.5. Horno solar construido por Himalaya.	5
Figura 1.6. Parte de la patente del diseño sobre colectores parabólicos Maier y Remshard.	5
Figura 1.7. Concentradores Solares de Canal Parabólico de Shuman, en Meadi, Egipto.	6
Figura 1.8. Concentradores Solares del Solar Energy Generating System (SEGS), ubicado en Kramer Junction, Mojave California, USA.	7
Figura 1.9. Concentradores Solares del EuroTrough, ubicado en Almería, España.	8
Figura 1.10. A nivel Mundial 2 GW instalados para Octubre del 2012.	9
Figura 1.11. Principio de funcionamiento y partes componentes del Módulo Concentrador Solar de Canal Parabólico (MCCP)	10
Figura 1.12. El seguimiento del sol puede ser estacional (eje de giro Este-Oeste) o cotidiano (eje de giro Norte-Sur), alineando el CCP de manera perpendicular a los rayos solares.	10
Figura 2.1. Ingeniería de Sistemas (IS) en el contexto del Manejo de Proyectos (PM).	18
Figura 2.2. Procesos técnicos del diseño y elaboración de sistemas en base a la metodología Ingeniería de Sistemas.	19
Figura 2.3. Secuencia y jerarquía para la definición de requerimientos.	20
Figura 2.4. El Proceso V, es la guía para implementar y verificar los sistemas.	21
Figura 2.5. Clasificaciones de un Sistema Termosolar de Calentamiento (STC).	23
Figura 2.6. Operación: (a) Configuración Activa Directa (b) Configuración Activa Indirecta de un STC.	24
Figura 2.7. Diagrama conceptual de los subsistemas del STCCP.	26
Figura 2.8. Herramienta desarrollada en MATLAB utilizada para el diseño del STCCP.	26
Figura 2.9. Elementos que intervienen en la operación del STCCP.	27
Figura 2.10. Parámetros de operación del STCCP en la herramienta de MATLAB.	27
Figura 2.11. Configuración de las Condiciones Ambientales.	28
Figura 2.12. Diagrama conceptual de los elementos del módulo MCCP.	29
Figura 2.13. Subsistema MCCP y sus elementos básicos.	29
Figura 2.14. Componentes de una parábola.	30
Figura 2.15. Angulo de borde de la parábola.	30
Figura 2.16. Componentes del elemento Reflector	31
Figura 2.17. Configuración del módulo MCCP en la herramienta de MATLAB.	31

	Pág.
Figura 2.18. Balance energético del STCCP.	33
Figura 2.19 Comandos para cálculos del STCCP.	34
Figura 2.20. Perfil parabólico 3D del módulo MCCP resultado de la simulación en MATLAB.	34
Figura 2.21. Diagrama conceptual de los elementos del subsistema de movimiento.	36
Figura 2.22. Ejemplos de elementos que componen al subsistema de movimiento (a) Actuador: Motorreductor, (b) Mecanismo transmisor de movimiento: tren de engranes.	36
Figura 2.23. Instalación de un módulo MCCP con eje de giro en la dirección (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur.	37
Figura 2.24. Opciones de mecanismos de transmisión de movimiento para el posicionamiento del módulo MCCP. (a) Sinfin-corona, (b) Biela-manivela, (c) Tren de engranes, (d) Bandas y poleas síncronas, (e) Mecanismo de 4 barras, (f) Bandas y poleas asíncronas.	39
Figura 2.25. Bosquejo de la integración del reflector con la base y el subsistema de movimiento.	42
Figura 2.26. Diagrama conceptual detallado del subsistema de movimiento.	42
Figura 2.27. Plano del subsistema de movimiento.	47
Figura 2.28. Diagrama conceptual de los elementos del subsistema hidráulico.	48
Figura 2.29. Bosquejo del diseño de termotanque.	49
Figura 2.30. Imágenes de válvulas utilizadas en el subsistema hidráulico del STCCP.	50
Figura 2.31. Imagen de una tubería polimérica que cumple con los requerimientos del subsistema hidráulico.	51
Figura 2.32. Diagrama conceptual de los elementos del subsistema de Control.	54
Figura 2.33. Diagrama esquemático del STCCP en su configuración alta demanda y descarga intermitente.	55
Figura 2.34. Sensores de nivel: (a) Tipo flotador, (b) Tipo electronivel.	58
Figura 2.35. Sensores de nivel: (a) Tipo capacitivo, (b) Tipo ultrasónico.	59
Figura 2.36. Imágenes de válvulas utilizadas en el lazo de control de nivel (lazo 1) del subsistema de control.	60
Figura 2.37. Diagrama de lazo de control de la variable nivel.	61
Figura 2.38. Imágenes de sensores de temperatura (a) Termopar de montaje en abrazadera (b) TRD con carátula, (c) Termistor, (d) Circuito Integrado.	63
Figura 2.39. Imágenes diversos elementos de control (a) Bomba recirculadora, (b) Válvula manual reguladora de flujo, (c) Sensor de flujo volumétrico.	63
Figura 2.40. Diagrama de lazo de control de la variable temperatura.	64
Figura 2.41. Sensor de posición solar de elementos foto-sensibles.	65
Figura 2.42. Imágenes de elementos del lazo de control de posición (a) Encóder tipo incremental, (b) Drive para motor de corriente directa, (c) Motorreductor.	66
Figura 2.43. Diagrama de lazo de control de la variable posición angular.	67
Figura 2.44. Diagrama conceptual de los elementos del subsistema Eléctrico.	68
Figura 2.45. Imágenes de elementos del subsistema eléctrico (a) Interruptor termomagnético, (b) Fusible.	69
Figura 3.1. Modelo tridimensional detallado de la propuesta seleccionada del módulo MCCP.	71
Figura 3.2. Modelo tridimensional detallado de las bases estructurales del MCCP.	72

	Pág.
Figura 3.3. Modelo tridimensional detallado del reflector del MCCP.	73
Figura 3.4. Modelo en CAD del subsistema de movimiento	74
Figura 3.5. Modelos 3D en CAD del MCCP con posicionamiento angular.	75
Figura 3.6. Diagrama del subsistema hidráulico.	76
Figura 3.7. Diagrama del subsistema de control.	77
Figura 4.1. Modelo tridimensional de la propuesta modificada del MCCP.	79
Figura 4.2. Subsistema MCCP instalado en sitio.	80
Figura 4.3. Ensamble de los paneles en el colector solar. a) – c) Ubicación del soporte del colector solar. d) – f) Colocación de los reflectores solares el marco. g) – i) Instalación del marco reflector en el soporte. j) – l) Calibración y orientación del colector solar. (Gallegos, D., Hernández, H., Jinés, J.A., Torres, M., 2013).	81
Figura 4.4. Metodología de correlación de imágenes numéricas. (a) Esquema general del equipo utilizado. (b) Arreglo de cámaras CCD y el MCCP. (c) Sección de superficie reflectiva con puntos de vinil adhesivo.	82
Figura 4.5. Resultado del análisis de deformación de la superficie reflectora. (a) Localización de las zonas de mayor y menos desviación en dirección focal. (b) Mapa térmico del panel solar al zenit mediante una aproximación de cuarto orden de los datos térmicos experimentales.	83
Figura 4.6. Línea de luz solar concentrada (a) Sobre una superficie de prueba. (b) Sobre el tubo receptor.	84
Figura 4.7. Subsistema de movimiento montado en el MCCP.	85
Figura 4.8. Funcionamiento del subsistema de movimiento.	86
Figura 4.9. Termotanque instalado en sitio.	87
Figura 4.10. Elementos en detalle del subsistema hidráulico instalados en sitio.	88
Figura 4.11. Instrumentación del MCCP (a) Montaje en el MCCP, (b) Piranómetro montado en el MCCP, (c) Seguidor solar, (d) Encoder Incremental, (d) Termopar montado en la entrada del MCCP.	89
Figura 4.12. Instrumentación del Termotanque (a) Montaje en el Termotanque, (b) Manómetro de Carátula, (c) Sonda de Nivel, (d) Termómetro de Carátula, (d) Termopar, (f) Medidor de Flujo.	90
Figura 4.13. Elementos del subsistema de control. (a) PLC SIEMENS S7-1200 (b) Panel táctil para configuración.	91
Figura 4.14. Gabinete de control. (a) Parte frontal (b) Botones de arranque y paro y paro de emergencia (c) Panel táctil (d) Alarma de eventos (e) PLC y tarjeta termopares (f) Transductores, Relés y Drives (g) Protecciones eléctricas.	92
Figura 4.15. Interfaz del SIMATIC Web Server de SIEMENS.	93
Figura 4.16. Función NREL-SPA-SIEMENS. (a) Pantalla de configuración en el panel de proceso de la función NREL-SPA-SIEMENS. (b) Diagrama de referencia para los vectores de la función NREL-SPA-SIEMENS.	94
Figura 4.17. Componentes de la red eléctrica (a) Gabinete de conexión, ductos de protección para conductores y cables para conexión de equipos (b) Fuente de alimentación y bornes de conexión.	95
Figura 4.18. Componentes del subsistema eléctrico. (a) Fusibles para señales de campo y fusibles para actuadores. (b) Interruptores termomagnéticos para alimentación principal y para secciones.	96

α	Absortividad del aborbedor [%].
A_a	Área de apertura del módulo MCCP, [m ²].
AC	Ángulo de contacto entre polea y banda, [°].
A_r	Área desarrollada por el receptor, específicamente por el absorbedor, [m ²].
BAUE	Beneficio Anual Equivalente de una Inversión.
CAD	Diseño Asistido por Computadora (Computer Aided Design).
CCP	Concentrador Solar de Canal Parabólico.
CCD	Cámara con Dispositivo de Carga Acoplada.
CDIN	Correlación Digital de Imágenes Numéricas.
CDR	Revisión Crítica del Diseño (Critical Design Review).
d	Diámetro de paso de la polea menor, [m].
d	Diámetro mínimo del árbol de transmisión, [m].
d_{cm}	Distancia del eje de giro al centro de masa, [m].
D	Diámetro de paso de la polea mayor, [m].
DC_c	Corrección de distancia entre centros de las poleas, [m].
DOE	Departamento de Energía de Estados Unidos (Department of Energy).
ϵ	Emitancia del aborbedor [%].
EO	Equinoccio de Otoño.
EP	Equinoccio de Primavera.
f_s	Factor de seguridad.
f_w	Factor de aumento de velocidad, [%].
γ	Pérdidas por errores en el seguimiento de la trayectoria solar, [%].
g	Aceleración de la gravedad, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.
G	Módulo de rigidez del Acero SAE1040, [kg/m ²].
G_d	Radiación solar directa por unidad de área sobre el plano horizontal, [W/m ²].
GW	Gigawatts.
H_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección, [W/m ² K].
I_a	Distancia aproximada entre centros de las poleas sincronas, [m].
J	Momento polar de inercia de la sección transversal del árbol, [m ⁵ /rad s].
K	Kelvin, unidad de medida de temperatura.
kWh	kilowatt - hora (Unidad de energía).
LB_a	Longitud aproximada de la banda, [m].
m	Metros (Unidad de Longitud).
m	Masa del reflector del MCCP, [kg].

MATLAB	Software de Manejo de Matrices (Matrix Laboratory).
MCCP	Micro Concentrador Solar de Canal Parabólico.
M_t	Momento de torsión del árbol, [Nm].
MW	Megawatts.
MWe	Megawatts eléctricos.
\dot{m}	Flujo del fluido extraído del depósito hacia la carga térmica, [kg/s].
η_{optica}	Rendimiento óptico del MCCP, [%].
NASA	Administración Americana de Aeronáutica y Espacio (National Aeronautics and Space Administration).
NPT	Estándar americano de tamaño de conexiones roscadas (National Pipe Threads).
NPT (F)	Rosca interna estándar NPT, conector hembra (NPT Female).
NPT (M)	Rosca externa estándar NPT, conector macho (NPT Male).
NREL	Laboratorio Americano de Energías Renovables (National Renewable Energy Laboratory).
P_1	Potencia de salida en el eje del motor, [W].
P_2	Potencia consumida en la rotación del árbol, [W].
CP	Metodología de Control de Proyectos (Project Control).
PC	Computadora Personal (Personal Computer).
PDR	Revisión Preliminar del Diseño (Preliminar Design Review).
PLC	Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller).
PM	Metodología de Manejo de Proyectos (Project Management).
P_{motor}	Potencia mínima del motorreductor, [W].
P_3	Potencia máxima requerido para mover el reflector del MCCP, [W].
P_{salida}	Potencia de salida del eje del motorreductor, [W].
Q	Par de diseño del actuador, [Nm].
Q_{conv}	Pérdidas de energía por radiación del receptor al ambiente, [J].
Q_d	Radiación directa incidente en el reflector del MCCP, [J].
Q_r	Radiación captada por el receptor, específicamente por el absorbedor, [J].
Q_{rad}	Pérdidas de energía por convección del aire en el receptor. [J].
Q_u	Energía en transferida al fluido desde el receptor en forma de calor, [J].
ρ	Reflectividad del material reflejante de la radiación solar, [%].
ρ_1	Relación de velocidades entre las poleas sincronas.
ρ_2	Relación de velocidades entre la rueda de fricción y el perfil circular del reflector.
R	Radio de la rueda de fricción, [m].
rev	Revoluciones de giro.
R	Radio del perfil circular del reflector. [m].

σ	Constante Universal de Stefan-Boltzmann = $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/K.
IS	Metodología Ingeniería de Sistemas (Systems Engineering).
SEGS	Sistema de Generación Eléctrica Solar.
SFR	Revisión Funcional del Sistema (System Functional Review).
SI	Solsticio de Invierno.
SMN	Sistema Meteorológico Nacional.
SPA	Algoritmo de Posición Solar (Solar Position Algorithm).
TRR	Revisión de Preparación de las Pruebas (Test Readiness Review).
STC	Sistema Termosolar de Calentamiento.
STCCP	Sistema Termosolar de Concentración de Canal Parabólico.
SV	Solsticio de Verano.
SVR	Ángulo máximo de inclinación del concentrador solar, con respecto a su eje de simetría, $\theta = 50^\circ$.
θ	Transmisividad de la envolvente de vidrio del receptor [%].
τ	Par de torsión en el eje del actuador, [Nm].
τ_2	Par de torsión en el árbol de transmisión, [Nm].
τ_2	Par máximo requerido por el reflector del MCCP, [Nm].
τ_{max}	Temperatura ambiente, [K].
T_A	Temperatura del fluido al retornar al tanque termo, [K].
T_D	Número de dientes en contacto entre la polea menor y la banda.
TM	Revisión de Verificación del Sistema (System Verification Review).
T_r	Temperatura promedio del receptor, [K].
T_{10}	Temperatura del fluido en el depósito, [K].
$(UA)_D$	Producto del coeficiente de transferencia de calor del fluido en el depósito hacia el ambiente por el área de transferencia de calor del depósito. [K/s].
V	Volts (Unidad de diferencia de potencial eléctrico).
VCD	Voltaje de Corriente Directa.
VCA	Voltaje de Corriente Alterna.
ω	Velocidad angular del reflector del MCCP, [rad/s].
ω_1	Velocidad angular de salida del motorreductor, [rad/s].
ω_2	Velocidad angular de la rueda fricción, [rad/s].
ω_3	Velocidad angular de rotación del reflector, [rad/s].
W	Watts, unidad de potencia, [J/s].

OBJETIVOS

Objetivo general.

Diseñar, construir y evaluar un Sistema Termosolar de Concentración de Canal Parabólico (STCCP) para la producción de calor de proceso, con características de diseño que permitan su inserción en diversos sectores del mercado nacional.

Objetivos específicos.

- I. Diseñar y construir un módulo de Micro Concentración Solar de Canal Parabólico (MCCP) con características constructivas mejoradas, a fin de disminuir los costos y tiempos de producción.
- II. Diseñar y construir un sistema de movimiento de alta precisión en el posicionamiento angular y a su vez que tenga un bajo consumo de energía.
- III. Implementar un sistema electrónico capaz de medir, registrar y controlar las variables del STCCP a fin de obtener información que permita estudiar su comportamiento.
- IV. Utilizar una rutina programable para el seguimiento solar a fin de compararla con el uso de un sistema instrumentado.

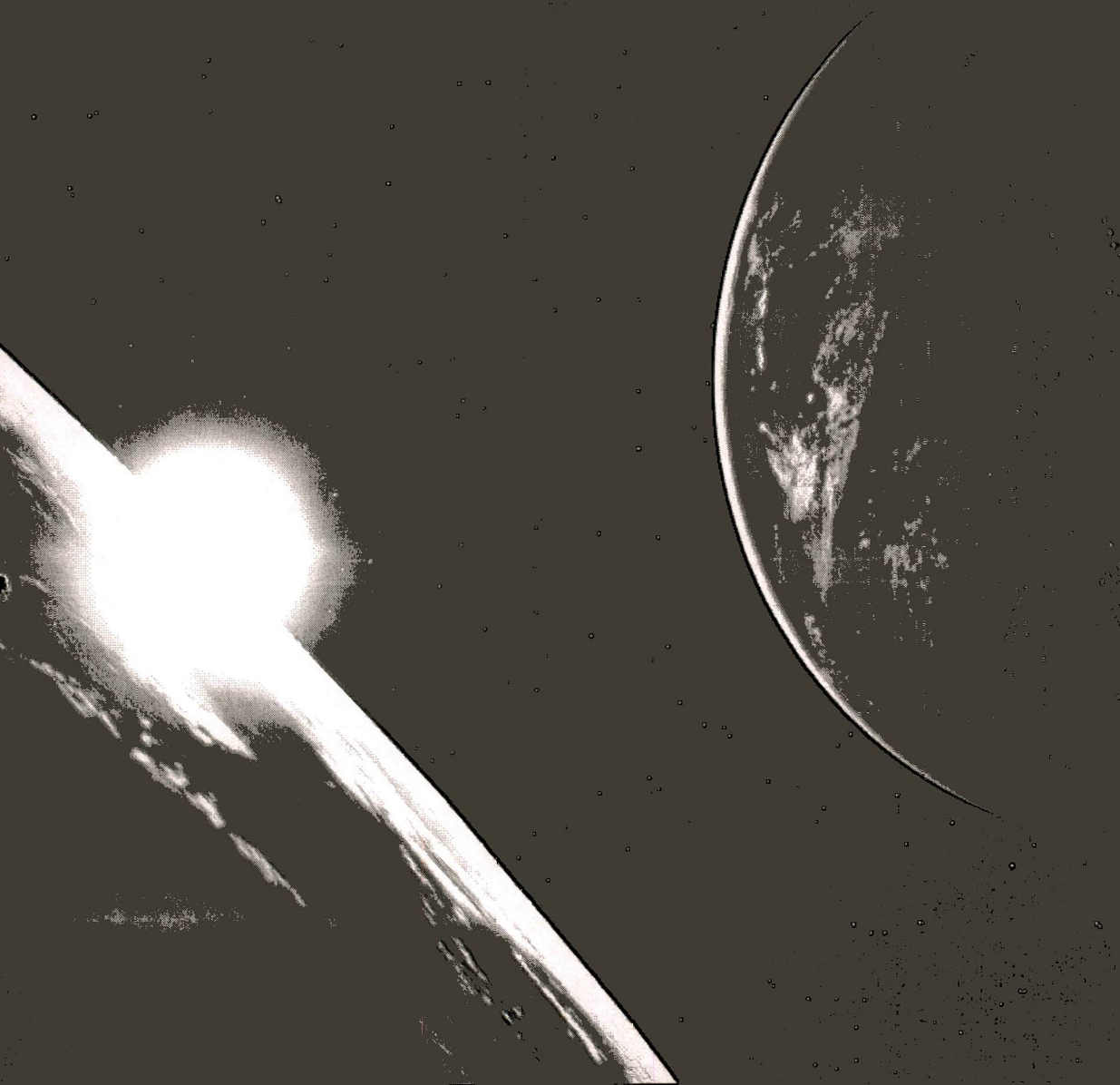
JUSTIFICACIÓN

El calor suministrado por un sistema termosolar de concentración de canal parabólico (STCCP) puede reemplazar el uso de equipos de calentamiento tradicional a base de gas L.P., gas natural, diesel o electricidad, los cuales representan un gasto de operación creciente para cualquier aplicación. Sin embargo, la inversión inicial para la implementación este tipo de sistemas solares puede resultar poco rentable e inclusive inalcanzable para quien la adquiere.

Debido a lo anterior es recomendable identificar la necesidad específica del usuario, basados en la cantidad de energía requerida para un periodo de tiempo (demanda energética), así como los niveles de temperatura requeridos para su proceso en específico (nivel de temperatura).

Como resultado de este trabajo se pretende obtener un módulo de MCCP con mejoras en los costos y tiempos de producción, a fin de promover un mayor uso de esta tecnología en el mercado nacional y global.

ESTADO DEL ARTE



UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

1.1 SISTEMAS TERMOSOLARES DE CONCENTRACIÓN

1.1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, los Sistemas Termosolares de Concentración de Canal Parabólico (STCCP) son utilizados para una variedad de aplicaciones como la generación de energía (Lippke, 1996), la generación de vapor industrial (May y Murphy, 1983), y también en la producción de agua caliente (Kalogirou y Lloyd, 1992).

Los STCCP son utilizados ampliamente en la generación de vapor para obtener altas temperaturas sin afectar gravemente la eficiencia del colector (Kalogirou, *et al.*, 1994). Las centrales solares térmicas basadas en STCCP son consideradas las tecnologías más eficaces para la generación de electricidad a gran escala con ayuda de la energía solar, según lo demostrado por los Sistemas de Generación Eléctrica Solar (SEGS) en Kramer Junction, California, EE.UU. (Cohen y Kearney, 1994). Sin embargo, un estudio de viabilidad en la utilización de un STCCP para la producción agua caliente en un hotel fue reportado por Kalogirou y Lloyd (1992), los resultados demostraron que un sistema de este tipo podría ser más eficiente y con menor costo que los colectores solares de placa plana convencionales (Figura 1.1).

Posteriormente, un estudio de diseño y simulación numérica de un sistema de generación de agua caliente con un concentrador del tipo CCP fue realizado por Arasu y Sornakumar (2005). El análisis de Arasu y Sornakumar (2006) demuestra concordancia con los resultados que fueron obtenidos en los ensayos de Kalogirou y Lloyd (1992). Adicionalmente es de interés comentar que muchos países en desarrollo como México, están ubicados geográficamente en lugares donde los niveles de radiación solar son ideales para el aprovechamiento de las tecnologías solares, tanto para generar vapor para plantas de energía eléctrica como para la producción de calor de proceso.

Ejemplos de ello son la planta de receptor central para generación de potencia eléctrica en Sudáfrica, así como los proyectos de centrales de canal parabólico en la India, Egipto, Marruecos y México (Sargent & Lundy LLC Consulting Group, 2003). Además, cabe resaltar que se han diseñado, construido y probado diversos sistemas del tipo STC para fines de investigación en varios países en vías de desarrollo (Thomas, 1994; Kalogirou, 1996; Almanza *et al.*, 1997; Bakos, *et al.*, 1999). Consecuentemente resulta de interés dar continuidad a estas propuestas tecnológicas, así como generar nuevas aplicaciones enfocadas a cubrir las necesidades de producción de calor de proceso existentes a nivel local, abarcando desde el sector industrial pasando por el comercial y residencial hasta las aplicaciones agrícolas y de las comunidades rurales.

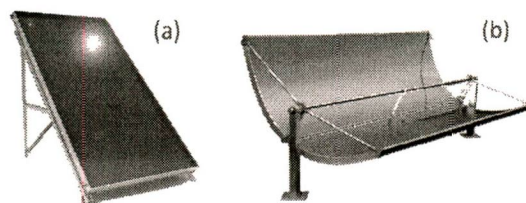


Figura 1.1. Colectores solares (a) tipo placa plana convencional, (b) tipo concentrador solar de canal parabólico.
Fuente: Kalogirou y Lloyd, 1992

1.1 SISTEMAS TERMOSOLARES DE CONCENTRACIÓN

1.1.2 TIPOS DE COLECTORES DE CONCENTRACIÓN

Existen diferentes tipos de colectores de concentración atendiendo a diferentes geometrías y aplicaciones térmicas (Figura 1.2); se pueden clasificar en una matriz por tipo de foco que poseen y por el tipo de flujo solar, dependiendo de la superficie reflectora, donde el foco puede ser lineal o puntual, y el flujo puede provenir de una superficie continua o tipo fresnel que también es conocida como superficie segmentada.

Un módulo concentrador del tipo CCP además de poseer un foco lineal tiene una superficie reflectora continua. El colector de disco parabólico, está constituido por una superficie de revolución de forma que concentra la radiación solar sobre un punto focal en el que se encuentra el receptor de calor. Un concentrador fresnel con foco lineal es un arreglo de espejos independientes que colectan la energía solar en un tubo dispuesto de manera paralela al arreglo de reflectores. El colector de torre central consta de un receptor puntual ubicado en lo alto de una torre y a cuyo pie se distribuyen concéntricamente un arreglo de espejos planos reflectantes llamados heliostatos (Greenpeace; SolarPACES y ESTELA, 2009).

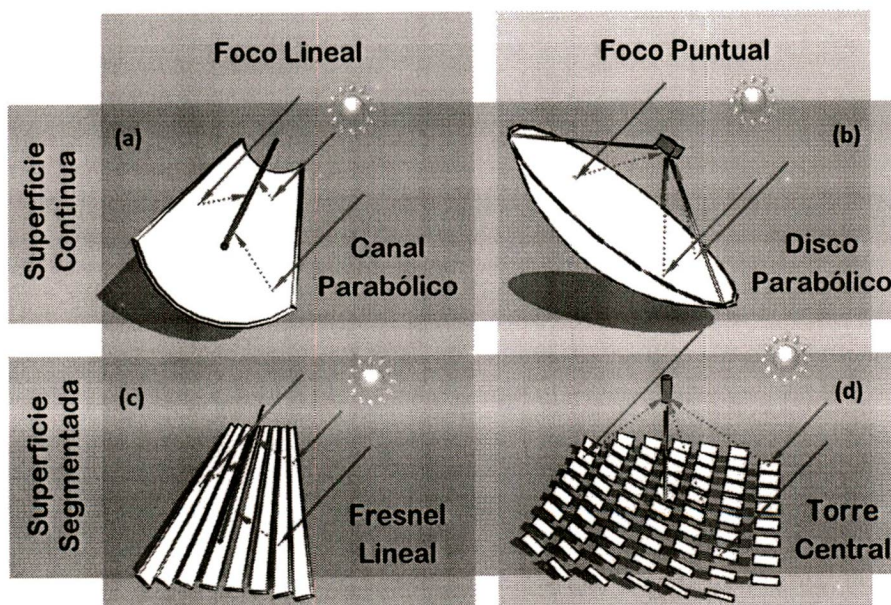


Figura 1.2. Concentradores solares tipo (a) canal parabólico, (b) disco parabólico, (c) tipo fresnel lineal, (d) tipo torre central. Fuente: Greenpeace; SolarPACES y ESTELA, 2009.

En este trabajo se ha optado por emplear un colector solar de canal parabólico, debido a que es una de las tecnologías con mayor desarrollo, y por los rangos de temperatura que alcanzan, que son ideales para la producción de calor de proceso.

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

1.2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Los intentos de aprovechar la energía radiante del sol datan de los tiempos de las antiguas civilizaciones de la humanidad; sin embargo, fue hasta finales del siglo XIX, que comenzaron a surgir mayor cantidad de investigadores que pensaron en utilizar máquinas operadas con vapor a fin de encontrar la manera de transformar la energía solar en trabajo útil.

Agustín Mouchot fue el pionero de los constructores de los aparatos que emplearon energía solar para generar vapor y poder aprovecharlo. Al respecto, Mouchot dio un notable avance al diseño de colectores solares, habiendo creado un reflector en forma de cono truncado.

A este cono se le conoció como *Oxicón* (Figura 1.3a), el cual consistía en placas de metal plateado; tenía un diámetro de 540 cm, un área de captación de 18.6 m^2 y un peso de 1,400 kg. Se aseguraba que podía captar 87 por ciento del calor solar, y producir vapor a 3.5 atm, con lo cual era posible obtener fuerza motriz (Fernández Zayas, 1987).

Posteriormente, el 6 de Agosto de 1882, Abel Pifre contemporáneo de Mouchot, desarrolló un colector solar de reflectores parabólicos a base de pequeños espejos, muy parecido al *Oxicón* de Mouchot. Utilizando la energía solar imprimó ejemplares de *Le Chaleur Solaire*, un periódico creado para la ocasión. Este experimento tuvo lugar en el Jardín de las Tullerías, París. Con esta máquina solar se lograron imprimir 500 ejemplares por hora (Figura 1.3b).

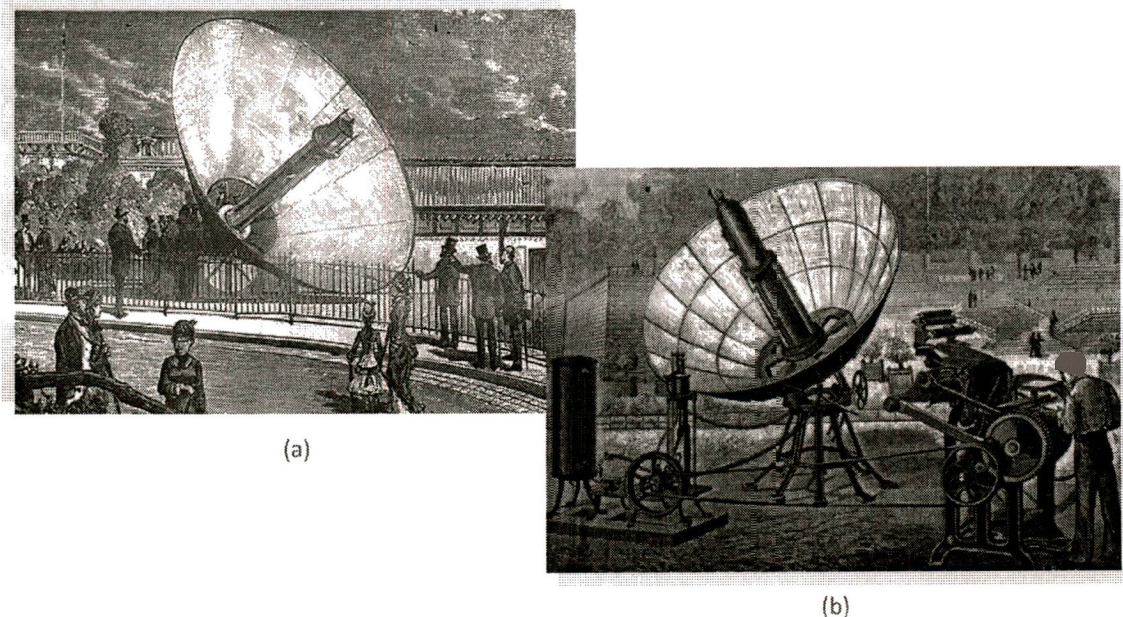


Figura 1.3. Primeros Colectores Solares Modernos (a) *Oxicón* de Agustín Mouchot, presentado por primera vez en la Exposición Universal de París de 1878, (b) Imprenta operada por Abel Pifre e impulsada a vapor generado por energía solar en el Jardín de las Tullerías en París en 1882. Grabados de la Época. Fuente: Fernández Zayas, 1987.

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

En la década de 1870 el sueco-americano John Ericsson hizo funcionar su máquina de aire caliente con un concentrador de canal parabólico; la finalidad de este invento era impulsar motores de bombeo de agua para riegos agrícolas. El dispositivo sumaba tres elementos fundamentales: un espejo concentrador, una caldera y una máquina de vapor (Fernández Zayas, 1987).

El dispositivo lograba calentar el aire, en lugar de utilizar agua, contenido en un cilindro situado en el foco de un reflector curvo. Ericsson estaba sorprendido por la forma de trabajar y el rendimiento de su motor. Pero tres años después, se templaron sus ánimos al darse cuenta que el aparato concentrador era muy grande y costoso en su construcción por lo que resultaba poco competitivo comparado con los nuevos motores movidos por carbón (Figura 1.4).

Posteriormente en 1904, el padre portugués de nombre Himalaya, quien estaba arraigado en Estados Unidos, accionaba un espejo parabólico de 80 m^2 formado por 6,000 elementos, alcanzando temperaturas cercanas a los $3,500 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 1.5), y fue aplicado para fundir metales y rocas (Alvarado, 2007).

En 1907 se patentó por primera vez en Alemania un diseño sobre colectores parabólicos, por el Dr. Wilhelm Maier (en Aalen) y Adolf Remshardt (en Stuttgart), (Greenpeace, STIA, Solar Thermal Power 2020, 2007), (Figura 1.6).

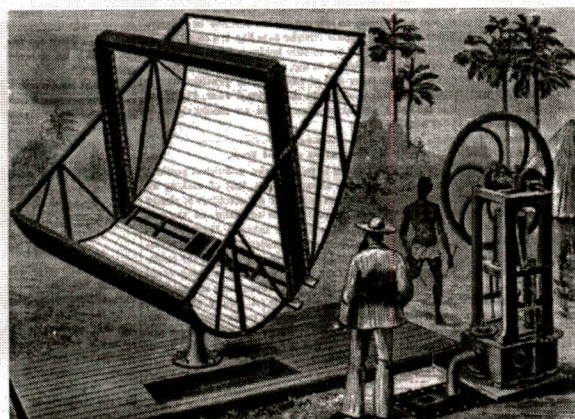


Figura 1.4. Colector Solar Parabólico de John Ericsson.
Fuente: Fernández Zayas, 1987.

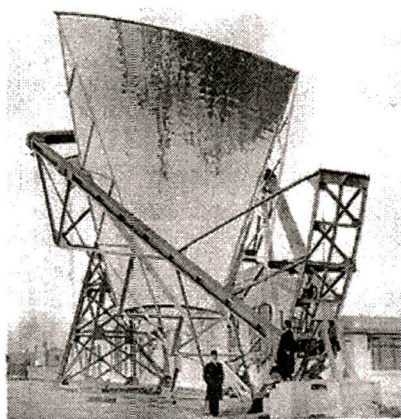


Figura 1.5. Horno solar construido por Himalaya.
Fuente: Fernández Zayas, 1987.

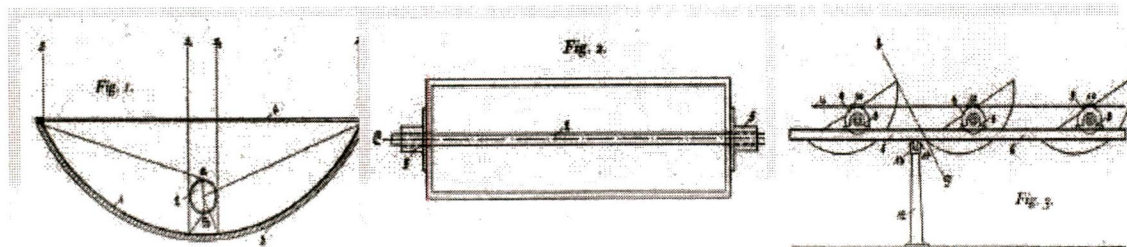


Figura 1.6. Parte de la patente del diseño sobre colectores parabólicos Maier y Remshardt.
Fuente: Greenpeace, STIA, Solar Thermal Power 2020, 2007

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

A comienzos del siglo XX, el ingeniero y también emprendedor visionario de la energía solar Frank Shumann de origen germano-americano, se dio cuenta que las altas temperaturas en los sistemas de captación solar reducían las pérdidas por conducción y convección, y que además se tenía un elevado costo asociado a los espejos revestidos de plata.

En 1908, Shumann y sus colaboradores deciden formar la Sun Power Company, teniendo un importante objetivo a largo plazo: la construcción de una planta solar a gran escala en Egipto (Figura 1.7). Ahí la mano de obra era barata, y el potencial solar enorme.

Para incrementar la cantidad de calor producida en los colectores, se sumaron una serie de reflectores parabólicos (espejos de vidrio), y se añadió un mecanismo para ajustar el ángulo de recepción de los rayos solares a su posición óptima de manera automática.

Entre 1912 y 1913, Shumann y su equipo de operarios llegan a Maadi, pequeña comunidad agrícola junto al Nilo. Se construyeron cinco colectores solares con reflector parabólico orientados sobre el eje Norte-Sur, cada uno de 60 metros de largo por 4 de ancho y separados 8 metros entre sí, con una área total de apertura de 1,200 m².

Inicialmente, el proyecto buscaba generar electricidad a gran escala, pero tras varios intentos fallidos, se vieron obligados a utilizar la potencia del vapor producido en el bombeo de agua para riego agrícola. El sistema surtía alrededor de 23,000 litros de agua por minuto con una potencia de alrededor de 41 kW.

Tras el éxito obtenido, Shuman planeaba construir una planta de 203 MW en medio del Sahara, y logró recibir capital de riesgo alemán por un monto de 200,000.00 marcos, sin embargo, el estallido de La Primera Guerra Mundial obligó a sus colaboradores a regresar a sus lugares de origen y tras el término del periodo bélico Alemania perdió sus colonias Africanas, por lo que fue imposible cumplir el contrato con la empresa. Posteriormente llegó la gran revolución del petróleo y la promesa solar quedó guardada en olvido por muchos años. (Khammas, 2007)

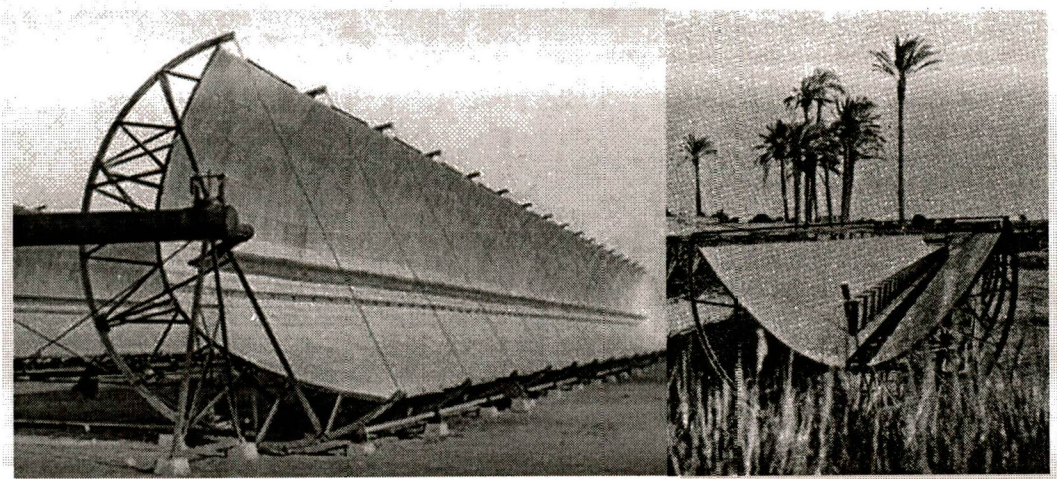


Figura 1.7. Concentradores Solares de Canal Parabólico de Shuman, en Meadi, Egipto. Fuente: Kalogirau, 2004.

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

Es hasta la década de 1970 que se retoma el verdadero interés por las tecnologías solares de concentración, como una clara respuesta a la crisis petrolera por el incremento disparado de los precios de los hidrocarburos (Fernández Zayas, 1987).

En dicha época tanto el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), así como el Ministerio Alemán de Investigación y Tecnología, se encargaron de patrocinar en sus respectivos países el desarrollo de una serie de procesos y sistemas de bombeo de agua y calor con concentradores parabólicos.

Como resultado a principios de la década de los 80's se crea la primera planta de 14 MWe de la llamada *Solar Electricity Generating Systems* (SEGS), en el desierto de Mojave en California, USA. La compañía israelí/americana Luz construyó las nueve plantas existentes al día de hoy; sin embargo para finales de 1991 se fue a la bancarrota debido a asuntos de mercado relacionados con las fluctuaciones de los precios de la energía y su tratamiento fiscal (Kearny, 2007).

Sin embargo, la tecnología ha probado su rendimiento y es un buen ejemplo de que los STCCP para generación de electricidad tienen un excelente potencial de larga vida operativa. Hoy en día las tres plantas de Kramer Junction abastecen entre 800 y 900 millones de kWh de electricidad a la red eléctrica californiana cada año.

Con ello, al 2013 se alcanza un total de producción solar acumulada de casi 9 mil millones de kWh, casi la mitad de la electricidad solar generada en todo el mundo hasta la fecha. Desde su construcción, las plantas SEGS han reducido sus costos operativos y de mantenimiento al menos un tercio. Las empresas fabricantes de componentes para colectores han avanzado en la mejora de tubos absorbedores, la preparación de procesos de fabricación y la integración de los sistemas complementarios. La disponibilidad anual de la central supera constantemente el 99% y, como anécdota, el nivel de rendimiento de la central ha caído solo un 3% en unos 20 años de funcionamiento. (Greenpeace; SolarPACES y ESTELA, 2009).

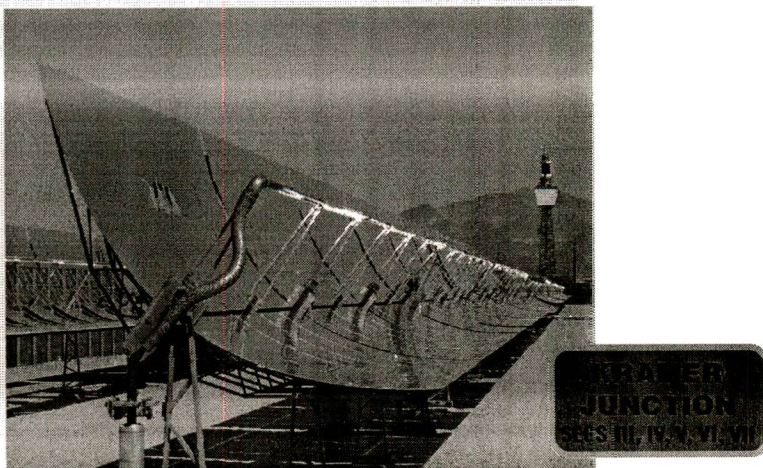


Figura 1.8. Concentradores Solares del *Solar Energy Generating System* (SEGS), ubicado en Kramer Junction, Mojave California, USA. Fuente: Greenpeace; SolarPACES y ESTELA, 2009

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

Desde 1991 y durante casi toda la década de los 90's, no hubieron desarrollos técnicos ni de mercado, hasta que en 1998 comenzó la construcción del proyecto EuroTrough, el cual tuvo el financiamiento de USA y de un grupo de empresas europeas entre las cuales figuraron Flabeg de Alemania y Solel Solar Systems de Israel (la cual surgió como una reintegración de la antigua empresa Luz), las cuales fueron proveedoras de los espejos y los recibidores respectivamente de las plantas SEGS, (Kearny, 2007)

Sin embargo únicamente Solel fue capaz de proveer un campo completo de concentradores CCP, basado en los diseños desarrollados por Luz, con los conocidos LS-3. Esta falta de proveedores en componentes comerciales y proveedores de sistemas, fue un tema de gran importancia tanto para los desarrolladores, como para las instituciones de investigación.

En muy pocos años, la situación ha cambiado dramáticamente, ahora las oportunidades de proyectos en España y en el suroeste de USA (en particular, en California) han crecido, y existen más empresas que están aplicando su experiencia en desarrollar diseños de sistemas solares. Las empresas que están desarrollando fuertemente este mercado son:

- ◆ Flagsol (perteneciente a Solar Millenium).
- ◆ Solel Solar Systems.
- ◆ Acciona Solar Power (antes Solargenix).
- ◆ Sener / ACS Cobra.
- ◆ Solucar R&D (parte de Abegoa).
- ◆ IST Solucar (parte de Abegoa).

El campo de experiencia y la madurez de los diseños ofrecidos por estas empresas varían considerablemente, y deben ser tratados cuidadosamente (Kearny, 2007).

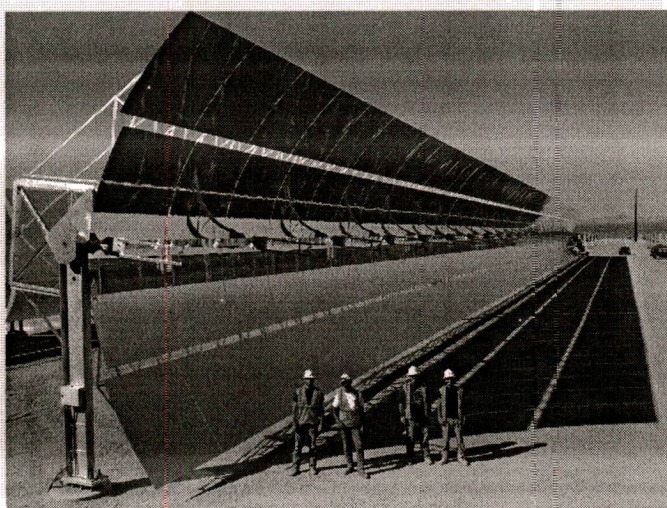


Figura 1.9. Concentradores Solares del *EuroTrough*, ubicado en Almería, España.
Fuente: Kearny, 2007.

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

A continuación se muestra un mapa con el estado actual a nivel global de las plantas solares de concentración existentes para generación de electricidad (Figura 1.10). Se estima que se tienen instalados 2 GW de acuerdo a datos de octubre de 2012, considerando únicamente las plantas de Canal Parabólico y de Torre Central, y en proyecciones conservadoras se espera un crecimiento de al menos 12 GW para finales de 2015 (Sendagorta, 2012).

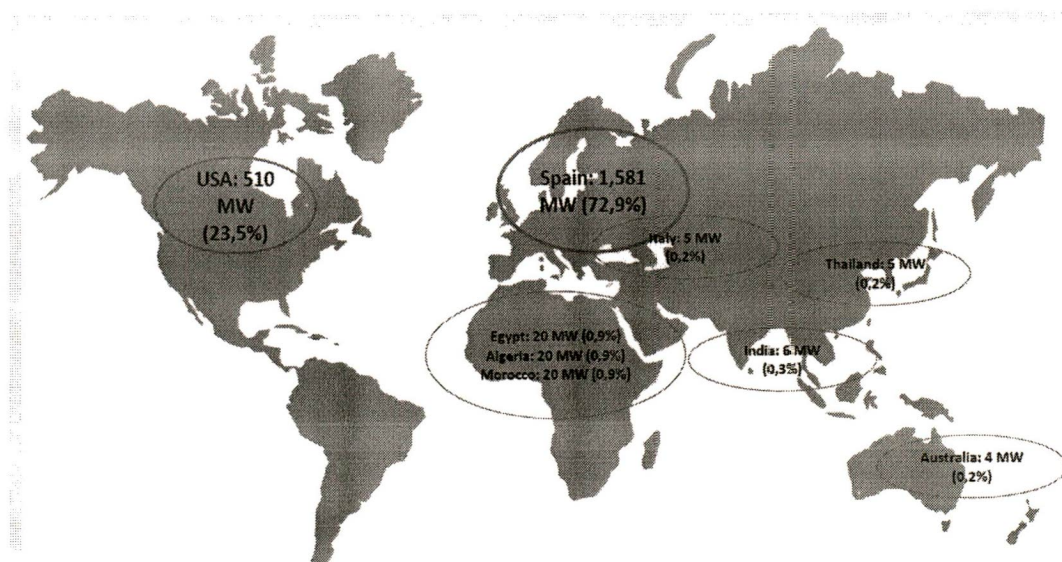


Figura 1.10. A nivel Mundial 2 GW instalados para Octubre del 2012.

Fuente: Sendagorta, 2012.

Como se ha visto, las tecnologías de concentración solar son ampliamente utilizadas para generar electricidad a gran escala; sin embargo, hay un gran potencial con respecto a las aplicaciones de producción de calor de proceso, este trabajo se enfoca específicamente en la tecnología de CCP, debido a que su implementación no requiere altas inversiones de capital para los procesos industriales donde se necesitan pequeñas plantas trabajando a temperaturas bajas y medias, y en consecuencia los colectores son de menor tamaño. A este tipo de tecnologías se les conoce como Micro Concentradores de Canal Parabólico (MCCP) (Muirhead, 2013).

Existen a nivel mundial dos firmas muy reconocidas en este campo: NEP Solar de Australia (con representación europea en Suiza) y Sopogy de Hawaii, las cuales han estado comercializando sus tecnologías desde el 2002.

México tiene un potencial enorme para la implementación de este tipo de tecnologías, tanto a nivel de mercado como por el recurso solar que posee, donde los niveles de temperatura requeridos son mayores a 75°C y menores a los 250°C; es decir, se encuentran en un intervalo medio de temperaturas, donde los colectores planos no alcanzan a operar eficientemente y las grandes plantas de concentración sobrepasan estos requerimientos (Kraemer, 2013).

1.2 CONCENTRADORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

1.2.2 PRINCIPIOS DE CONCENTRACIÓN SOLAR CON CANAL PARABÓLICO

Un STCCP, utiliza únicamente la componente directa de la radiación solar concentrándola para calentar un fluido que puede ser agua o aceite para su posterior aprovechamiento en un proceso industrial, comercial o doméstico.

El elemento de mayor importancia de los STCCP son los módulos de Concentración Solar de Canal Parabólico (CCP). Estos están constituidos por un espejo en forma de canal parabólico que se refleja la radiación solar, concentrándola en un tubo dispuesto en la línea focal de la parábola, el cual absorbe la energía radiante y la transfiere en forma de calor a un fluido que circula dentro del tubo también llamado receptor (Figura 1.11), (Silva Pérez, 2005).

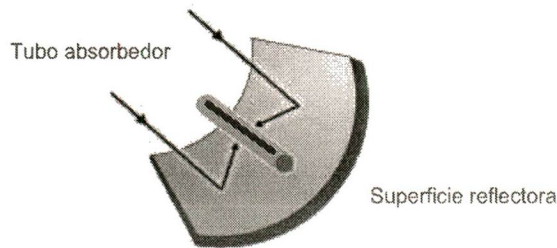


Figura 1.11. Principio de funcionamiento y partes componentes del Módulo Concentrador Solar de Canal Parabólico (MCCP). Fuente: Silva Pérez, 2005.

Estos dispositivos deben ser orientados de manera precisa siguiendo la trayectoria solar, a fin de tener el máximo aprovechamiento de la energía. El requerimiento básico es que los rayos solares incidan en todo momento perpendicularmente al plano directriz de la superficie reflectora (Figura 1.12), (Silva Pérez, 2005).

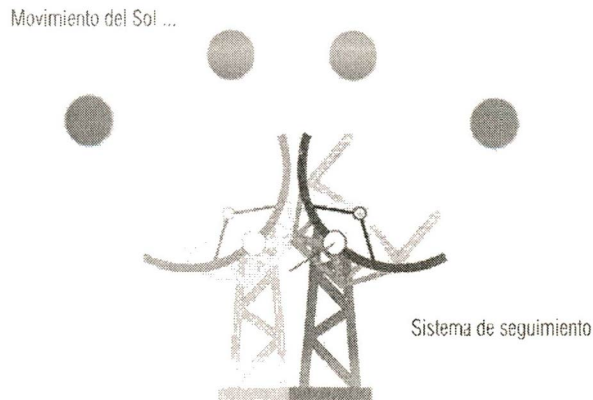


Figura 1.12. El seguimiento del Sol puede ser estacional (eje de giro Este-Oeste) o cotidiano (eje de giro Norte-Sur), alineando el CCP de manera perpendicular a los rayos solares. Fuente: Silva Pérez, 2005.

1.3 TECNOLOGÍAS DE MCCP EN EL MERCADO GLOBAL

1.3.1 ESTADO DEL ARTE EN MCCP

Como se comentó anteriormente, la tecnología del tipo MCCP representa una gran oportunidad de mercado en nuestro país, por consiguiente, resulta de interés conocer y estudiar las propuestas tecnológicas existentes a nivel mundial, a fin de tomar elementos que ayuden a generar una propuesta innovadora y aplicable a las necesidades y condiciones locales.

En las tabla 1.1 a la tabla 1.4 se muestran a los fabricantes más representativos de todo el mundo de la tecnología de MCCP, para su uso en la generación de calor de proceso y se detallan algunas características como sus dimensiones y peso.






Las diferencias constructivas entre las diferentes marcas son principalmente: dimensiones, tipos de estructuras de soporte, sistemas de movimiento y formas de ensamble. Cabe destacar que la empresa con más años de experiencia en el mercado y con gran capital de inversión para proyectos es Sopoty (Tabla 1.1), el resto de las empresas pueden considerarse de reciente creación o poca participación en el mercado mundial (Kraemer, 2013).

Tabla 1.1. Empresas y características de MCCP más destacados en el mercado de USA. Fuente: PowerGIE, 2013.



U.S.A

Empresa	SOPOGY	SOPOGY	SOPOGY	SOPOGY	MATALON ENERGY
Origen	USA - Honolulu Hawaii	USA	USA	USA	USA
Producto	SopoNova	SopoFlare	SopoHelios	SopoTitan	Mat-184
Aplicaciones	- Calor de Proceso - Aire Acondicionado - Generación Eléctrica	- Calor de Proceso - Aire Acondicionado (Chiller Absorción)	- Calor de Proceso - Generación Eléctrica	- Calor de Proceso (Vapor) - Generación Eléctrica	- Calor de Proceso - Vapor y Refrigeración - Generación Eléctrica
Lugar de Montaje	Azoteas y Pisos	Azoteas	Pisos (grandes extensiones)	Pisos	Azoteas, Pisos
Peso del Colector [kg]	68.04	11.34	76.20	—	—
Altura [m]	—	—	—	—	—
Ancho de Apertura [m]	1.65	0.76	2.09	3.048	1.22
Largo del Módulo [m]	3.66	2.44	3.67	3.758	4.88
Área del Colector [m ²]	6.020	1.858	7.673	11.455	5.95
Área del Colector Neta [m ²]	5.210	2.470	7.170	10.760	5.51

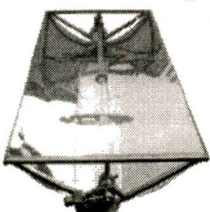
1.3 TECNOLOGÍAS DE MCCP EN EL MERCADO GLOBAL

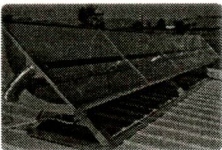
En el mercado europeo existen varias propuestas tecnológicas, sin embargo, las que han sido destacadas por los proyectos que han implementado al día de hoy son la sueca Aboslicon (Tabla 1.2) y la representante suiza de la compañía australiana NEP Solar (Tabla 1.3).


Existen otras propuestas que han sido registradas ante las oficinas de patentes en Europa y algunas en USA, pero dentro del mercado aún no han logrado tener presencia significativa. Como son el caso de la francesa Therpo (Tabla 1.2), la alemana Smirro (Tabla 1.3) y la italiana Soltigua (Tabla 1.3).

Tabla 1.2. Empresas y características de MCCP más destacados en Francia y Suecia. Fuente: PowerGIE, 2013.

Francia		Suecia	
Empresa	THERPO	ABSOLICON	ABSOLICON
Origen	FRANCIA	SUECIA	SUECIA
Producto	Thermique Photonique	Absolicon X10 T6	Absolicon X10 T10
Aplicaciones	- Calentamiento de Agua - Refrigeración	- Agua Caliente - Calefacción	- Agua Caliente - Calefacción
Lugar de Montaje	Azoteas y Pisos	Azoteas y Pisos	Azoteas y Pisos
Peso del Colector [kg]	---	195	315
Altura [m]	---	---	---
Ancho de Apertura [m]	0.6	1.1	1.1
Largo del Modulo [m]	2.0	6.0	10.0
Área del Colector [m²]	1.2	6.547	10.912
Área del Colector Neta [m²]	---	6.23	10.37





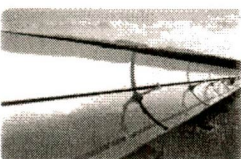


1.3 TECNOLOGÍAS DE MCCP EN EL MERCADO GLOBAL

Tabla 1.3. Empresas y características de MCCP más destacados en Alemania, Italia y Suiza. Fuente: PowerGIE. 2013.

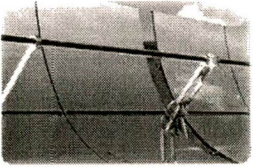
Alemania

Empresa	SMIRRO
Origen	ALEMANIA
Producto	Smirro
Aplicaciones	- Calor de Proceso - Vapor y Refrigeración - Generación Eléctrica - Desalinización de Agua
Lugar de Montaje	Azoteas y Pisos
Peso del Colector [kg]	---
Altura [m]	---
Ancho de Apertura [m]	1.1
Largo del Módulo [m]	3.0
Área del Colector [m ²]	3.3
Área del Colector Neta [m ²]	3.4




Italia

Empresa	SOLTIGUA
Origen	ITALIA
Producto	PTM
Aplicaciones	- Agua Caliente - Calefacción
Lugar de Montaje	Azoteas, Pisos, Cobertizo
Peso del Colector [kg]	---
Altura [m]	---
Ancho de Apertura [m]	2.4
Largo del Módulo [m]	13.1
Área del Colector [m ²]	31.440
Área del Colector Neta [m ²]	27



Suiza

Empresa	NEP SOLAR
Origen	SUIZA
Producto	NEP SOLAR PolyTrough 1360
Aplicaciones	- Calor de Proceso - Vapor y Refrigeración - Generación Eléctrica
Lugar de Montaje	Azoteas y Pisos
Peso del Colector [kg]	---
Altura [m]	---
Ancho de Apertura [m]	1.22
Largo del Módulo [m]	4.88
Área del Colector [m ²]	5.95
Área del Colector Neta [m ²]	---



1.3 TECNOLOGÍAS DE MCCP EN EL MERCADO GLOBAL

En el continente americano, además de la empresa Sopogy existen propuestas que se han realizado a nivel de investigación, y una cantidad menor como propuestas enfocadas al lanzamiento de productos al mercado.

Entre las más destacadas podemos mencionar el MCCP realizado por George Plhak (Tabla 1.4) como una propuesta para calentamiento de agua para uso doméstico, quien proporciona a través de su portal un manual completo de cómo elaborar su propio MCCP con materiales de fácil acceso.

Otra propuesta interesante que ha sido pionera en el lanzamiento al mercado de MCCP es la presentada por la empresa Inventive Power (Tabla 1.4), cuya sede se encuentra en Guadalajara, México.

Tabla 1.4. Empresas y características de MCCP más destacados en Canadá y México. Fuente: PowerGIE, 2013.



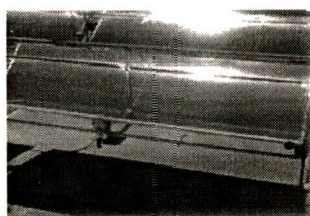
Canadá

Empresa	GEORGE PLHAK
Origen	CANADÁ
Producto	George Plhak
Aplicaciones	- Calor de Proceso - Calentamiento de Albercas
Lugar de Montaje	Azoteas y Pisos
Peso del Colector [kg]	---
Altura [m]	
Ancho de Apertura [m]	0.49
Largo del Modulo [m]	2.44
Área del Colector [m ²]	1.20
Área del Colector Neta [m ²]	1.20



México

Empresa	INVENTIVE POWER
Origen	MÉXICO
Producto	Power-Trough 110 - Calor de Proceso
Aplicaciones	- Vapor y Refrigeración - Generación Eléctrica - Deshidratación de Alimento
Lugar de Montaje	Azoteas y Pisos
Peso del Colector [kg]	26
Altura [m]	
Ancho de Apertura [m]	1.1
Largo del Modulo [m]	2.44
Área del Colector [m ²]	2.684
Área del Colector Neta [m ²]	---



1.4 NORMALIZACIÓN Y ESTÁNDARES

En México la Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación ha elaborado normas para evaluar el rendimiento térmico y la durabilidad de los equipos de calentamiento solar de agua, así como para definir los términos utilizados en los métodos de evaluación (CONUEE, 2013).

I. **NMX-ES-001-NORMEX-2005** - *Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua (métodos de prueba y etiquetado).*

Establece los métodos de prueba para conocer el rendimiento térmico y la funcionalidad de los colectores solares que utilizan el agua como fluido de trabajo. Esta norma pretende disminuir el consumo de combustibles fósiles, así como la emisión de contaminantes, al utilizar la radiación solar para el calentamiento de agua de uso sanitario.

II. **NMX-ES-002-NORMEX-2007** - *Definiciones y terminología de la energía solar.*

Establece los vocablos, definiciones y simbología del lenguaje utilizado en la investigación que unifique el ámbito científico y técnico. Esta norma homogeneiza el lenguaje utilizado dentro del ámbito de la energía solar y sus aplicaciones para evitar confusiones en conceptos y nombres usados en la práctica.

III. **NMX-ES-003-NORMEX-2008** - *Energía solar - Requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos para calentamiento de agua.*

Esta Norma Mexicana se extiende a todos los sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos y demás que forman parte de las instalaciones de sistemas termo-solares de más de 500 litros, para sistemas menores de 500 litros se aplica lo establecido en el apéndice normativo I, y es complementario a los reglamentos municipales, estatales y federales de las materias aplicables en cada caso.

IV. **NMX-ES-004-NORMEX-2010** - *Evaluación térmica de sistemas solares para el calentamiento de agua (método prueba).*

Esta Norma Mexicana establece el método de ensayo (prueba) para evaluar y comparar el comportamiento térmico de sistemas de calentamiento de agua solar, principalmente para uso doméstico hasta una capacidad máxima de 500 litros y hasta una temperatura máxima de 90° C como dominio de temperaturas de agua caliente.

Se aplica a los sistemas solares domésticos para el calentamiento de agua que funcionan mediante circulación natural o termosifónicos; y circulación forzada; los cuales pueden funcionar a partir de una o más de las siguientes tecnologías, u otras: colectores solares planos; auto contenidos; colectores de tubos evacuados con o sin tubos de calor y con y sin superficies reflejantes; colectores con concentradores tipo parabólico compuesto (CPC).

Esta prueba **no puede ser aplicada** a los siguientes sistemas solares domésticos para el calentamiento de agua: colectores solares **con sistemas de seguimiento**, sistemas que contengan más de un tanque térmico de almacenamiento.

1.4 NORMALIZACIÓN Y ESTÁNDARES

A nivel nacional aún no existe un estándar para los equipos solares para calentamiento de agua con seguimiento solar, por lo que es necesario explorar las normas internacionales y poder conocer los requerimientos y los métodos de evaluación de los equipos de concentración de canal parabólico con el fin de considerarlos en el desarrollo de este proyecto.

I. SRCC DOCUMENT STANDARD 600 - Test methods and minimum standards for certifying solar concentrating collectors (SRCC, 2013)

En USA, la Corporación de Evaluación y Certificación Solar (SRCC, por sus siglas en inglés) elabora estándares para la industria de la energía solar.

El estándar 600 con fecha julio del 2012, titulado Métodos de Pruebas y Estándares Mínimos para la Certificación de Colectores Solares de Concentración, establece los procedimientos para determinar el rendimiento térmico y asegurar la durabilidad del equipo solar.

El alcance de esta norma es aplicado únicamente para evaluar el rendimiento térmico de los colectores de concentración que utilizan un fluido para transferir el calor desde el colector, y establece los procedimientos para evaluar la durabilidad de los colectores de concentración.

En esta norma se define como colector de concentración a todo colector que utiliza reflectores, lentes u otros elementos ópticos para direccionar y concentrar la radiación solar que pasa a través de la apertura hacia el absorbedor. Un colector plano provisto de un espejo, o un colector de tubos de vacío que tiene un reflector detrás de los tubos, son ejemplos de colectores de concentración.

Este estándar es utilizado para medir el rendimiento térmico de tecnologías que de manera simultánea produce energía térmica o de otro tipo como resultado de la concentración solar.

II. Normas Europeas

Los estándares europeos son más generalizados para el tipo de colector, es decir no incluyen una restricción para los colectores de concentración, pero no incluyen un apartado específico para este tipo de colectores (STIFF, 2013). Entre las normas más importantes se encuentran:

- ◆ EN 12975-1. Sistemas solares térmicos - Generalidades de colectores solares.
- ◆ EN ISO 9806. Energía Solar - Colectores solares térmicos - Métodos de prueba.
- ◆ EN 12976-1. Sistemas solares térmicos - Fabricación - Generalidades.
- ◆ EN 12976-2. Sistemas solares térmicos - Fabricación - Métodos de prueba.
- ◆ EN 12977-5. Sistemas solares térmicos - Sistemas diseñados a medida - Parte 5, métodos de prueba y rendimiento de equipos de control.
- ◆ EN ISO 9488. Energía solar - Vocabulario.

PROPUESTA DE DISEÑO



UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

2.1.1 INGENIERÍA DE SISTEMAS: CONCEPTOS BÁSICOS

Ingeniería de Sistemas (IS) es la metodología utilizada en el diseño, fabricación y puesta a punto de sistemas, y que es utilizada por entidades como la NASA para la generación de nuevos sistemas. IS es un enfoque metódico y disciplinado para el diseño, fabricación, gestión técnica, operaciones y retiro de un sistema.

Se entiende por "*sistema*" a una colección de elementos diferentes que juntos y derivado de su relación o interconexión, producen resultados que no se pueden obtener por los elementos de forma aislada. Los elementos o piezas, pueden incluir personas, hardware, software, instalaciones, políticas así como documentos; es decir, todas las cosas necesarias para producir resultados de nivel de sistema. Los resultados incluyen rendimiento, propiedades, características, funciones, comportamiento y cualidades de nivel de sistema. IS es una forma lógica de pensar que tiene el fin de lograr que los intereses de todos los integrantes del proyecto sean alcanzados de manera satisfactoria (NASA, 2007).

A fin de explorar ampliamente la IS es necesario colocarla en el contexto de la metodología de *Manejo de Proyectos (PM)*, que tiene la función de planificar, supervisar y dirigir las numerosas actividades necesarias para alcanzar las metas y objetivos del cliente y otros integrantes del proyecto, respetando los plazos, los costos, la calidad y las restricciones de horario especificadas. En este sentido se puede decir que PM tiene dos grandes áreas de igual importancia: *Ingeniería de Sistemas* y *Control de Proyectos (CP)* (Figura 2.1).



Figura 2.1. *Ingeniería de Sistemas (IS)* en el contexto del *Manejo de Proyectos (PM)*.
Fuente: National Aeronautics and Space Administration, 2007.

2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

2.1.2 INGENIERÍA DE SISTEMAS: PROCESOS TÉCNICOS

Dentro de IS existen tres procesos técnicos: diseño del sistema, elaboración del producto, y el manejo técnico, tal como lo muestra la figura 2.2, y son utilizados en conjunto para desarrollar los productos finales, comenzando por definir las expectativas de los interesados, hasta convertir los requisitos técnicos en una solución de diseño que satisfaga todas las expectativas de los clientes y todos los participantes del proyecto.

Estos procesos se aplican de manera iterativa para cada producto que sea parte componente de la estructura del sistema total, y son aplicados en dos sentidos: de lo general a lo específico en la parte de diseño, y de lo particular a lo general en la parte de fabricación, en cualquier rama de la estructura hasta el punto donde puede ser construidos, comprados o reutilizados.

Es importante señalar que estos procesos serán la guía general de todos los involucrados en el proyecto, y ayudará a ordenar todas las actividades que se llevarán a cabo a fin de controlar los recursos económicos, humanos y de tiempo, así como ayudar a la toma de decisiones (NASA, 2007).

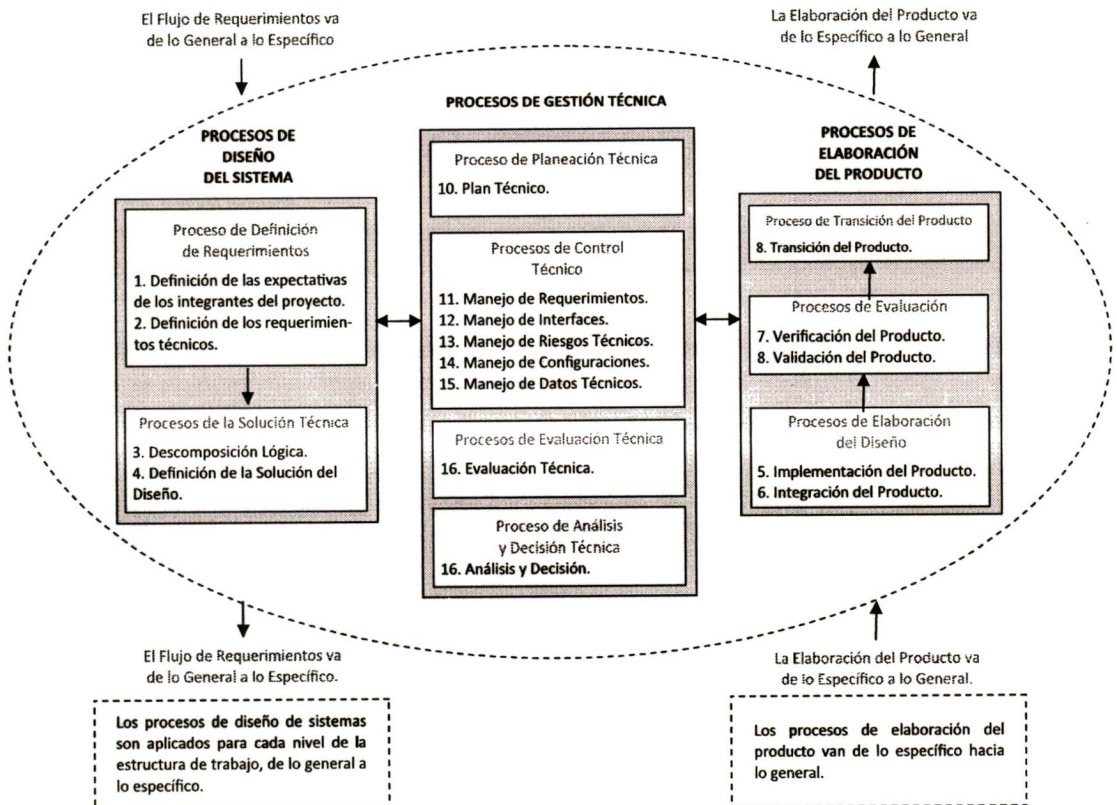


Figura 2.2. Procesos técnicos del diseño y elaboración de sistemas en base a la metodología Ingeniería de Sistemas.

Fuente: NASA. 2007.

2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

2.1.3 INGENIERÍA DE SISTEMAS: JERARQUÍA DE REQUERIMIENTOS

Antes de comenzar a crear los requerimientos del sistema, es necesario definir la jerarquía y las expectativas de los integrantes del proyecto. En base a esta jerarquía se generan requisitos técnicos que se convierten posteriormente en la solución de diseño que satisface las expectativas.

Esta jerarquía debe aplicarse de forma ordenada desde la parte superior hasta la base en donde se definen los productos más básicos, y aplica para cualquier rama de la estructura hasta el punto donde pueden ser construidos, comprados o reutilizados los sistemas (Figura 2.3).

La aplicación de este orden ayuda a generar la *trazabilidad* de los requerimientos, es decir, indica el cómo, cuándo y quién define lo que se debe realizar. Los requerimientos deben ser comprensibles, sin ambigüedades, integrales, completos, concisos y se deben relacionar directamente con las características de rendimiento del sistema que se está diseñando y tomar como base las necesidades de cliente en referencia al entorno previsto para cual deben operar (National Aeronautics and Space Administration, 2007).

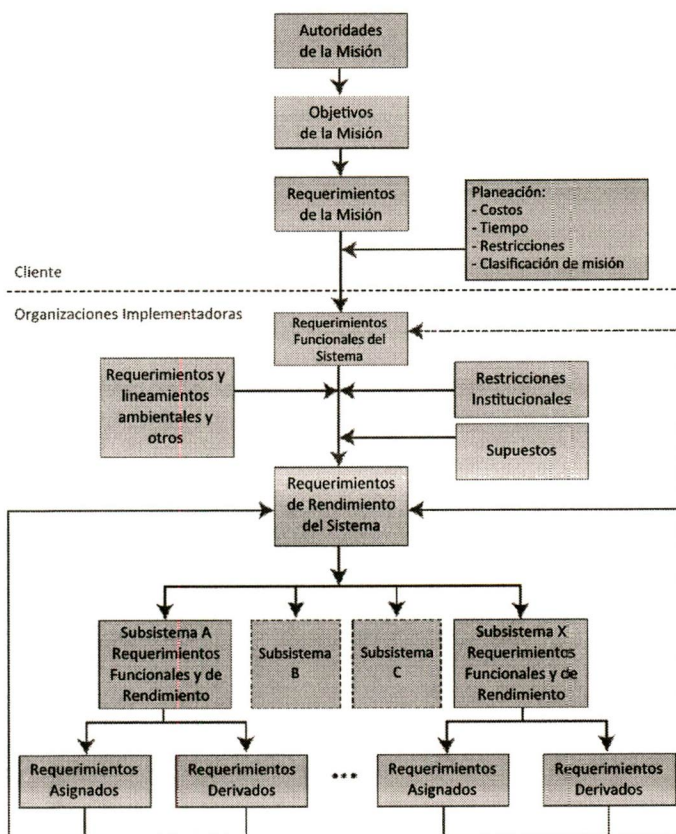


Figura 2.3. Secuencia y jerarquía para la definición de requerimientos
Fuente: National Aeronautics and Space Administration, 2007.

2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

2.1.4 INGENIERÍA DE SISTEMAS: IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN.

Una vez definidos los requerimientos, se comienza el proceso de implementación y para dar seguimiento es necesario verificar los resultados. A este proceso se le conoce como *Proceso V*, el cual permite asegurar que el sistema generado cumplirá con lo establecido en los requerimientos. Las fases del proceso V se representan en la figura 2.4.

La primera parte del Proceso V (conocida como SFR por sus siglas en inglés), construye y conceptualiza el sistema, se analizan los requerimientos, las funciones y las restricciones. En base a esta información, se generan las propuestas de diseño para todos los elementos, componentes, subsistemas y sistemas. En la segunda parte (PDR), se revisan estas propuestas y se generan las correcciones correspondientes para configurar el diseño final. El diseño final es desarrollado a detalle con planes de trabajo, planos, cotizaciones, árboles de modo de fallas, se actualizan riesgos y se llevan a cabo simulaciones. Finalmente se fabrican todos los elementos y se integran para conformar los sistemas y se preparan las pruebas de funcionamiento para verificar el cumplimiento de los requerimientos (Department of Defense, 2001).

En este trabajo se presentan los resultados de la configuración del diseño final del STCCP.

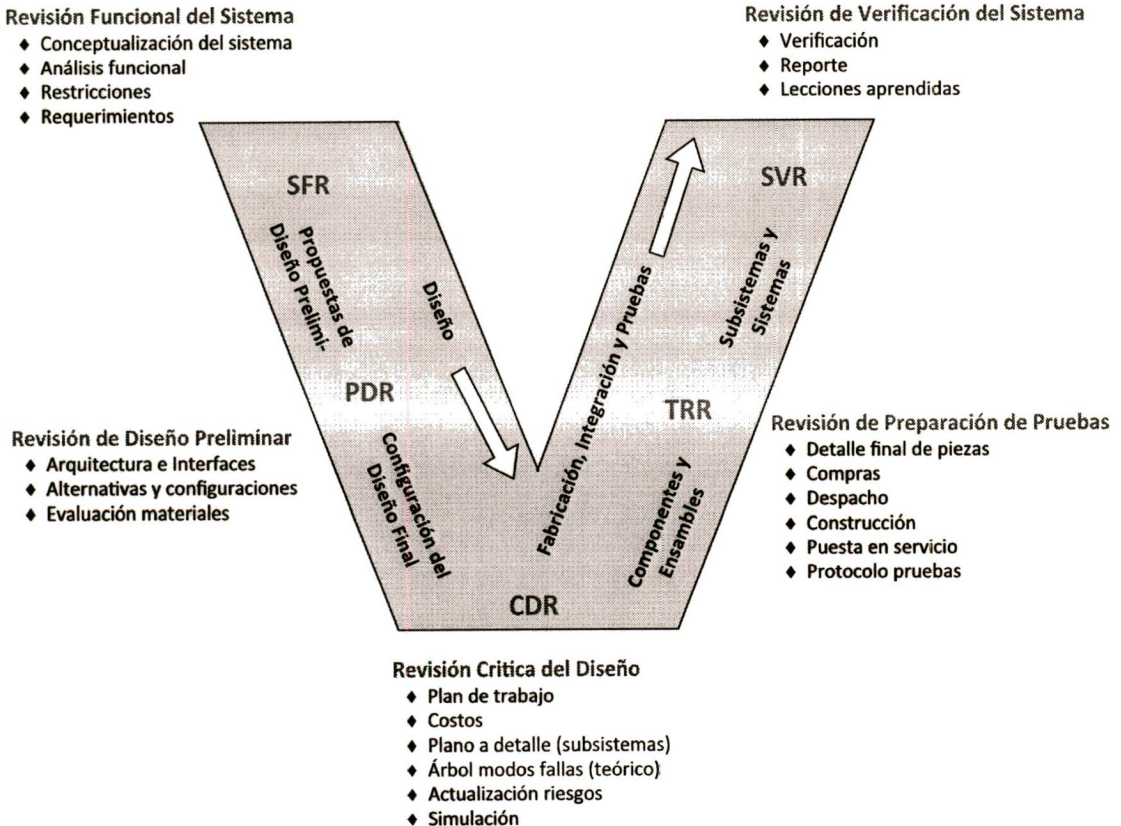


Figura 2.4. El Proceso V, es la guía para implementar y verificar los sistemas. Fuente: Department of Defense, 2001.

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

2.2.1 REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES DEL STCCP

Existen diversas aplicaciones en el mercado mexicano donde se requiere utilizar agua caliente o calor de proceso para llevar a cabo sus actividades cotidianas, sin embargo, las potencias que son requeridas en cada una de ellas son tan diversas que se hace muy complicado tratar de diseñar un Sistema Termosolar de Concentración de Canal Parabólico (STCCP) que satisfaga la demanda energética de cada aplicación específica.

Con este antecedente y derivado de los estudios realizados a diferentes clientes industriales, comerciales y residenciales (PowerGIE, 2013), se ha definido la cantidad promedio mínima de energía que debe entregar un STCCP, para aplicaciones con un rango de temperaturas de entre 70 a 200 °C. Como resultado se han definido los requerimientos para el funcionamiento del STCCP:

1. Captación de la componente directa de la energía solar por medio de un Micro Concentrador de Canal Parabólico (MCCP), incrementando la temperatura de un volumen de 90 litros de agua de 20 a 80 °C/m² por cada metro cuadrado de MCCP instalado, tomando como base un periodo de 4.5 horas de radiación solar, para una localidad donde los niveles de radiación global sobre el plano horizontal sean de 19 MJ en promedio anual.
2. Se considera que el cliente no cuenta con personal especializado para operar del STCCP, por lo que se debe contar con un panel de control de secuencia y monitoreo de variables, apoyado por un manual de operación.
3. Se requiere que el STCCP, pueda ser integrado con un sistema de calentamiento convencional de gas, diesel o eléctrico, a fin de asegurar el suministro de energía cuando el recurso solar sea escaso.
4. Las tuberías, bombas, válvulas y accesorios que son interconectados con los módulos MCCP deben funcionar a una presión promedio de 7 kg/cm² y máxima de 10 kg/cm². El rango de temperatura de trabajo es de -10 a 93 °C, considerando agua como fluido de trabajo y que deber evitarse la evaporación y condiciones de trabajo peligrosas.
5. El STCCP será alimentado a una tensión de 127 V en corriente alterna o mediante una fuente de 48 o 24 V en corriente directa.
6. La instalación del STCCP en algún proceso, debe representar un beneficio económico en comparación con no adquirir la tecnología. El valor económico de la unidad energética producida por el STCCP debe ser evaluada en un análisis de costo actual neto y comparado con el costo de energía consumida con el sistema convencional de calentamiento.

Estos requerimientos orientan el trabajo a pensar no solo en el diseño del módulo de Micro Concentración Solar de Canal Parabólico, sino también en los parámetros que deberán tener los subsistemas con los que tendrá interacción, y más aún, con los que completará todas las funciones del STCCP.

En este trabajo se han configurado subsistemas a modo de contar con un banco de pruebas que permitirá evaluar el funcionamiento del módulo MCCP.

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

2.2.2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA TERMOSOLAR (STCCP)

En la definición de un Sistema Termosolar de Calentamiento (STC), se debe considerar el tipo de colector solar, el calentador auxiliar y el principio operación.

Las configuraciones básicas que pueden presentarse en aplicaciones de calentamiento de agua se muestran en la figura 2.5. En el caso de este proyecto se ha seleccionado la configuración Activa Directa pero eventualmente podría ser utilizada como Activa Indirecta (Dwivedi, 2009).

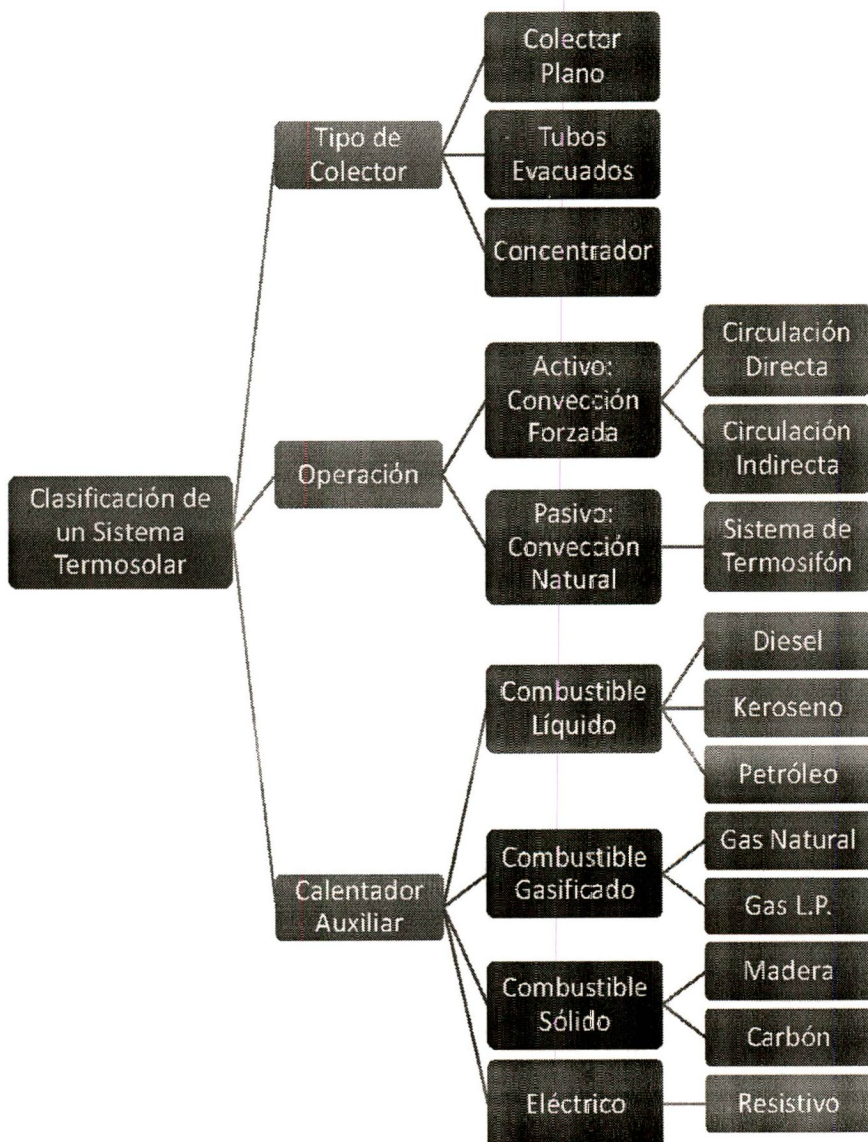


Figura 2.5. Clasificaciones de un Sistema Termosolar de Calentamiento (STC). Fuente: PowerGIE. 2013.

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

- ♦ **Operación Activa Directa:** La temperatura del fluido de trabajo se eleva al pasar a través del colector solar con ayuda de una bomba, posteriormente el fluido es utilizado directamente en el proceso final. Es posible utilizar un calentador auxiliar eléctrico o de gas.

La figura 2.6a muestra la configuración **Activa Directa**, que será utilizada para el desarrollo del STCCP, donde se bombea el fluido de trabajo a través del colector solar (en el presente trabajo el MCCP) y el tanque térmico o termotanque, elevando gradualmente la temperatura del fluido contenido. El fluido incrementa su energía interna y es utilizado directamente en el proceso final al culminar el ciclo de calentamiento que en nuestro caso es de 4.5 horas.

- ♦ **Operación Activa Indirecta:** La temperatura del fluido se incrementa al pasar a través del colector solar con ayuda de la bomba, se utiliza un equipo intercambiador para transferir la energía en forma de calor al proceso final.

En esta configuración se tiene la ventaja de evitar la congelación y la evaporación del fluido de trabajo y los componentes principales del STCCP. También es posible utilizar un calentador auxiliar eléctrico o de gas (Figura 2.6b).

Adicionalmente al contar con un circuito hidráulico cerrado entre el intercambiador y el MCCP, es posible utilizar una mezcla de agua y glicol propileno al 30% para evitar el congelamiento y aumentar la temperatura de ebullición. Es importante considerar el coeficiente de transferencia de calor dentro del intercambiador de calor para calcular la eficiencia total del sistema.

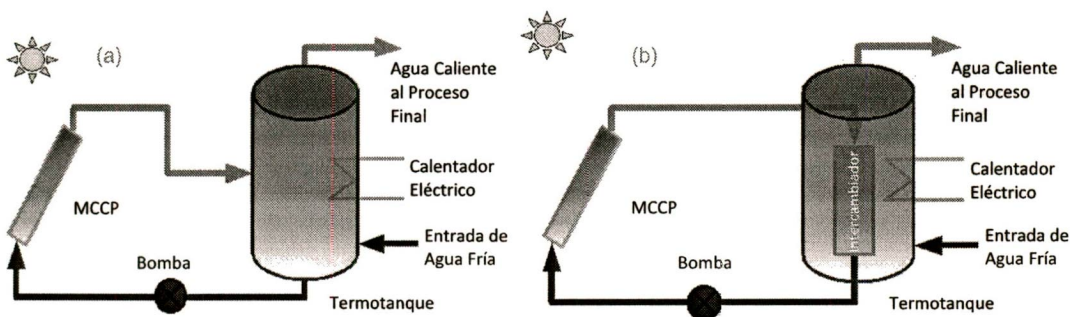


Figura 2.6. Operación: (a) Configuración Activa Directa (b) Configuración Activa Indirecta de un STC.

Fuente: Elaboración propia con información de Dwivedi, 2009.

Las necesidades de los usuarios finales determinan la forma en que se configura un sistema termosolar para calentamiento de alguna sustancia en particular.

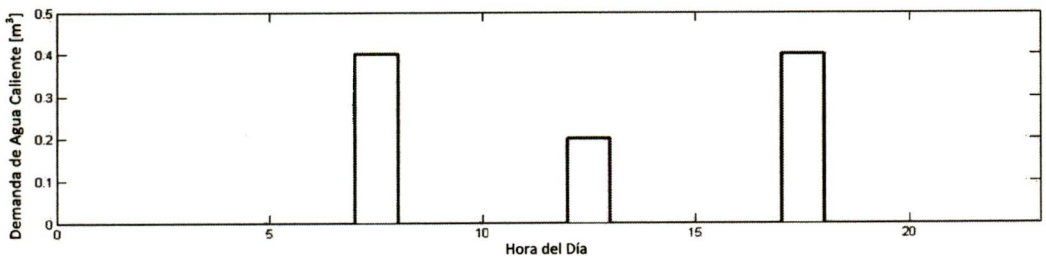
La selección de la configuración más apropiada depende de la demanda de energía, es decir, para el caso del agua caliente se debe considerar el volumen y la temperatura requerida dentro del termotanque para un periodo de tiempo determinado.

A este tiempo de utilización de la energía se le conoce como *Periodo de Descarga* de la energía y puede ser de servicio *continuo* o *intermitente* (Dwivedi, 2009).

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

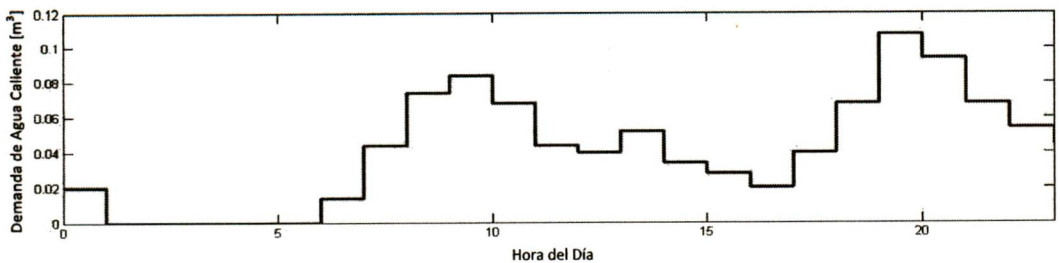
- ♦ **Descarga Intermitente con Alta Demanda:** como se aprecia en la gráfica 2.1, este proceso requiere de una alta demanda de agua caliente, de 0.4 m^3 a las 7 y 17 horas y una alta demanda de 0.2 m^3 a las 12 horas. En base a estos requerimientos, se debe dimensionar la capacidad del termotanque, así como el número de módulos MCCP. Un ejemplo clásico de esta configuración, es la requerida para las duchas utilizadas en un hotel en zonas templadas.

En caso de que las condiciones de radiación solar de la localidad de instalación o para los días que no se logre satisfacer los requerimientos de energía y temperatura para el área de instalación disponible, se considerará la instalación de una etapa de calentamiento auxiliar por gas o electricidad, la cual puede ser integrada en el termotanque. Esta aplicación se diseña en configuración **Activa-Directa**, puesto que el agua debe disponerse en una sola descarga durante un periodo corto de tiempo.



Gráfica 2.1. Perfil de descarga intermitente con alta demanda de agua caliente.

- ♦ **Descarga Continua con Baja Demanda:** la gráfica 2.2 representa un ejemplo de proceso de baja demanda de agua caliente y de descarga continua, que va desde 0.01 m^3 hasta 0.11 m^3 en un rango de 6 a 24 horas, teniendo un mínimo a las 17 horas y un máximo a las 19 horas. En base a estos datos, se dimensiona la capacidad del termotanque y su funcionamiento en conjunto con un intercambiador de calor. En la mayor parte de las aplicaciones de este tipo (por ejemplo la fabricación de productos alimenticios), el STCCP se considera únicamente como una etapa de pre-calentamiento hacia una caldera o quemador a gas. Esta aplicación se diseña en una configuración **Activa-Indirecta**, puesto que el agua debe disponerse de manera continua durante un periodo de tiempo prolongado.



Gráfica 2.2. Perfil de descarga continua con baja demanda de agua caliente.

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

En base a los requerimientos generales, las restricciones y a la conceptualización del STCCP, se especifican los subsistemas que lo integran y se representan de manera conceptual en la figura 2.7. Los subsistemas a su vez se dividen en elementos y estos en componentes.

En el análisis y desarrollo del STCCP es necesario describir a detalle el funcionamiento y operación de los subsistemas, elementos y componentes así como su interacción.

Para llevar a cabo el proceso de diseño se ha desarrollado una herramienta de software en MATLAB, que facilita el trabajo de cálculo así como la solución de los modelos matemáticos que rigen al STCCP (Figura 2.8).

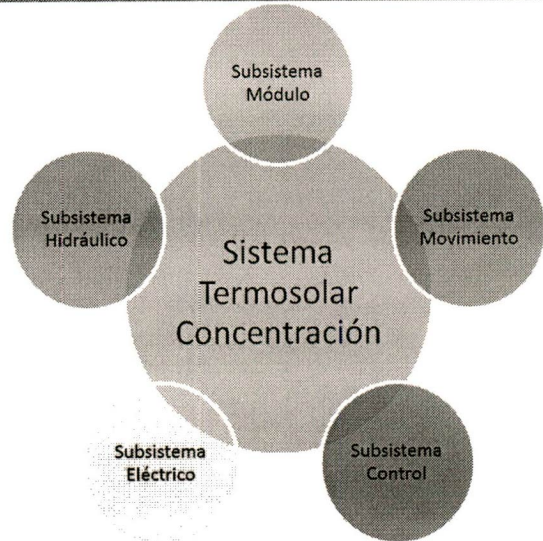


Figura 2.7. Diagrama conceptual de los subsistemas del STCCP.

Los modelos implementados en la herramienta, se han adoptado de trabajos desarrollados por investigadores e ingenieros mexicanos que han colaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, sobre Sistemas Termosolares de Concentración de Canal Parabólico.

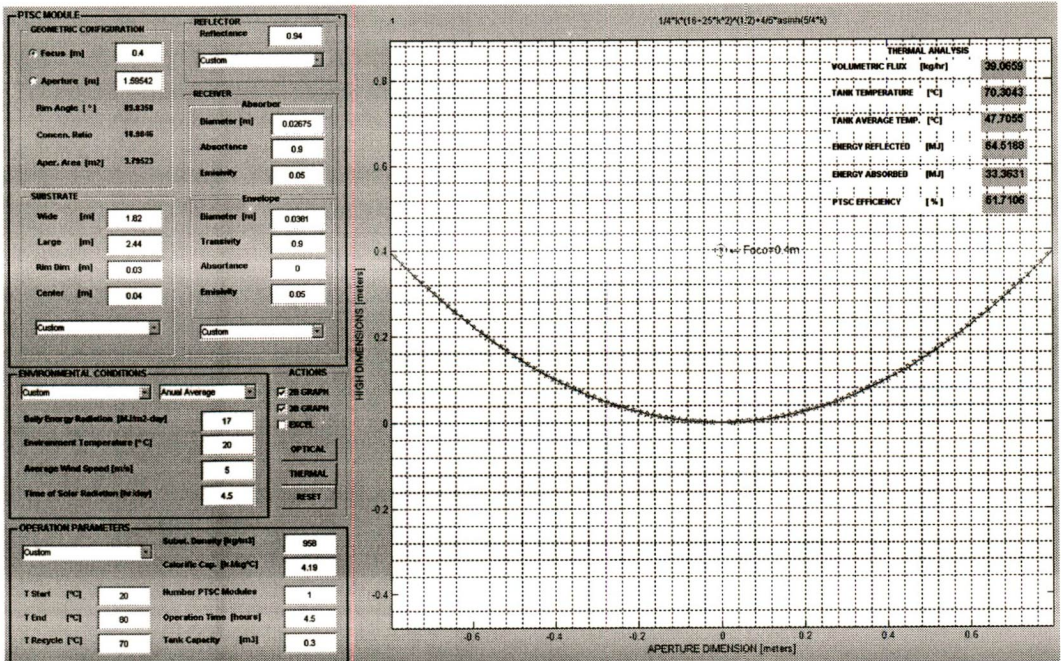


Figura 2.8. Herramienta desarrollada en MATLAB utilizada para el diseño del STCCP.

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

La figura 2.9 muestra un diagrama a detalle de la forma en que se configura el STCCP, y se mencionan los elementos que son de interés durante el análisis y desarrollo del diseño.

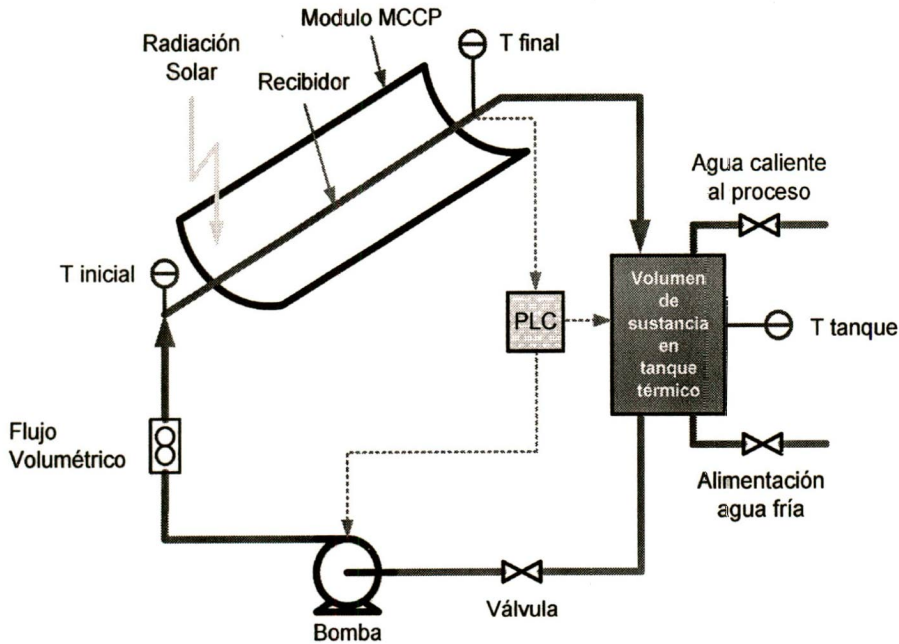


Figura 2.9. Elementos que intervienen en la operación del STCCP.

Parámetros de Operación: condiciones de operación para día promedio.

- ◆ **T inicial:** temperatura de la sustancia al iniciar de las operaciones de calentamiento.
- ◆ **T final:** temperatura de la sustancia en el tanque al finalizar la operación de calentamiento.
- ◆ **T retorno:** temperatura de la sustancia considerando pérdidas del circuito hidráulico.
- ◆ **Densidad del fluido:** densidad de la sustancia de trabajo.
- ◆ **Capacidad Calorífica:** capacidad calorífica de la sustancia de trabajo.
- ◆ **Número Módulos:** cantidad de módulos MCCP para la simulación.
- ◆ **Tiempo Operación:** tiempo de recirculación de la sustancia de trabajo.
- ◆ **Volumen Tanque:** volumen de sustancia en el tanque térmico.

La figura 2.10 muestra la sección **PARAMETROS DE OPERACIÓN** de la herramienta de MATLAB para configurar el circuito STCCP. La información de esta sección es indispensable para realizar cálculos con los modelos matemáticos de la herramienta de MATLAB.

OPERATION PARAMETERS		
Custom	Subst. Density [kg/m ³]	958
	Calorific Cap. [kJ/kg°C]	4.19
T Start [°C]	20	Number PTSC Modules
		1
T End [°C]	80	Operation Time [hours]
		4.5
T Recycle [°C]	70	Tank Capacity [m ³]
		0.3

Figura 2.10. Parámetros de operación del STCCP en la herramienta de MATLAB.

2.2 DEFINICIÓN DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS

La herramienta permite configurar las condiciones ambientales en las que opera el STCCP, por medio de mapas solares de radiación directa para México, es posible conocer el promedio diario de un mes en específico o el promedio diario anual, complementándose esta información con datos de la Temperatura Ambiente, Velocidad del Viento y las Horas Máximas de Sol (Figura 2.11).

Cada uno de estos parámetros son de fundamental relevancia en el modelo que rige el rendimiento total del STCCP. Por un lado la Radiación Directa y las Horas Máximas de Sol determinan la cantidad de energía que capta el MCCP, y la temperatura ambiente como la Velocidad del Viento determinan las pérdidas por radiación y convección al ambiente desde el receptor.

Condiciones Ambientales del lugar de instalación.

- ◆ **Energía de Radiación:** promedio diario para la localidad seleccionada (mensual o anual).
- ◆ **Temperatura Ambiente:** temperatura ambiente promedio (mensual o anual).
- ◆ **Velocidad del Viento:** velocidad del viento promedio (mensual o anual)
- ◆ **Horas Máximas de Sol:** número de horas de insolación promedio (seleccionado por el usuario).

Es importante señalar que los valores de Radiación fueron consultados en los mapas solares elaborados y actualizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Almanza, R.; Muñoz, F.; 1994), que durante varios años han venido contruyendo esta importante herramienta.

Los valores de temperatura ambiente y de las velocidades de viento fueron tomados de las estadísticas publicadas por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN), así como de otras fuentes encontradas en internet como el mapa proporcionado por la NASA, por lo que se recomienda hacer una selección adecuada de la información para otro estudio en específico.

Las horas máximas de Sol, es el tiempo en horas para el cual un valor mínimo de radiación incidente es alcanzado. Por ejemplo para el caso de la Ciudad de México, un valor típico de horas de máximas Sol es de 4.5 horas a una radiación promedio anual de 17 MJ/m², es decir, que para un estudio en específico o para diseñar un sistema solar, se puede considerar un valor de 17 MJ/m² para cualquier día del año durante en un tiempo de 4.5 horas.

ENVIRONMENTAL CONDITIONS	
Custom	Annual Average
Daily Energy Radiation [MJ/m ² -day]	17
Environment Temperature [°C]	20
Average Wind Speed [m/s]	5
Time of Solar Radiation [hr/day]	4.5

Figura 2.11. Configuración de las Condiciones Ambientales

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR

2.3.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SUBSISTEMA MÓDULO MCCP

La función principal del módulo MCCP es aprovechar la componente directa de la radiación solar para incrementar la temperatura de un volumen determinado de fluido, que en el caso particular de este proyecto es agua.

Los elementos del subsistema módulo MCCP se representan de manera conceptual en la figura 2.12 y de manera esquemática en la figura 2.13.

A continuación se presenta una breve descripción de los elementos del subsistema módulo MCCP y se indican su funcionalidad.

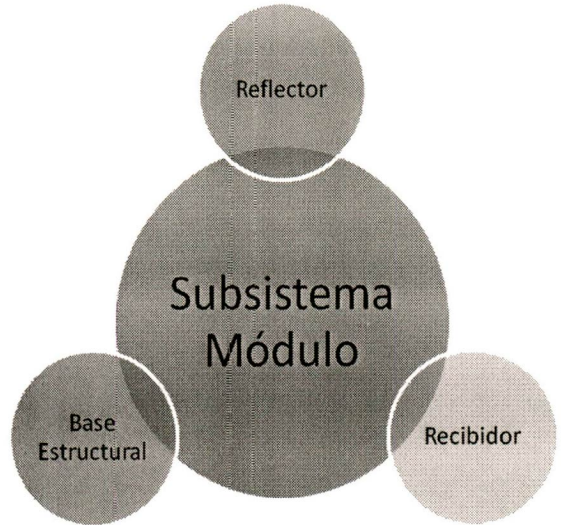


Figura 2.12. Diagrama de funciones de los elementos del módulo MCCP.

- ♦ **BASE ESTRUCTURAL:** Arreglo de estructuras metálicas, su función es dar soporte mecánico a los elementos reflector y receptor, permitiendo su instalación de manera estable sobre una superficie horizontal. De igual forma puede alojar al subsistema de movimiento.
- ♦ **REFLECTOR:** Arreglo estructural en forma de canal parabólico, su función principal es reflejar la componente directa de la radiación solar sobre el foco geométrico donde se aloja el receptor.
- ♦ **RECIPIENTE:** Arreglo de tubos concéntricos (envolvente y absorbedor) dispuestos en el foco geométrico de la parábola. Su función es captar la energía solar captada por el reflector y transmitirla hacia la sustancia de calentamiento que fluye dentro del tubo absorbedor.



Figura 2.13. Subsistema MCCP y sus elementos básicos. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR

2.3.2 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SUBSISTEMA MÓDULO MCCP

La sección de la herramienta de MATLAB llamada **MODULO CONCENTRADOR** permite configurar las características constructivas del MCCP, a continuación se dan algunas definiciones y se representan de manera gráfica (Figuras 2.14, 2.15 y 2.16) a fin de facilitar la terminología durante el desarrollo y uso de la herramienta.

A) Arreglo Geométrico: dimensiones del MCCP

- ♦ **Distancia focal:** distancia del vértice al foco de la parábola
- ♦ **Apertura:** distancia entre los bordes de la parábola
- ♦ **Ángulo de borde:** ángulo formado por el eje de simetría del MCCP y la línea que une el borde y el punto focal.
- ♦ **Concentración:** cociente entre el área de apertura colectora y el área del absorbedor.
- ♦ **Área de captación:** área del MCCP que intercepta la radiación solar.

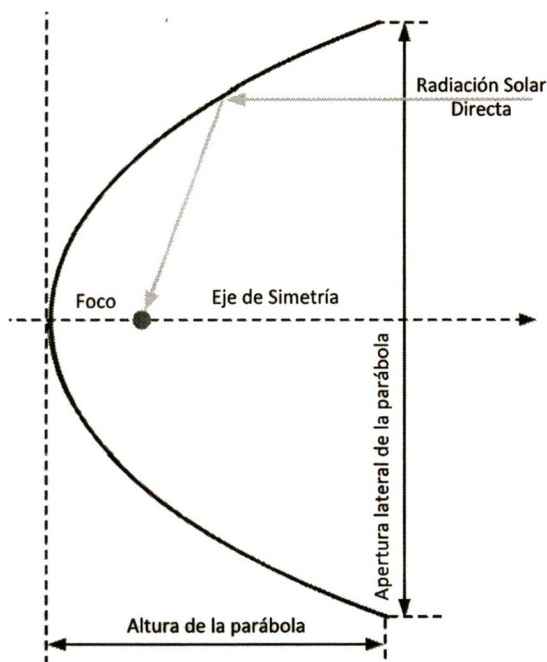


Figura 2.14. Componentes de una parábola.

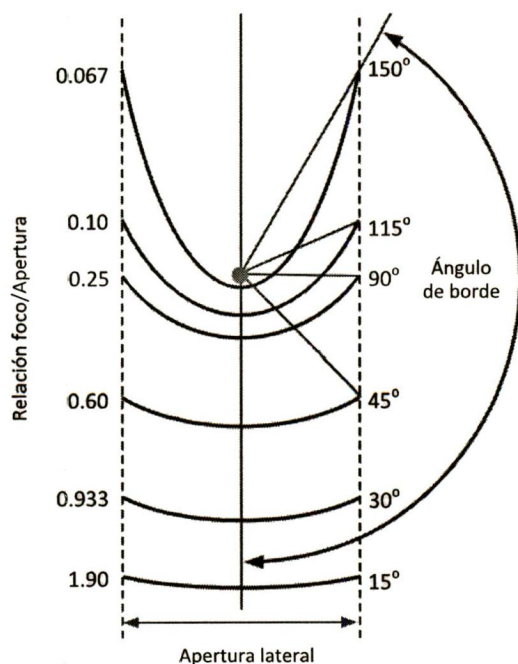


Figura 2.15. Ángulo de borde de la parábola.

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR

B) **Sustrato:** superficie donde se instala la superficie reflectiva.

- ♦ **Ancho:** ancho de la lámina que se emplea como sustrato.
- ♦ **Largo:** largo de la lámina que se emplea como sustrato.
- ♦ **Chapeado:** material sobrante en los extremos de la lámina.
- ♦ **Separación:** distancia entre láminas al centro del MCCP.

C) **Reflector:** propiedades de la superficie reflectiva.

Reflectividad (ρ): razón de radiación reflejada por el reflector a la radiación incidente sobre el mismo.

D) **Recibidor:** configuración del arreglo receptor.

- ♦ **Absorbedor:** tubo absorbedor de la energía solar.
 - ⇒ Diámetro del absorbedor
 - ⇒ **Absortividad (α):** % de radiación absorbida
 - ⇒ **Emitancia (ϵ):** % de radiación emitida
- ♦ **Envolvente:** tubo envolvente del absorbedor.
 - ⇒ Diámetro de la envolvente
 - ⇒ **Transmisividad (t):** % de radiación transmitida
 - ⇒ **Absortividad (α):** % de radiación absorbida
 - ⇒ **Emitancia (ϵ):** % de radiación emitida

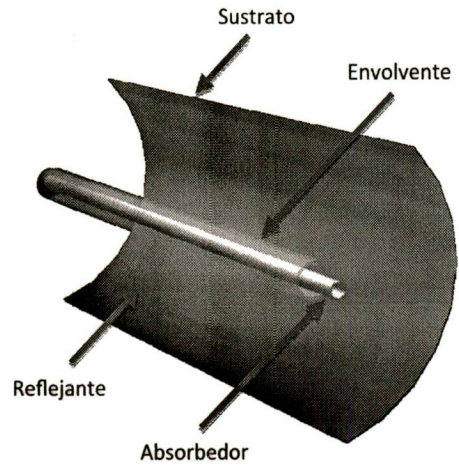


Figura 2.16. Componentes del elemento Reflector.
Fuente: PowerGIE. 2013.

En la figura 2.17, se muestra la sección **MODULO CONCENTRADOR**, donde se observan los valores configurados para el módulo que será utilizado en la simulación.

PTSC MODULE	
GEOMETRIC CONFIGURATION	
<input checked="" type="radio"/> Focus [m]	0.4
<input type="radio"/> Aperture [m]	1.6
Rim Angle [°]	
Concen. Ratio	
Aper. Area [m ²]	
SUBSTRATE	
Wide [m]	1.82
Large [m]	2.44
Rim Dim [m]	0.03
Center [m]	0.04
Custom	
REFLECTOR	
Reflectance	0.94
Custom	
RECEIVER	
Absorber	
Diameter [m]	0.02675
Absortance	0.9
Emissivity	0.05
Envelope	
Diameter [m]	0.0381
Transivity	0.9
Absortance	0
Emissivity	0.05
Custom	

Figura 2.17. Configuración del módulo MCCP en la herramienta de MATLAB.

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR

En el modelo que rige el desempeño óptico del MCCP, es decir, la razón entre la energía solar captada por el reflector y la que incide concentrada sobre el receptor, existen efectos ópticos que deben considerarse, por ejemplo: imperfecciones de la superficie reflectiva (reflectividad), opacidad de la envolvente de vidrio (transmisividad), propiedades intrínsecas del material del tubo absorbedor (absortividad y emisividad); así como por la inexactitud en el seguimiento solar. Estos parámetros se relacionan por el modelo de la ecuación 2.1.

$$Q_r = Q_d * \eta_{optica} = A_a G_d * \rho_R \gamma (\tau \alpha) \quad (2.1)$$

Donde:

Q_r = Radiación captada por el receptor, específicamente por el absorbedor, [J].

Q_d = Radiación directa incidente en el reflector del MCCP, [J].

η_{optica} = Rendimiento óptico del MCCP, [%].

A_a = Área de apertura del módulo MCCP, [m²].

G_d = Radiación solar directa por unidad de área sobre el plano horizontal, [W/m²].

ρ_R = Reflectividad de la superficie reflectiva, [%].

γ = Pérdidas por errores en el seguimiento de la trayectoria solar, [%].

τ = Transmisividad de la envolvente de vidrio, [%].

α = Absortividad del tubo absorbedor, [%].

Del modelo anterior, cabe señalar que los valores de ρ_R , γ , τ y α , toman valores decimales entre cero y uno en referencia al porcentaje que representan. Mientras que el área de apertura se calcula multiplicando la magnitud de la apertura lateral y el largo del reflector.

Para complementar el modelo matemático del módulo MCCP, es necesario integrar el análisis térmico (Ecuación 2.2), donde se incluyen las pérdidas de energía por convección y radiación en el receptor y que finalmente permiten conocer la energía útil transferida al fluido.

$$Q_u = Q_r - Q_{conv} - Q_{rad} = Q_r - A_r h_c (T_r - T_A) - \sigma \varepsilon (T_r^4 - T_A^4) \quad (2.2)$$

Donde:

Q_u = Energía en transferida al fluido desde el receptor en forma de calor, [J].

Q_r = Radiación captada por el receptor, específicamente por el absorbedor, [J].

Q_{conv} = Pérdidas de energía por convección del aire en el receptor, [J].

Q_{rad} = Pérdidas de energía por radiación del receptor al ambiente, [J].

A_r = Área desarrollada por el receptor, específicamente por el absorbedor, [m²].

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m²K].

T_r = Temperatura promedio del receptor, [K].

T_A = Temperatura ambiente, [K].

σ = Constante Universal de Stefan-Boltzmann = $1.3806504 \times 10^{-23}$, [J/K]

ε = Emisividad del receptor, incluyendo al absorbedor y a la envolvente, [%].

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR

Para complementar el modelo matemático del STCCP incluido dentro de la herramienta de MATLAB, es necesario conocer la configuración general del STCCP, definiendo las características del circuito hidráulico en las que será calentado el fluido de trabajo.

Estas características definen los parámetros de operación y para nuestro caso particular serán considerados: el volumen de sustancia que se calienta durante un ciclo de trabajo, el tiempo de operación del ciclo de trabajo, el número de módulos considerados en la simulación numérica, así como información referente a las propiedades físicas de la sustancia como la temperatura inicial, la capacidad calorífica y la densidad.

Con el planteamiento anterior, es posible generar un modelo completo del STCCP, donde se muestran las variables que intervienen en el balance energético (Figura 2.18).

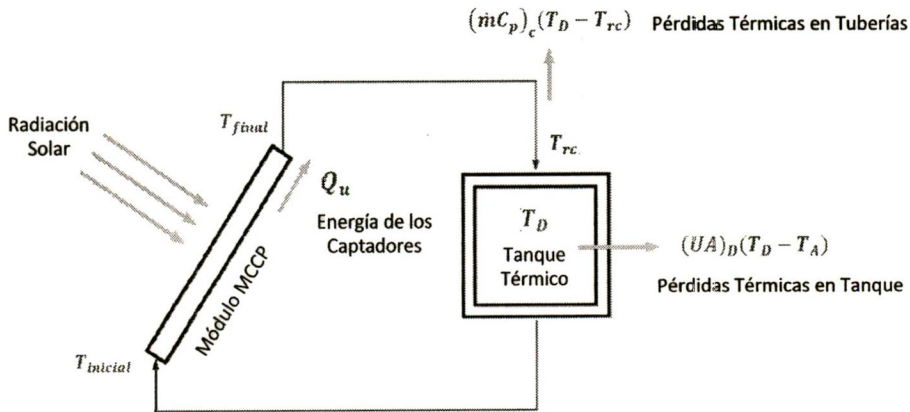


Figura 2.18. Balance energético del STCCP.

Anexando todos los términos involucrados en el diagrama, se tiene la ecuación 2.3.

$$(\dot{m}C_p)_D \frac{dT_D}{dt} = Q_u - (UA)_D(T_D - T_A) - (\dot{m}C_p)_c(T_D - T_{rc}) \quad (2.3)$$

Donde:

$(\dot{m}C_p)_D$ = Producto de la masa por el calor específico a presión constante del fluido, [J/K].

$\frac{dT_D}{dt}$ = Cambio de temperatura del fluido en el depósito respecto al tiempo, [K/s].

Q_u = Energía útil proporcionada por el módulo MCCP, [W].

$(UA)_D$ = Producto del coeficiente de transferencia de calor del fluido en el depósito hacia el ambiente por el área de transferencia de calor del depósito, [K/s].

T_D = Temperatura del fluido en el depósito, [K].

T_A = Temperatura ambiente, [K].

\dot{m} = Flujo del fluido extraído del depósito hacia la carga térmica, [kg/s].

T_{rc} = Temperatura del fluido al retornar al tanque termo, [K].

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR

2.3.3 RESULTADOS DEL DISEÑO DEL MCCP

Finalmente se procede a ejecutar los comandos para la generación tanto del perfil parabólico, como de la simulación de operación del sistema termosolar (Figura 2.19).

Una vez configuradas las tres secciones de la herramienta: *Módulo MCCP*, *Parámetros de Operación* y *Condiciones Ambientales*, se procede a ejecutar los comandos de cálculo para hallar la solución del STCCP en el orden siguiente:

1. Seleccionar los formatos requeridos para obtener las coordenadas del perfil parabólico, que pueden ser: gráfica 2D y/o gráfica 3D y/o lista de Excel.
2. Botón *OPTICO*: calcula la geometría del módulo MCCP, tomando en cuenta los parámetros configurados en la sección *MODULO MCCP*. Los resultados obtenidos se muestran en representación 3D en la figura 2.20 y en la representación 2D en la gráfica 2.3.
3. Botón *TÉRMI*CO: ejecuta cálculos y resuelve métodos numéricos tomando como base a los modelos de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, considerando las *Condiciones Ambientales*, la configuración del *Módulo MCCP* y los *Parámetros de Operación*. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 2.4.
4. Botón *RESET*: reinicia los valores de todos los parámetros.

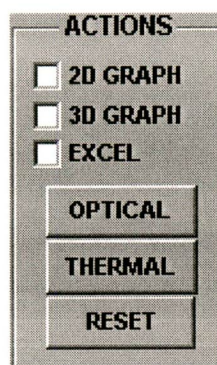


Figura 2.19. Comandos para cálculos del STCCP.

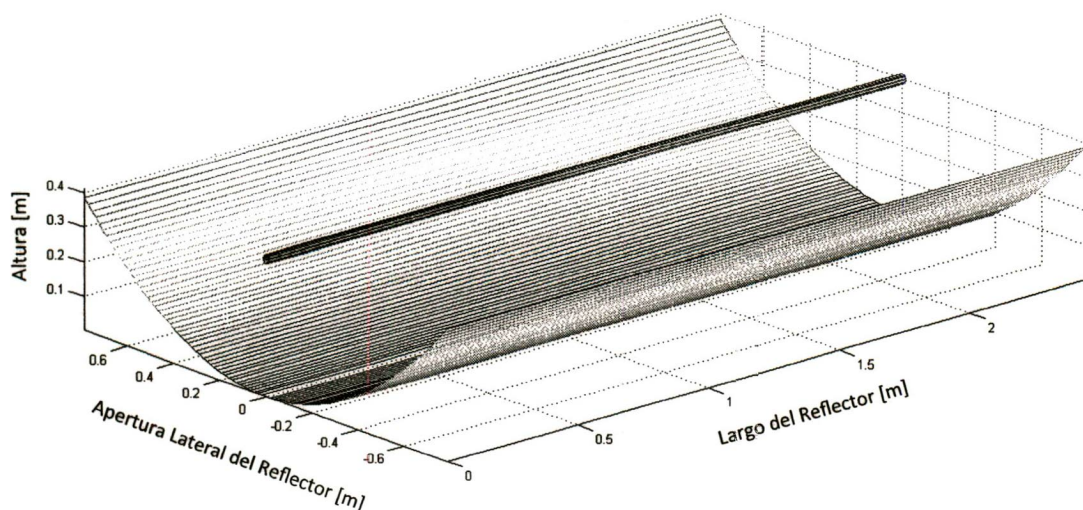
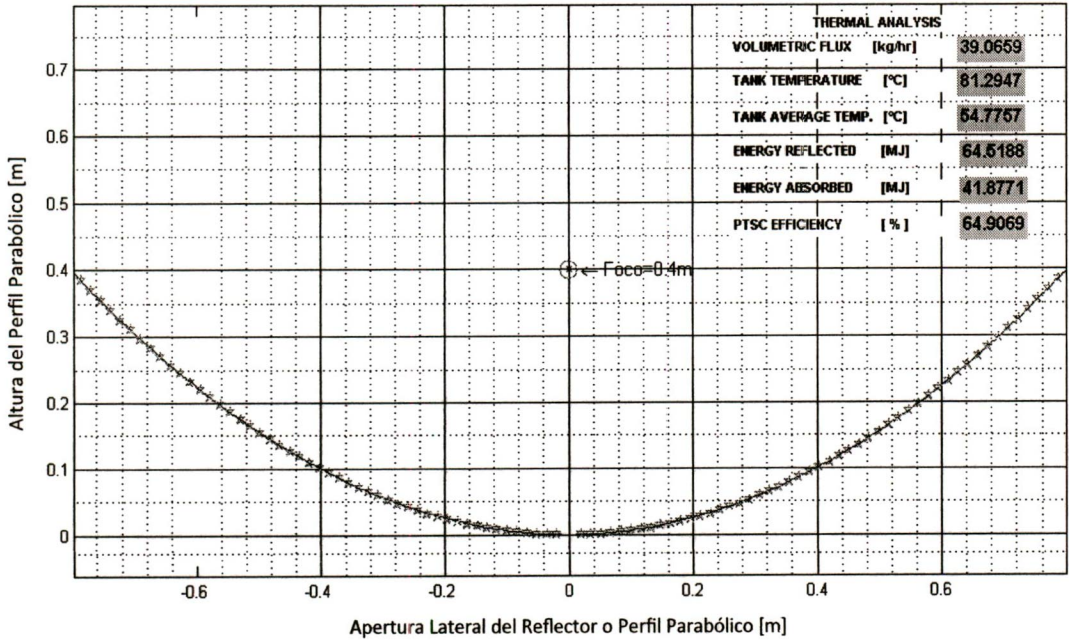
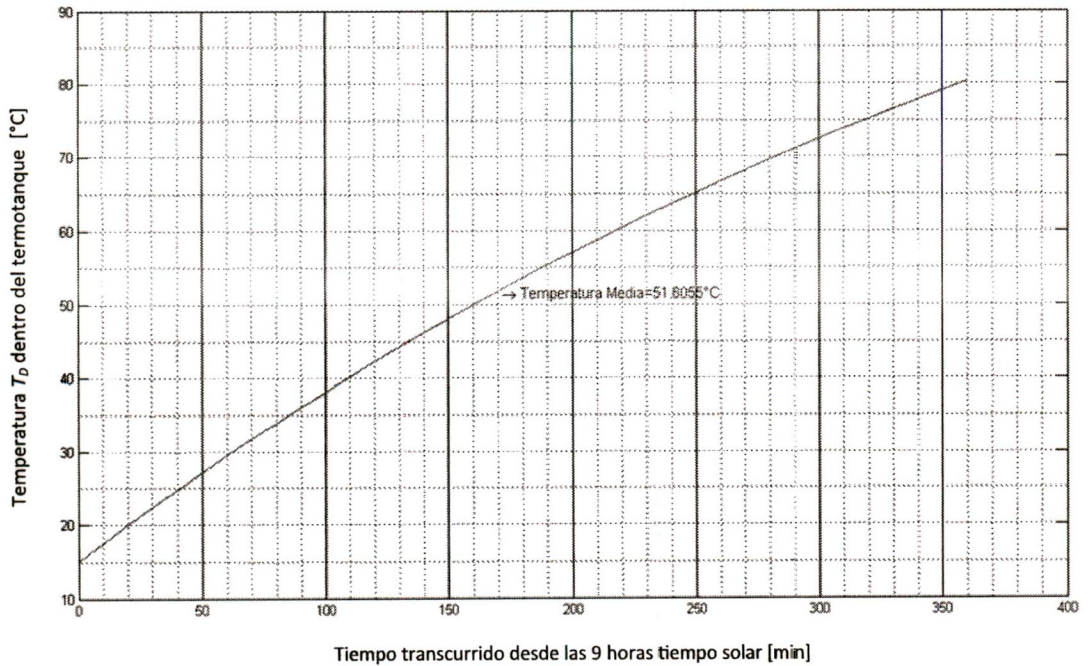


Figura 2.20. Perfil parabólico 3D del módulo MCCP resultado de la simulación en MATLAB.

2.3 SUBSISTEMA MÓDULO CONCENTRADOR



Gráfica 2.3. Perfil parabólico 2D del módulo MCCP resultado de la simulación en MATLAB.



Gráfica 2.4. Temperatura dentro del termostanque T_D , resultado de la simulación en MATLAB.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

La función principal del subsistema de movimiento es incorporar la función seguimiento de los rayos solares al *Reflector del Subsistema módulo MCCP*, con el objetivo de captar la mayor cantidad de energía radiante sobre el *elemento Recibidor*.

Los elementos del subsistema de movimiento se representan de manera conceptual en la figura 2.21.

A continuación se presenta una breve descripción de cada elemento, donde se indica su funcionalidad dentro del subsistema de movimiento.



Figura 2.21. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema de movimiento.

- ♦ **ACTUADOR:** Conocido como elemento final de control, es un dispositivo que al ser activado por algún tipo de energía, genera un cambio directo sobre la variable controlada que para el caso del sistema de movimiento es la posición angular. Existen diferentes tipos de actuadores, entre los que figuran motores de desplazamiento rotativo o lineal de todo tipo y válvulas accionadas por aire, aceite o eléctricamente. En el caso del sistema de movimiento se ha seleccionado un actuador del tipo motorreductor, que se compone de un motor de corriente directa y baja potencia, acoplado a un mecanismo de transmisión por engranes que aumentan el par de torsión y disminuyen la velocidad de giro en el eje de salida.
- ♦ **MECANISMO TRANSMISOR DE MOVIMIENTO:** El elemento transmisor de movimiento se encarga de adecuar las condiciones de movimiento a la salida del eje de giro del actuador, para interconectarlo al *elemento Reflector*. Existen diferentes tipos de mecanismos transmisores de movimiento, entre los que se pueden mencionar mecanismos de engranes de todo tipo, mecanismos de tornillo sin-fin y corona, mecanismos de poleas, etc.

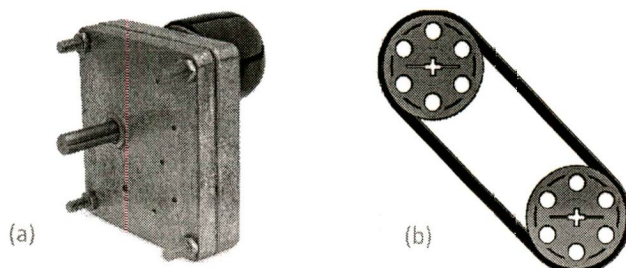


Figura 2.22. Ejemplos de elementos que componen al subsistema de movimiento
(a) Actuador: **Motorreductor**, (b) Mecanismo transmisor de movimiento: **tren de engranes**.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.2 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

Para obtener el máximo beneficio de la energía solar, los módulos MCCP deben ser alineados y seguir al sol con suficiente precisión para asegurar que la radiación solar incida en el foco. Cuanto más preciso sea el sistema de seguimiento, mayor energía será suministrada al fluido de trabajo.

En principio cualquier colector, incluso un colector plano podría ser provisto de movimiento y seguir al sol, sin embargo, en la práctica es más justificable integrar mecanismos de movimiento a colectores con un nivel de concentración mayor a 10.

Para un módulo MCCP, el mecanismo de seguimiento solar debe alinear perpendicularmente el plano recto de la superficie reflectora con la dirección de la radiación solar directa, un ligero error en el seguimiento solar provocará que los rayos solares no se enfoquen y por lo tanto la energía transferida al fluido disminuye.

Derivado de lo anterior, la principal ventaja de un modulo MCCP sobre un colector plano es que el flujo de energía por unidad de superficie de absorción es mayor, por lo que se reducen las pérdidas térmicas, lográndose alcanzar temperaturas más elevadas.

Los módulos MCCP pueden ser instalados para que giren con una orientación Este-Oeste o en orientación Norte-Sur (Figura 2.23), dependiendo de la selección, el movimiento angular varía en desplazamiento y velocidad de acuerdo a la gráfica 2.5.

La selección de la orientación dependerá de la cantidad de energía requerida a lo largo del día y a lo largo del año. La orientación Norte-Sur proporciona un mayor rendimiento energético en comparación con la orientación Este-Oeste. Sin embargo, la orientación Este-Oeste muestra una distribución más equitativa de la producción anual de energía.

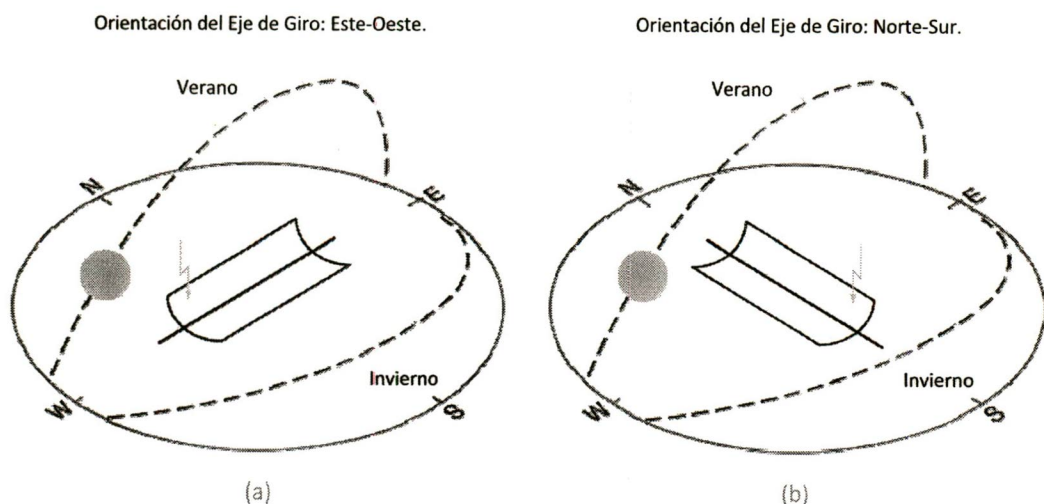
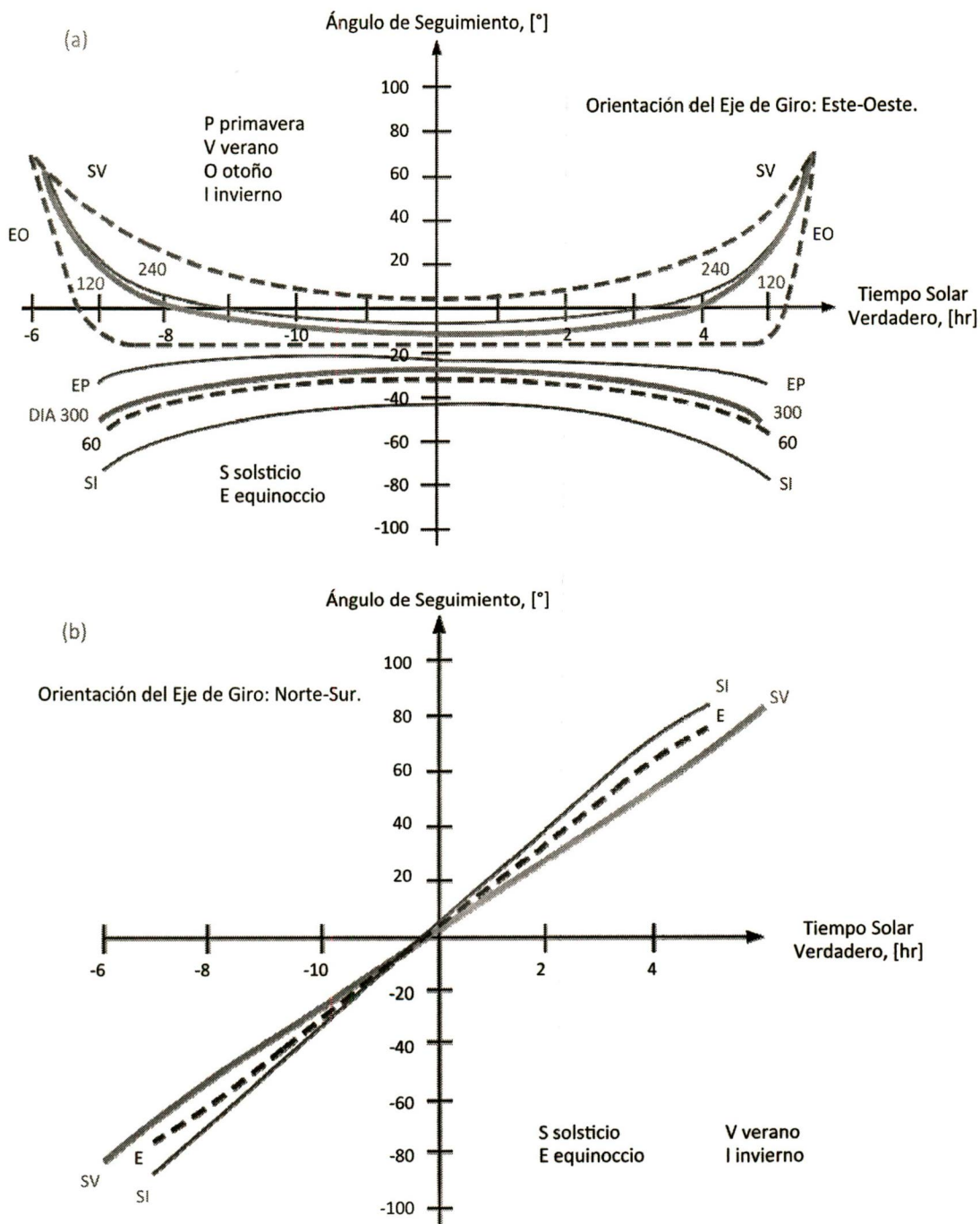


Figura 2.23. Instalación de un módulo MCCP con eje de giro en la dirección (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur.

Fuente: Elaboración propia con información de Almanza, R., 1997.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO



Gráfica 2.5. Curvas de seguimiento solar de un módulo MCCP con eje de giro en la dirección (a) Este-Oeste y (b) Norte-Sur. Fuente: *Elaboración propia con información de Almanza, R., 1997.*

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

Para seleccionar la mejor opción de actuador y de mecanismo transmisor de movimiento, es necesario considerar los requerimientos específicos del subsistema de movimiento:

- ◆ Elementos fabricados en línea (que no requieran fabricación especial).
- ◆ Proveedores locales de materiales, herramientas, mano de obra, etc.
- ◆ Elementos resistentes a las condiciones de intemperie.
- ◆ Bajos costes de mantenimiento.
- ◆ Precisión de seguimiento solar de 0.5° .
- ◆ Bajo consumo de energía, que pueda ser alimentado a 12 VCD.
- ◆ Capaz de mantener la posición angular sin alimentación permanente del actuador.
- ◆ Adaptable a la estructura de soporte del módulo M CCP.

Considerando los requerimientos planteados y comenzando en primera instancia la selección del elemento transmisor de movimiento, a continuación se presentan las alternativas posibles y posteriormente se elige la opción más adecuada (Figura 2.24).

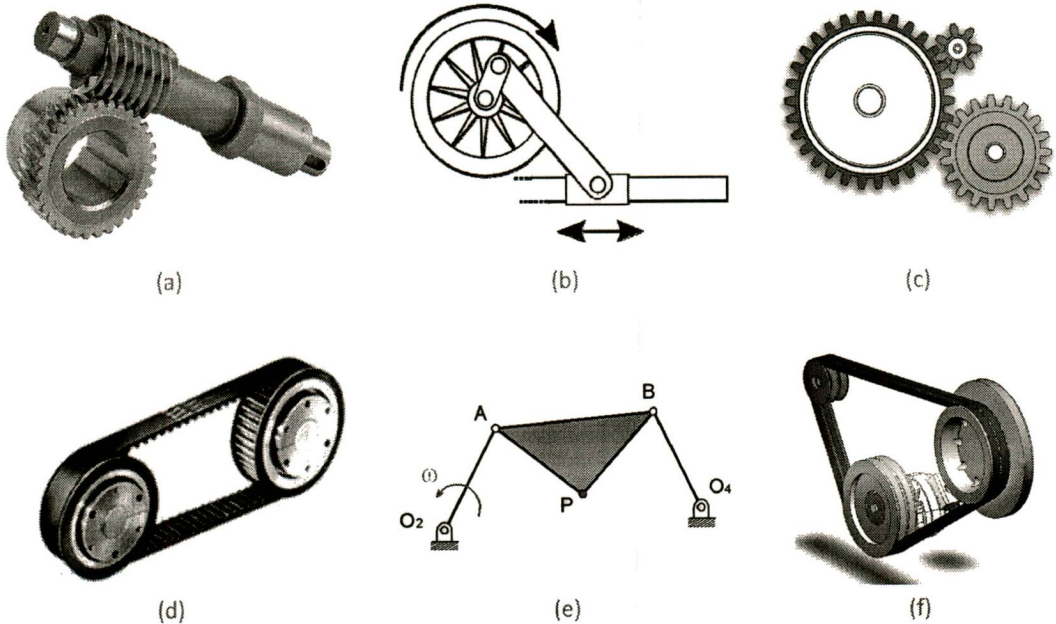


Figura 2.24. Opciones de mecanismos de transmisión de movimiento para el posicionamiento del módulo M CCP. (a) Sinfin-corona, (b) Biela-manivela, (c) Tren de engranes, (d) Bandas y poleas síncronas, (e) Mecanismo de 4 barras, (f) Bandas y poleas asíncronas. Fuente: PowerGIE, 2013.

Derivado de la investigación de mercado y del estudio de factibilidad para la implementación a nivel de producción, se elige generar el diseño del sistema de movimiento basado en mecanismos de poleas síncronas debido a que estas se fabrican en línea, existen proveedores locales, y a la vez puede ser implementado en combinación con un elemento actuador de bajo consumo de energía y que suministre la precisión requerida en el seguimiento solar.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3 DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO CON POLEAS SÍNCRONAS

El mecanismo de transmisión de movimiento se integra al eje de salida del actuador, con una polea dentada unida por una banda a una segunda polea que va montada en un eje de transmisión. Sobre el eje se monta una rueda de fricción que transmite la potencia al reflector y brinda la capacidad de mantener la posición angular sin requerir alimentación permanente del actuador.

2.4.3.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA MÁXIMA CONSUMIDA

La velocidad angular mínima requerida en el reflector está dada por la ecuación 2.4:

$$\omega = \left(\frac{1 \text{ rev}}{24 \text{ h}}\right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}\right) = \frac{2\pi \text{ rad}}{(24)(60)(60) \text{ s}} \quad (2.4)$$

Sin embargo, considerando la complejidad que representa diseñar un sistema de control de velocidad y de aceleración, la velocidad angular debe ser mayor a la calculada para asegurar que el sistema llegará a la posición deseada cuando un sistema de control ON-OFF lo indique.

Por lo tanto el posicionamiento se llevará a cabo aproximadamente cada 0.5° , activando y desenergizando el actuador cada 2 minutos aproximadamente en condiciones de plena carga. La velocidad del reflector del MCCP se puede expresar como:

$$\omega = \left[\frac{2\pi \text{ rad}}{(24)(60)(60) \text{ s}}\right] f_\omega \quad (2.5)$$

Donde:

ω = velocidad angular del reflector del MCCP, [rad/s].

f_ω = factor de aumento de velocidad, [%].

Por otro lado el par máximo requerido está dado por la ecuación 2.6:

$$\tau_{max} = f_s m g d_{cm} \sin \theta \quad (2.6)$$

Donde:

τ_{max} = par máximo requerido por el reflector del MCCP, [Nm].

m = masa del reflector del MCCP, $m = 35.7878 \text{ kg}$.

d_{cm} = distancia del eje de giro al centro de masa, $d_{cm} = 0.2656 \text{ m}$.

θ = ángulo máximo de inclinación del concentrador solar, con respecto a su eje de simetría, $\theta = 50^\circ$.

g = aceleración de la gravedad, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

f_s = factor de seguridad, $f_s = 1.1$.

Como resultado la potencia consumida para mover el reflector del MCCP es:

$$P_{max} = \omega \tau_{max} = \left[\frac{2\pi \text{ rad}}{(24)(60)(60) \text{ s}}\right] f_s f_\omega m g d_{cm} \sin \theta \quad (2.7)$$

Donde:

P_{max} = potencia máxima requerido para mover el reflector del MCCP, [W].

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3.2 SELECCIÓN DEL ACTUADOR: MOTORREDUCTOR

Para la elección del motor se supondrá un factor de seguridad f_s de al menos 10% sobre el valor calculado de potencia máxima, el ángulo de inclinación máximo se considera de $\theta = 50^\circ$, así como una eficiencia global del sistema de transmisión del 72% ($\eta = 0.72$).

Considerando un factor de aumento de velocidad angular f_w de 23, por lo tanto:

$$P_{motor} = \frac{P_{max}}{\eta} = 0.182533 \text{ W} \quad (2.8)$$

Tomando como referencia el valor de potencia del motor, se encuentra la opción que mejor se ajuste a los requerimientos planteados para el sistema de movimiento, encontrando un dispositivo motorreductor con las siguientes características:

- ♦ Marca: Dayton
- ♦ Modelo: 2L008
- ♦ Tipo de Motor: de Engranaje de Imán Permanente, Ventilado, Flecha paralela.
- ♦ Velocidad de Giro: 0.5 RPM Nominal
- ♦ Potencia de entrada: 0.2663 W (1/2800 HP)
- ♦ Corriente de Carga Total: 0.10 Amperes
- ♦ Tensión de Alimentación: 12 VCD
- ♦ Torsión a Carga Máxima: 5.6292 Nm (50 Lb-in).
- ♦ Cargas Suspendida: 133.4466 N (30 lb).
- ♦ Protección Térmica: Ninguna.
- ♦ Carcasa del Engranaje: Zinc troquelado
- ♦ Lubricación: Cargado con grasa.
- ♦ Engranajes: Cilíndricos de dientes rectos, Derlin y Acero.
- ♦ Cojinetes: Chumacera de bronce en la carcasa y en el motor.
- ♦ Montaje: Todas las posiciones.
- ♦ Rotación: Reversible
- ♦ Ambiente: 40 °C
- ♦ Relación de engranaje: 7,189:1

Suponiendo una eficiencia aproximada del motor del 70%, se tiene que la potencia de salida del eje del motor será dada por:

$$P_{salida-motor} = \left(\frac{1}{2,800}\right) \left(745.7 \frac{W}{HP}\right) (0.7) = 0.186425 \text{ W} \quad (2.9)$$

Debido a que la potencia de salida en el eje del motor es mayor a la requerida, se concluye que se ha seleccionado una opción adecuada de motorreductor.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3.3 INTEGRACIÓN DE ELEMENTOS DEL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

Para comprender la integración del subsistema de movimiento al módulo MCCP, en la figura 2.25 se indica la forma en que se acoplarán el elemento reflector con la base estructural y con el subsistema de movimiento.

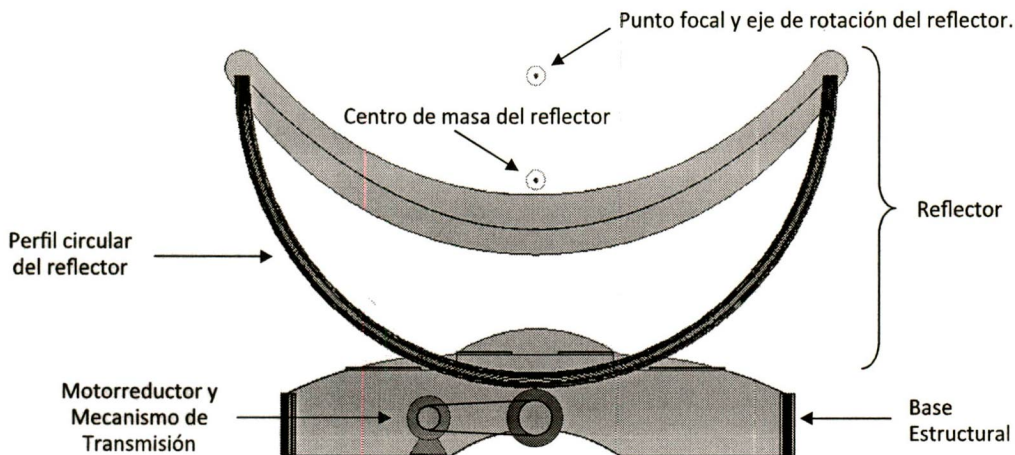


Figura 2.25. Bosquejo de la integración del reflector con la base y el subsistema de movimiento.

A continuación se presenta en detalle las partes del subsistema de movimiento que permitirá desarrollar un análisis mecánico para el dimensionamiento de las poleas sincronas (Figura 2.26).

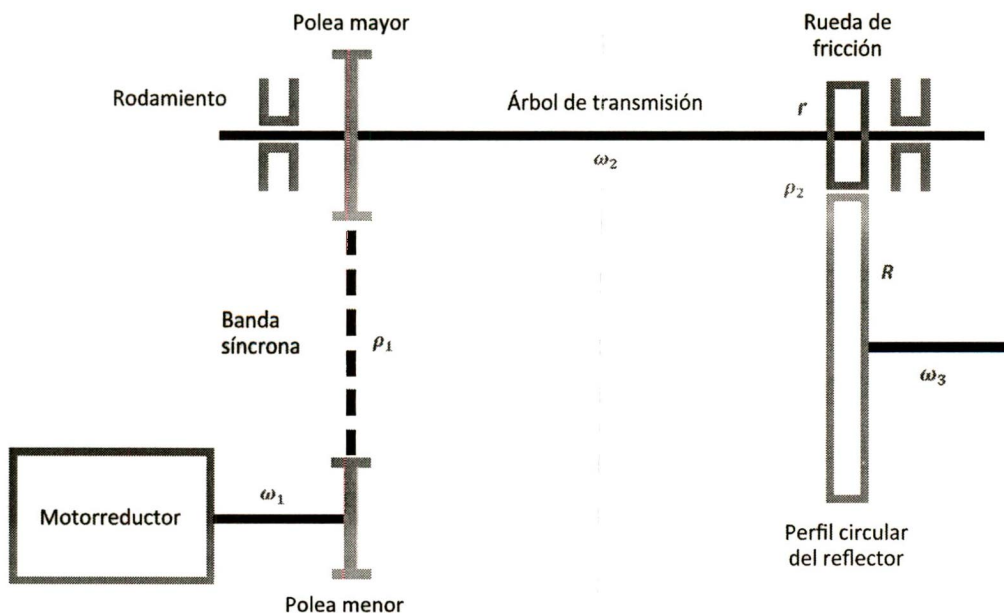


Figura 2.26. Diagrama conceptual detallado del subsistema de movimiento.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3.4 DISEÑO DEL MECANISMO TRANSMISOR DE MOVIMIENTO

Tomando en cuenta que la relación de velocidades máxima recomendada para mecanismos de ruedas de fricción es de 10, es posible determinar el tamaño de la rueda de fricción r , definiendo primeramente el radio del perfil circular del reflector R .

$$\frac{R}{r} = 10 \quad (2.10)$$

$$R = 0.8m; \quad r = 0.008m \quad (2.11)$$

De los catálogos de rodajas de uso industrial, se selecciona una rueda de 0.0762 m de radio, fabricada en materiales de poliuretano resistente a la intemperie, con la cuál se obtiene una relación de velocidades ρ_2 entre la rueda de fricción y el perfil circular del reflector.

$$\rho_2 = \left(\frac{0.8m}{0.0762m} \right) = 10.4986 \quad (2.12)$$

2.4.3.5 CÁLCULO DE VELOCIDADES ANGULARES.

De los datos de fábrica del motorreductor, la velocidad de salida en el eje ω_1 , se expresa de manera angular como sigue:

$$\omega_1 = \left(\frac{1 \text{ rev}}{2 \text{ min}} \right) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = \frac{\pi}{60} \text{ rad/s} \quad (2.13)$$

Esta velocidad angular es pequeña en relación con la potencia máxima que puede entregar el motorreductor, por lo que se considera un factor de velocidad para aprovecharse al máximo $f_\omega = 23$. Sustituyendo en la ecuación 2.5, la velocidad de rotación del reflector ω_3 .

$$\omega_3 = \left[\frac{2\pi \text{ rad}}{(24)(60)(60) \text{ s}} \right] f_\omega = \left[\frac{2\pi \text{ rad}}{(24)(60)(60) \text{ s}} \right] [23] = \frac{\pi}{1878.2608} \text{ rad/s} \quad (2.14)$$

Derivado de este resultado, al tener una velocidad angular constante y seguir al Sol con una precisión de 0.5° , el reflector obtendrá la posición deseada en aproximadamente 5.2174 segundos, que es un tiempo aceptable para poder controlar al actuador en modo ON-OFF.

$$\rho_2 = \frac{\omega_2}{\omega_3} \quad (2.15)$$

$$\omega_2 = \rho_2 \omega_3 = (10.4986) \left(\frac{\pi \text{ rad}}{1878.2608 \text{ s}} \right) = \frac{\pi \text{ rad}}{178.9043 \text{ s}} \quad (2.16)$$

Con este resultado es posible conocer la relación de velocidades entre las poleas sincronas, y con esto poder plantear las dimensiones de las mismas de la siguiente forma.

$$\rho_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\frac{\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}}}{\frac{\pi \text{ rad}}{178.9043 \text{ s}}} = \frac{178.9043}{60} = 2.8968 \approx 3 \quad (2.17)$$

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3.6 CÁLCULO DE PARES DE TORSIÓN

Hasta ahora se conocen las relaciones de velocidad angular de las poleas y ruedas de fricción, también se conoce la velocidad angular del motor, con esta base, es posible obtener los pares de torsión en el árbol, el motor y en el reflector del módulo MCCP.

Considerando que el par de torsión máximo necesario para hacer girar el reflector del módulo MCCP corresponde al ángulo máximo de diseño que es de $\theta = 50^\circ$, por lo tanto sustituyendo valores en la ecuación 2.6 se tiene:

$$\tau_{max} = (1.1)(35.7878kg)(9.81 m/s^2)(0.2656m) \sin 50^\circ = 78.5741Nm \quad (2.18)$$

La potencia máxima consumida se obtiene sustituyendo valores en la ecuación 2.7.

$$P_{max} = \left(\frac{\pi}{1878.2608} \text{ rad/s}\right)(78.5741Nm) = 0.1306W \quad (2.19)$$

Considerando la eficiencia de la transmisión de movimiento por ruedas de fricción $\eta_2 = 80\%$, entonces la potencia consumida en la rotación del árbol P_2 está dada por la ecuación 2.20.

$$P_2 = \frac{P_{max}}{\eta_2} = 0.1632W \quad (2.20)$$

Como resultado el par de torsión en el árbol de transmisión:

$$\tau_2 = \frac{P_2}{\omega_2} = 9.3552Nm \quad (2.21)$$

La eficiencia del sistema de transmisión de movimiento a través de poleas y bandas síncronas es de $\eta_1 = 90\%$, por lo que la potencia de salida en el eje del motor está dada por la ecuación 2.22.

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_1} = 0.1814W \quad (2.22)$$

Resultando que el par de torsión en el eje del actuador será el siguiente.

$$\tau_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = 3.4645Nm \quad (2.23)$$

2.4.3.7 SELECCIÓN DE BANDAS Y POLEAS

De los catálogos industriales de bandas y poleas, se seleccionan elementos de potencia con alta precisión, siendo el proceso de diseño el siguiente:

1. *Determinación del par de diseño*: se elige un factor de seguridad de 1.2, y un factor de fábrica por lo que el par de diseño Q [Nm] es:

$$Q = (1.2)(8.85)\tau_1 = 36.7930Nm \quad (2.24)$$

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2. *Determinación del paso de la banda y de las poleas:* dentro del catálogo industrial de bandas y poleas se elige el paso de 9 mm, y en combinación con la relación de velocidades de las poleas de $p_1 = 3$, se elige la siguiente combinación de poleas:

Polea menor de 24 dientes: P24-5M-09-AL

Polea mayor de 72 dientes: P72-5M-09-AL

Es conveniente aclarar que el barreno de la polea menor se elige de un tamaño adecuado que coincida con el tamaño del eje del motor. En cuanto al tamaño del barreno de la polea mayor, este dependerá del cálculo del diámetro del árbol.

3. *Determinación de la longitud de la banda y la distancia entre centros:* considerando a d como el diámetro de paso de la polea menor [m], entonces la distancia aproximada entre centros I_a está determinada por la ecuación 2.25.

$$I_a = 5d = (5)(0.0382m) = 0.1910m \quad (2.25)$$

La longitud aproximada de la banda LB_a está dada por la ecuación 2.25, tomando en cuenta el diámetro de paso de la polea mayor D .

$$LB_a = 2I_a + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4I_a} = 0.6295m \quad (2.26)$$

La longitud comercial que más se aproxima a este cálculo corresponde al modelo 635-5M, que tiene una longitud de 0,635m. Debido a esta diferencia de 0,0055m, se realiza una corrección de distancia entre centros de las poleas DC_c mediante las ecuaciones 2.27 y 2.28.

$$k = 4LB_c - 2\pi(D + d) \quad (2.27)$$

$$DC_c = \frac{k + \sqrt{k^2 - 32(D - d)^2}}{16} = 0.1937m \quad (2.28)$$

4. *Determinación del ancho de la banda:* considerando la información del fabricante se observa que el par máximo soportado por la polea menor es de 36.9Nm a una velocidad angular de 10RPM, este par es ligeramente mayor al par de diseño Q utilizando una banda de 9mm de ancho y una longitud de banda $LB_a = 0,635m$. Para que la banda transmita la potencia necesaria, el número de dientes en contacto entre la polea menor y la banda TM debe ser al menos de 6 dientes, y para verificarlo se calcula en ángulo de contacto AC .

$$AC = 180^\circ - \frac{60(D - d)}{DC_c} = 156.3465^\circ \quad (2.29)$$

$$TM = \frac{AC(n)}{360^\circ} = \frac{AC(24)}{360^\circ} = 10.4231 \quad (2.30)$$

Debido a que el número de dientes de contacto es superior al mínimo requerido, se corrobora que se ha realizado una buena selección de poleas y bandas.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3.8 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN

En lo que respecta al cálculo del diámetro del árbol de transmisión es necesario mencionar que existen 4 pruebas que deben ser llevadas a cabo:

1. Comprobación de rigidez lateral.
2. Comprobación de rigidez torsional.
3. Comprobación de resistencia.
4. Cálculo de la velocidad crítica.

Cabe mencionar que para árboles de longitud corta como el aplicable en este caso, el cálculo que determina el diámetro más grande es el cálculo por rigidez torsional, el resto de los métodos darán como resultado diámetros de menores dimensiones

En lo que respecta al material de construcción, se ha seleccionado acero SAE1040 estirado en frío con un acabado rectificado. Se pueden utilizar otros materiales diferentes al acero, sin embargo, eso tendrá como consecuencia un cambio considerable en el tamaño del diámetro. Cabe señalar que el acero SAE1040 tiene poca resistencia a la corrosión, por lo que es necesario considerar su aislamiento de la intemperie para prolongar su vida útil.

2.4.3.9 CÁLCULO POR RIGIDEZ TORSIONAL.

En el cálculo del diámetro del árbol por rigidez torsional la deformación máxima permisible es de $4,36 \times 10^{-3} \text{ rad/m}$, por lo tanto se tienen las ecuaciones 2.31 y 2.32.

$$\frac{M_t}{GJ} = 4.36 \times 10^{-3} \text{ rad/m} \quad (2.31)$$

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (2.32)$$

Donde:

M_t = momento de torsión del árbol, $M_t = \tau_2 = 9.3552 \text{ Nm}$.

G = módulo de rigidez del Acero SAE1040, $G = 7.7337 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$.

J = momento polar de inercia de la sección transversal del árbol, $[\text{m}^5/\text{rad s}]$.

d = diámetro mínimo del árbol de transmisión, $[\text{m}]$.

Sustituyendo los valores M_t y G y la ecuación 2.32 en la ecuación 2.31, y despejando d de la ecuación resultante se tiene:

$$d = 0.0231 \text{ m} \quad (2.33)$$

En cuanto a la morfología del árbol, deberá tener escalonamientos para la sujeción de todos los elementos y considerar que el diámetro máximo del árbol podrá tener una tolerancia de $\pm 20\%$.

Longitud del árbol de transmisión dependerá de las dimensiones del ancho de las poleas, la rueda de fricción y rodamientos.

2.4 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

2.4.3.10 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Los rodamientos se eligen con base en el tipo y la magnitud de la carga que soportan. En este caso la carga equivalente P_u es calculada en base a la carga radial y en la carga axial, dando por resultado $P_u = 240 \text{ N}$. Considerando un factor de seguridad del 10%, se elige un rodamiento con un $P_u = 280 \text{ N}$, que corresponden a una carga dinámica $C = 12.7 \text{ kN}$ y una carga estática $C_o = 6.55 \text{ kN}$.

Debido al tipo de montaje requerido, se elige un rodamiento con montaje lateral con diámetro de taza interno $d = 19.05 \text{ mm}$ y un ancho $B = 31 \text{ mm}$.

2.4.4 RESULTADOS DEL DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

En esta parte se presenta un plano donde es posible visualizar la relación dimensional entre los elementos del subsistema de movimiento, y servirá como referencia para su implementación al módulo M CCP y poder proveer de movimiento al elemento reflector.

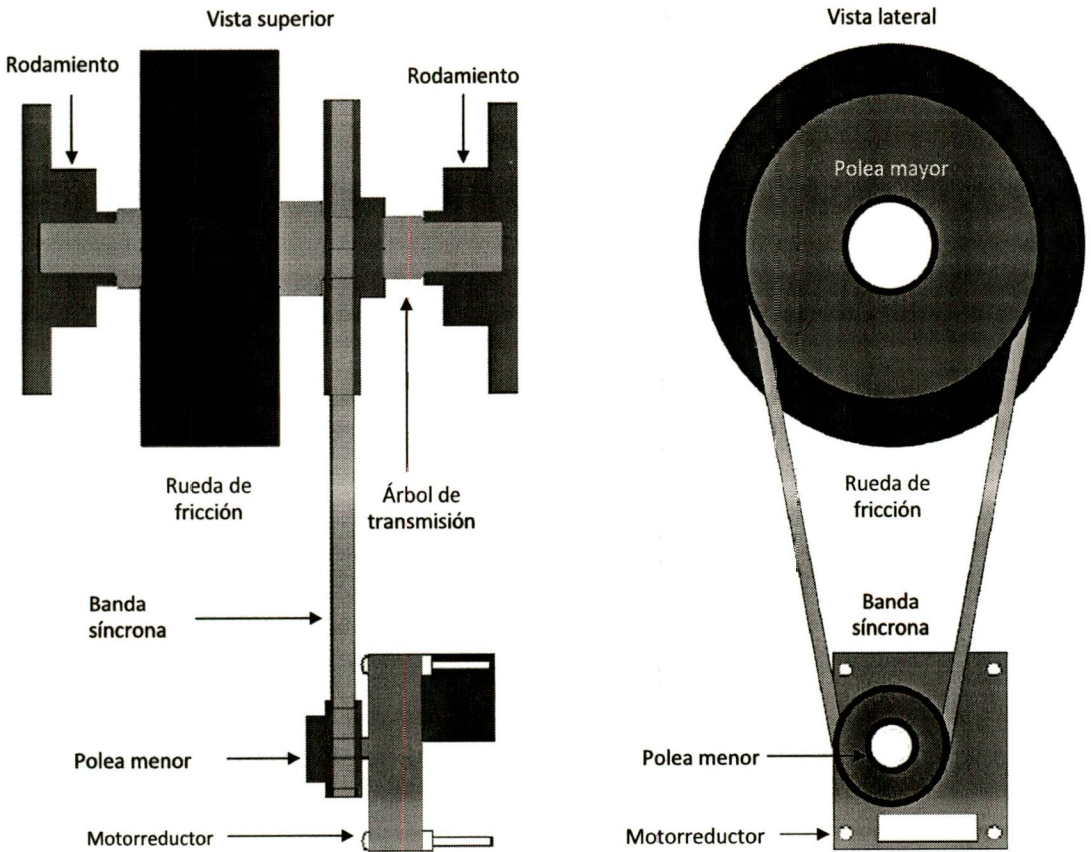


Figura 2.27. Plano del subsistema de movimiento.

2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

2.5.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SUBSISTEMA HIDRÁULICO

La función principal del subsistema de hidráulico es interconectar el termotanque con el módulo M CCP; a fin de circular de manera forzada el fluido de trabajo entre ambos elementos y aumentar de manera gradual la temperatura del fluido.

La interconexión está integrada por las tuberías, válvulas, bombas y los conectores, que por sus características permiten que el STCCP sea funcional y seguro.

Los elementos del subsistema hidráulico se representan de manera de diagrama en la figura 2.28.

A continuación se presenta una breve descripción de cada elemento, indicando su funcionalidad en el subsistema hidráulico.

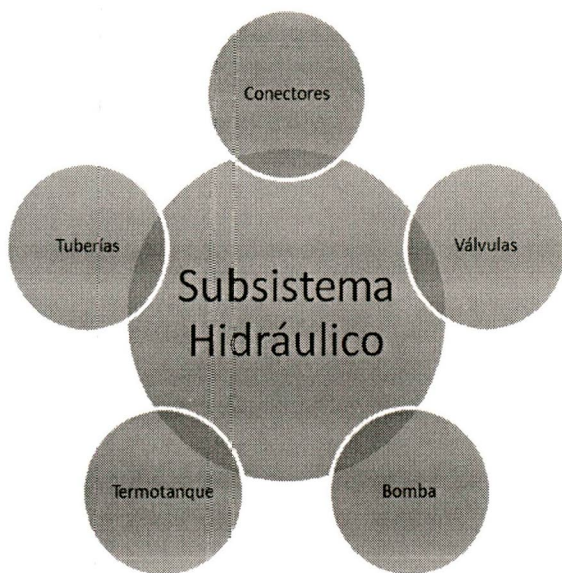


Figura 2.28. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema hidráulico.

- ♦ **TERMOTANQUE:** Su función principal es almacenar y conservar la energía de un volumen de fluido, el cual es calentado por los módulos M CCP, manteniendo las condiciones de operación en niveles seguros para los usuarios, operarios y otros elementos del sistema. Físicamente está construido por tanque metálico insertado dentro de otro tanque y separados por una capa de material aislante de calor. Su diseño constructivo permite mantener el calor añadido a la sustancia durante el proceso de calentamiento por un periodo de tiempo determinado.
- ♦ **VÁLVULAS:** En general estos elementos cumplen la función de regular, interrumpir o establecer el flujo de fluido en una tubería, asegurando que el flujo tenga un sentido determinado a través del ducto, también permiten expulsar vapores o aire atrapado dentro del circuito hidráulico.
- ♦ **BOMBA RECIRCULADORA:** Es un elemento compuesto por un actuador (regularmente un motor eléctrico) acoplado a un propulsor hidráulico. Su función principal es transmitir energía al fluido de trabajo a fin de recircularlo desde el termotanque hacia los módulos M CCP.
- ♦ **TUBERÍAS:** Conjunto de ductos que cumplen la función de interconectar todos los elementos del subsistema hidráulico y al proceso final.
- ♦ **CONECTORES:** Conjunto de elementos hidráulicos que facilitan el acoplamiento de las tuberías con otros elementos del subsistema hidráulico, tales como conexiones tipo T y tipo Y, codos, todo tipo de acopladores como bridas, reductores y elementos acondicionadores como filtros.

2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

2.5.2.1 TERMOTANQUE (DISEÑO Y CONTRUCCIÓN)

Las características del termotanque, se especificaron en base al tamaño del módulo MCCP, es decir, con la finalidad de calentar un volumen de agua a 90°C en un día de operación.

- ◆ Capacidad volumétrica: 300 litros por cada módulo MCCP.
- ◆ Tanque interno: Acero inoxidable T304, calibre 12.
- ◆ Tapas laterales: Acero inoxidable T304, calibre 10.
- ◆ Tanque exterior: Acero Inoxidable T430, calibre 24.
- ◆ Material de aislamiento entre tanques: Capa de poliuretano de 0.05 m.
- ◆ Coeficiente de pérdidas de calor en el material aislante de hasta 0.1 W/k.
- ◆ Temperatura de trabajo: Desde -10 °C a 90 °C.
- ◆ Presión de trabajo: nominal desde 1 kg/cm² y máxima de 10 kg/cm².
- ◆ Disponer de entradas y salidas de agua con las siguientes características:
 - (A) NPT(M) ¾". Entrada de agua de la toma de alimentación y entrada de agua caliente desde el módulo MCCP.
 - (B) NPT(M) ¾". Salida de agua hacia el calentador solar y salida hacia el proceso final.
- ◆ Disponer de entradas para válvulas de seguridad y mantenimiento:
 - (C) NPT(M) ¾". Válvula de drenado.
 - (D) NPT(F) ¾". Válvula de alivio de presión.
 - (E) NPT(F) ½". Válvula de alivio de aire.
- ◆ Disponer de entradas para sensores eléctricos:
 - (F) NPT(F) ¾". Entrada para termopar sensor de temperatura.
 - (G) NPT(F) 1-½". Entrada para sensor de nivel, rosca bajo la norma ANSI, con las especificaciones siguientes: redonda de acero inoxidable, estándar.
- ◆ Disponer de entradas para sensores de carátula:
 - (H) NPT(F) ½". Entrada para sensor de carátula de temperatura.
 - (I) NPT(F) ½". Entrada para sensor de carátula de presión.
- ◆ Disponer de entradas para equipo auxiliar de calentamiento:
 - (J) NPT(F) 1". Entrada para una termoresistencia.

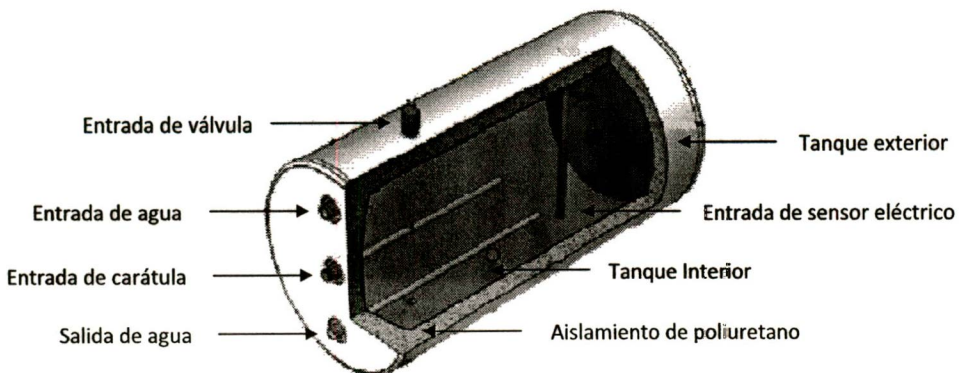


Figura 2.29. Bosquejo del diseño de termotanque. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

2.5.2.2 VÁLVULAS

Las válvulas utilizadas en el subsistema hidráulico (Figura 2.30) son las siguientes:

- ◆ **Compuerta:** El órgano de cierre corta la vena fluida transversalmente. No son utilizadas para regular flujo sino para aislarlo, es decir, abiertas o cerradas totalmente.
- ◆ **Globo:** Su mecanismo consiste en un disco, accionado por un tornillo que empuja hacia abajo contra un asiento circular. Son utilizadas para regular o controlar el flujo en una tubería; producen pérdidas de carga muy elevadas.
- ◆ **Esfera:** Posee un asiento con perfil esférico y en este se ajusta una bola que puede ser movida por la presión ejercida sobre ella por el fluido, o bien, mediante un maneral que al girarse 90° se coloca en dirección de la tubería, una perforación hecha a través de la esfera; al ser girado el maneral 90° nuevamente, esa perforación también gira, quedando perpendicular al flujo, cerrando el paso del líquido.
- ◆ **Retención (check):** Aseguran el paso del flujo en un solo sentido y se abren y cierran automáticamente en función de la dirección y presión del fluido.
- ◆ **Alivio de aire:** Permiten la salida de aire acumulado en la tubería, tanto para agua fría como de agua caliente, son imprescindibles en circuitos con calentamiento .
- ◆ **Alivio de temperatura:** Son instaladas en equipos calentadores, y almacenadores de agua caliente. Son reguladas en función de las necesidades de la instalación y también de su capacidad térmica. Deben ser instaladas directamente sobre los calentadores.
- ◆ **Alivio de presión:** en el caso del circuito térmico del STCCP también es necesario considerar una válvula de alivio de vapor, debido al incremento de temperatura y presión del fluido dentro del circuito.
- ◆ **Electroválvula (solenoide):** Pueden ser cerradas y abiertas a distancia mediante un interruptor, que permite actuar aun electroimán acoplado a su vástago

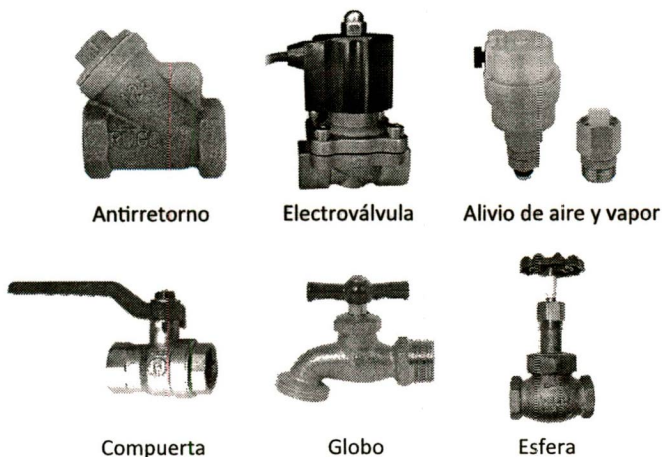


Figura 2.30. Imágenes de válvulas utilizadas en el subsistema hidráulico del STCCP. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

2.5.2.3 TUBERÍAS

Las tuberías de interconexión deben seleccionarse considerando principalmente los niveles de temperatura y presión presentes durante el proceso de calentamiento, en combinación con los siguientes factores.

- ♦ **Durabilidad:** Se debe considerar una vida útil de al menos 10 años bajo las condiciones de trabajo especificadas por el desarrollador (considerar una prueba de 3 horas bajo una presión total de 8 kg/cm^2 y temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$).
- ♦ **Ensamble:** Debe disponer de uniones mecánicas roscadas o a presión (sin soldaduras) para reducir la posibilidad de fugas; así como disminuir los tiempos de armado.
- ♦ **Material de construcción:** Resistente a la corrosión, no debe generar contaminación orgánica o inorgánica del fluido (hipoalergénico), no debe liberar elementos o sustancias que se disuelvan en agua.
- ♦ **Peso:** Equivalente o menor a un peso 0.622 kg por metro lineal que corresponde a un tubo rígido de cobre de $3/4"$ de diámetro tipo M.
- ♦ **Diámetro:** Existencia de diámetros nominales comercialmente de entre $3/8"$ a $2"$.
- ♦ **Mano de obra:** Tiempo de mano de obra equivalente o menor a la instalación de tubería de cobre, utilización de herramientas de corte y apriete sin requerir electricidad.
- ♦ **Garantía:** Tiempo de garantía igual o mayor a una tubería de cobre.
- ♦ **Reparación y mantenimiento:** Utilización de herramientas de ajuste y apriete que no requieran de alimentación eléctrica.
- ♦ **Elementos de instalación:** Uniones mecánicas diseñadas para soportar los cambios de presión y temperatura sin presentar fugas.
- ♦ **Temperatura operación:** Máxima de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ para agua en estado líquido al nivel del mar y mínima de $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

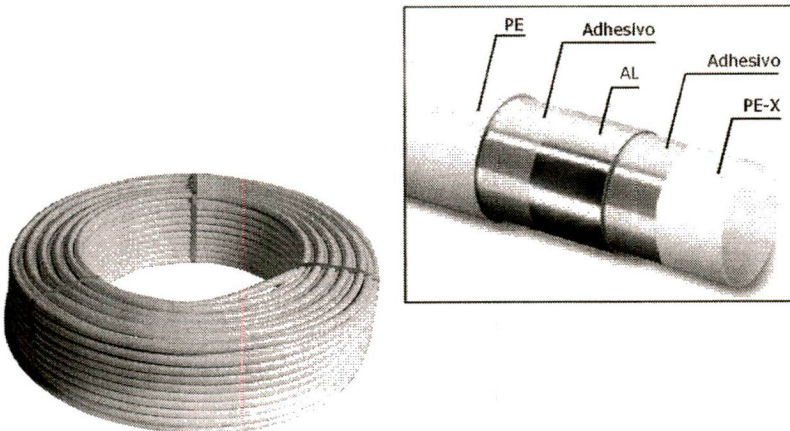


Figura 2.31. Imagen de una tubería polimérica que cumple con los requerimientos del subsistema hidráulico. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

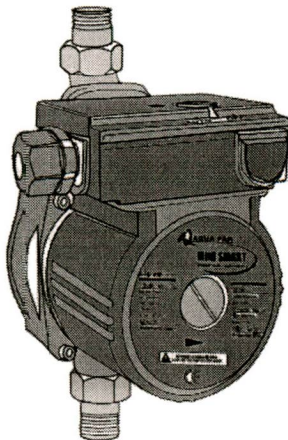
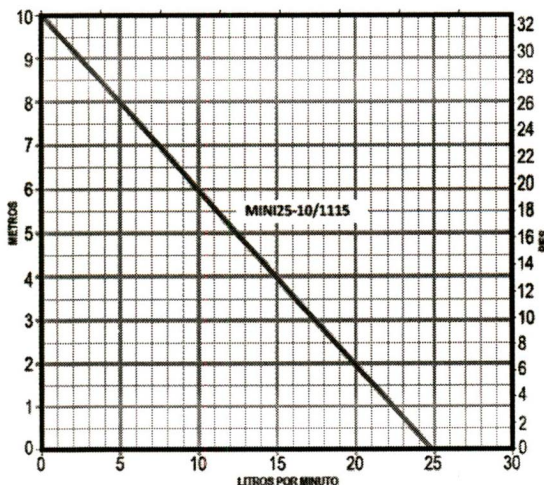
2.5.2.4 BOMBA DE RECIRCULACIÓN

Dentro de las instalaciones hidráulicas es muy común el uso de bombas, regularmente del tipo centrífugas debido a sus características de funcionamiento y rendimiento. Una bomba está integrada por un mecanismo impulsor de fluido, que es conectado a un motor eléctrico a fin de suministrar el movimiento rotatorio para trasladar el líquido del termotanque hacia los módulos M CCP.

En el caso de una bomba centrífuga, el procedimiento de bombeo se realiza en dos etapas: La primera etapa transforma la energía eléctrica del motor eléctrico en energía mecánica-cinética al mover un elemento giratorio o impulsor acelerando la entrada de agua desde el centro del cuerpo de la bomba hacia afuera de la misma; el segundo paso es transformar esa velocidad del fluido en presión a través de las aspas o paletas difusoras de movimiento. El volumen de descarga de la bomba es función del diámetro y velocidad de rotación del impulsor.

Para seleccionar una bomba es necesario tomar en consideración la caída de presión total, así como el flujo volumétrico a fin de calcular la potencia máxima requerida (Gráfica 2.6). El siguiente listado resume estas características y otras adicionales.

- ◆ **Caída de presión DP:** 1.5 metros, calculada por medio de método Hazen-Williams, se considera las diferencias de energías cinética y potencial, así como las pérdidas de presión en tuberías y accesorios.
- ◆ **Flujo:** Rango de operación entre 0,3 a 1.8 m³/h.
- ◆ **Mecanismo de carga-descarga:** Tipo centrífugo o diafragma.
- ◆ **Diámetro de conexiones al impulsor:** Entrada y salida máxima de 0.0254 mm.
- ◆ **Temperatura del fluido de trabajo:** Manejo de agua líquida de -4 °C a 110 °C.
- ◆ **Tensión de alimentación:** 127 VAC o de 24 a 48 VCD, clase H y protección IP44.
- ◆ **Eficiencia:** Igual o mayor al 80%.



Gráfica 2.6. Comportamiento y esquema de una bomba para recirculación de agua caliente. Fuente: PowerGIE, 2013.





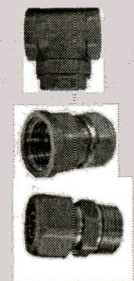

2.5 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

2.5.3 RESULTADOS DEL DISEÑO DEL SUBSISTEMA HIDRÁULICO.

Finalmente se presenta una parte del resultado de investigación de elementos que pueden ser integrados al subsistema hidráulico, que han sido seleccionados conforme a los requerimientos que han sido establecidos en las bases de diseño.

En cuanto a los elementos conectores, se han identificado algunos que son de gran utilización en tuberías de material polimérico para conducción de agua caliente, así como para otras sustancias que podrían ser utilizados en investigaciones futuras.

Tabla 2.1. Resumen de elementos principales que integran el subsistema hidráulico.

Elemento	Componente	Parte	Especificaciones	Imagen
Actuador	Electroválvula Salida	Electroválvula	Electroválvula solenoide; cuerpo de latón; Puerto 3/4" NPT(F), Orificio 0.71"; Cv de 5.03; Presión Diferencial 0.2 bar; Sello Buna N; Conector DIN; Temperatura máxima de 80 °C.	
Actuador	Bomba Recirculación	Bomba Agua Caliente	115 VAC; 0.74 A; 1/25 HP; Entrada/Salida Bridada No Incluye Unión; Entrada 1-1/4"; Salida 1-1/2"; Hierro Fundido; Temperatura Máxima 230°F; 145 PSI.	
Tubería	Tubería de circulación	Manguera	Manguera PEX-AL-PEX 3/4 para agua caliente.	
Instrumento	Válvula manual	Válvula de globo manual	Servicio: 725 psi (50 bar) de -20 a 200 °F (-28.9 a 93.3 °C); 500 psi (34.5 bar) a 300 °F (148.9 °C); 450 psi (31.0 bar) a 325 °F (162.8 °C); 100 psi (6.9 bar) a 350 °F (176.7 °C). Exactitud: -20 a 356 °F (-28.9 a 180 °C). conexión: NTP hembra.	
Conexiones	Conexiones para manguera	Conexiones (hembra y macho)	Conector Hembra SPT 3/4 para manguera PEX-AL-PEX para agua caliente. Conector Macho SPT 3/4 para manguera PEX-AL-PEX para agua caliente. Reductor 2 1/4 a 3/4: reduce el diámetro del tubo receptor al diámetro de la manguera.	
Instrumento	Almacenamiento	Termotanque	Volumen 300 litros, temperaturas de -10 a a 90 °C, Presiones de trabajo nominal de 7 kg/cm ² y máximas de 10 kg/cm ²	

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SUBSISTEMA DE CONTROL

La función principal del subsistema de control es regular y mantener los niveles de energía requeridos en cada parte de STCCP.

Otra función del subsistema de control es mantener las condiciones de seguridad en la operación tanto para los equipos como para los usuarios y operadores.

Por lo anterior, es indispensable contar un sistema de control y automatización, que sea capaz de adquirir las variables físicas del STCCP como temperatura, presión, flujo, nivel de radiación; así como de enviar mandos a los actuadores para regulación del proceso como son válvulas solenoides, bombas y alarmas.

Los elementos del subsistema de control se representan en base a sus funciones en la figura 2.32.

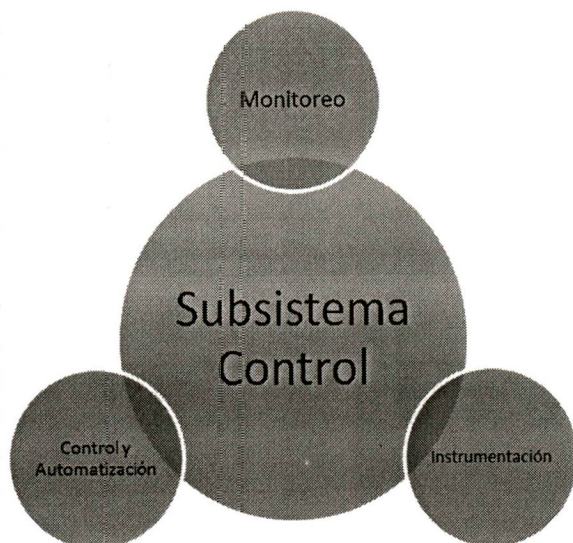


Figura 2.32. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema de Control.

A continuación se presenta una breve descripción de cada elemento y su funcionalidad en el subsistema de control:

- ♦ **CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN:** El componente principal de este elemento es el hardware y el software del Controlador Lógico Programable (PLC), que permite llevar a cabo la operación del STCCP de manera segura y funcional, a través de la regulación de las variables que intervienen en el proceso tales como: nivel en el tanque, temperatura del fluido de calentamiento, así como posición angular del módulo MCCP.
- ♦ **INSTRUMENTACIÓN:** Los componentes que integran este elemento del subsistema de control son: Sensores que captan el estado de las variables del sistema como son termopares, sensores de flujo volumétrico, piranómetros, sensores de nivel, encóders absolutos o incrementales. Los actuadores son los elementos finales de control que realizan una acción para cambiar el estado de las variables del sistema, por mencionar algunos tenemos: electroválvulas, bombas, y motorreductor.
- ♦ **MONITOREO:** Es fundamental conocer el rendimiento térmico y para lograrlo es necesario contar con un registro histórico del comportamiento de las variables que intervienen en el sistema. El elemento de control debe ser capaz de almacenar y enviar datos a un computador para su posterior análisis con herramientas de tratamiento de datos.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.2 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SUBSISTEMA DE CONTROL

En este apartado se describen los procesos y la secuencia de operaciones que deben llevarse a cabo dentro de un STCCP para una aplicación tipo ADDI. En específico se analizará el caso del banco de pruebas para caracterización del comportamiento del STCCP.

2.6.2.1 CONCEPTO GENERAL DEL PROCESO

Se dispone de un termotanque de volumen definido conectado a un módulo MCCP, a fin de incrementar la temperatura del agua depositada en el tanque en un periodo de tiempo de 9 a 15 horas tiempo solar.

El agua calentada es directamente utilizada en el proceso, en una o varias descargas durante el día, teniendo como resultado un STCCP de configuración de alta demanda y descarga intermitente (Figura 2.33).

Para agregar mayor energía en el calentamiento de la sustancia, se puede utilizar un calentador auxiliar de gas o electricidad.

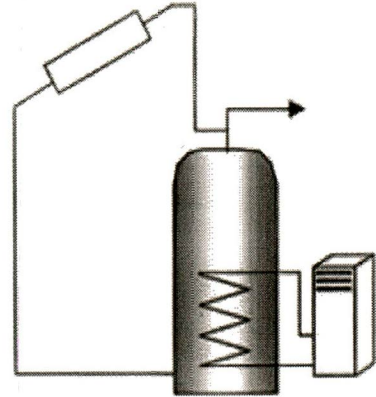


Figura 2.33. Diagrama esquemático del STCCP en su configuración alta demanda y descarga intermitente.

A continuación se presentan tablas que agrupan los elementos principales que conforman al subsistema de control y posteriormente se describirán sus funciones e interacciones.

2.6.2.2 RELACIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Tabla 2.2. Elementos y componentes principales del subsistema de control.

Equipo Principal	ID	Actuadores	ID
Termotanque	TANK	Bomba Recirculación	JZ-2
Módulo CCP	CCP	Válvula Solenoide Fría	YV-1A
Suministrador Agua	WATER	Válvula Solenoide Caliente	YV-1S
Calentador Eléctrico Auxiliar	AUXILIAR	Posicionador Angular	MP-3
Accesorios	ID	Sensores	ID
Válvula Reductora Flujo	FV-2	Temperatura Termotanque	TT-2A
Válvula Dren	Dren	Temperatura Entrada CCP	TT-2B
Válvula de Alivio Aire	SV-1	Temperatura Salida CCP	TT-2C
Válvula Check Entrada	CV-1	Nivel Termotanque	LT-1
Válvula Check CCP	CV-2	Flujo Circuito Caliente	FT-2
Compuerta Entrada Tank	HV-1A	Posición Solar	ZD-3A
Compuerta Salida Tank	HV-1B	Posición Angular CCP	Z-3B
Compuerta Servicio CCP	HV-2A	Radiación Solar	RT-4

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.2.3 PROCESOS PRINCIPALES DEL STCCP

Tabla 2.3 Procesos principales del STCCP.

PROCESOS PRINCIPALES	ACTUADOR	SENSOR PRIMARIO	SENSOR SECUNDARIO	SENSOR TERCIARIO
Llenado Termotanque	YV-1A	LT-1	TT-2A	-
Desgarga Termotanque	YV-1S	LT-1	TT-2A	-
Calentamiento Solar	JZ-2	TT-2A	LT-1	EA-4R
Calentamiento Auxiliar	AUX	TT-2A	LT-1	EA-4R
Posicionamiento CCP (Sensor Solar)	MP-3	ZD-3A	Z-3C	Z-3B
Posicionamiento CCP (Función PLC)	MP-3	Z-3B	Z-3C	-

2.6.2.4 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

La HMI permite al usuario interactuar con los parámetros, funciones y variables del STCCP. La HMI dispone de medios de visualización y también de medios de entrada de datos (botones).

Tabla 2.4 Mandos de la HMI.

MANDO / ACCIONAMIENTO	PANEL TOUCH	BOTÓN ARRANQUE	BOTÓN PARO	PARO EMERGENCIA	PALANCA SELECTOR
Arranque	SI	SI	NO	NO	NO
Paro	SI	NO	SI	NO	NO
Paro Emergencia	SI	NO	NO	SI	NO
Selector Manual - Automático	SI	NO	NO	NO	SI
Llenado Manual Termotanque	SI	NO	NO	NO	NO
Descarga Manual Termotanque	SI	NO	NO	NO	NO
Arranque-Paro Bomba	SI	NO	NO	NO	NO
Calentamiento Auxiliar	SI	NO	NO	NO	NO
Posicionamiento CCP	SI	NO	NO	NO	NO

2.6.2.5 ALARMAS AUDIBLES, VISIBLES Y EN PANEL

Las alarmas permiten que el usuario pueda identificar la presencia de un estado no deseado del sistema como por ejemplo la presencia de fallas o puntos de riesgo.

Tabla 2.5 Alarmas del STCCP.

EVENTO / ALARMA	PANEL TOUCH	AUDIBLE	LÁMPARA
Nivel Bajo Termotanque	SI	SI	SI
Temperatura Alta Termotanque	SI	SI	SI
Temperatura Baja Termotanque	SI	SI	SI
Electroválvula Entrada Bloqueada	SI	SI	SI
Electroválvula Salida Bloqueada	SI	SI	SI
Bomba Bloqueada	SI	SI	SI
Motoreductor Bloqueado	SI	SI	SI

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.2.6 REGISTRO DE VARIABLES EN MEMORIA DEL PLC

Para realizar el análisis del comportamiento del STCCP, es necesario registrar y almacenar los datos generados de las variables principales para diferentes horarios de operación. Los datos son descargados a un PC para generar información en forma de tablas o gráficas (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Registro de variables en la memoria de PLC.

VARIABLE / LECTURA EN PLC	MUESTREO [SEGUNDOS]	REGISTRO [MINUTOS]	INICIO [HORA DEL DÍA]	FINAL [HORA DEL DÍA]	PERIODO [HORAS]	MUESTRAS / DÍA
Nivel Termotanque	5.0	5.0	8:00:00 a.m.	4:00:00 p.m.	8.0	96
Temperatura Termotanque	5.0	5.0	12:00:00 a.m.	11:59:00 p.m.	24.0	288
Temperatura Entrada CCP	1.0	5.0	8:00:00 a.m.	4:00:00 p.m.	8.0	96
Temperatura Salida CCP	1.0	5.0	8:00:00 a.m.	4:00:00 a.m.	8.0	96
Flujo Circuito Calentamiento	1.0	5.0	8:00:00 a.m.	4:00:00 a.m.	8.0	96
Posición Solar	1.0	1.0	8:00:00 a.m.	4:00:00 a.m.	8.0	480
Posición Angular CCP	0.1	0.08	6:00:00 a.m.	6:00:00 p.m.	12.0	8640
Radiación Solar	0.1	5.0	12:00:00 a.m.	11:59:00 p.m.	24.0	288

2.6.2.7 VISUALIZACIÓN DE VARIABLES EN PANEL TOUCH

Durante la operación del STCCP es requerido visualizar el estado de las variables con el fin de poder ejecutar mandos de manera oportuna y alcanzar las magnitudes deseadas, adicionalmente se requiere que el sistema opere en condiciones seguras (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 Visualización de variables en el Panel Touch.

VARIABLE / PANEL	ESTADO ACTUAL NUMÉRICO	ESTADO ACTUAL OBJETO	HISTÓRICO TABLA	HISTÓRICO GRÁFICA	SELECCIÓN PERIODO	UNIDADES
Nivel Termotanque	SI	SI	SI	SI	SI	Bajo, Medio, Alto
Temperatura Termotanque	SI	SI	SI	SI	SI	°C & °F
Temperatura Entrada CCP	SI	SI	SI	SI	SI	°C & °F
Temperatura Salida CCP	SI	SI	SI	SI	SI	°C & °F
Flujo Circuito Calentamiento	SI	SI	SI	SI	SI	Litros / Minuto
Posición Solar	SI	SI	SI	SI	SI	Sur, Norte
Posición Angular CCP	SI	SI	SI	SI	SI	° & Radianes
Radiación Solar	SI	SI	SI	SI	SI	W/m ²

2.6.2.8 VISUALIZACIÓN DE ESTADO DE ACTUADORES EN PANEL TOUCH

El control de las variables del STCCP se realiza por medio de los actuadores, los cuales son operados de forma automática o manual, en ambos casos el usuario debe conocer el estado de los mismos y ser capaz de activarlos o desactivarlos y cambiar el estado de las variables (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Visualización de estado de actuadores.

ACTUADOR / PANEL	ESTADO ACTUAL NUMÉRICO	ESTADO ACTUAL OBJETO	HISTÓRICO TABLA	HISTÓRICO GRÁFICA	REGISTRO PLC	UNIDADES
Electroválvula Entrada (YV-1A)	NO	SI	EVENTO	EVENTO	SI	NA
Electroválvula Salida (YV-1S)	NO	SI	EVENTO	EVENTO	SI	NA
Bomba (JZ-2)	NO	SI	EVENTO	EVENTO	SI	NA
Arranque-Paro Motor (MP-3)	NO	SI	EVENTO	EVENTO	SI	NA
Velocidad Motor (MP-3)	SI	SI	EVENTO	EVENTO	SI	r.p.m.
Sentido Giro Motor (MP-3)	NO	SI	EVENTO	EVENTO	SI	Sur, Norte

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.3 LAZO DE CONTROL DE NIVEL (LAZO 1)

El primer lazo de control del STCCP se encarga de regular el nivel de agua que se vierte en el termotanque, a fin de asegurar el volumen requerido para comenzar el proceso de calentamiento. La arquitectura del lazo de control se presenta a continuación:

A) Sensor de Nivel (LT-1): Su función es indicar al controlador el nivel de agua disponible dentro del termotanque. Si existe el volumen de agua requerido, se envía un permisivo para el arranque de la bomba de recirculación, en caso contrario se deshabilita el permisivo y se activa la electroválvula de entrada para llenar el termotanque. Este sensor puede ser de diversos tipos dependiendo de las características constructivas del termotanque.

- ♦ **Tipo Flotador:** Es un componente que consta de un mecanismo interruptor que puede ser ajustado a diferentes alturas de nivel para que el sensor sea activado, enviando una señal de voltaje o corriente directamente al PLC, es capaz de detectar estado bajo y estado alto; es robusto en su funcionamiento pero puede presentar fallas mecánicas debido al efecto del movimiento. Es una solución recomendable para tanques tipo vertical. Este dispositivo tiene alta disponibilidad en el mercado y precios bajos dependiendo del fabricante.
- ♦ **Tipo Electronivel:** Se compone de una serie de sondas eléctricas alojadas a diferentes alturas dentro del termotanque, que detectan la presencia de líquido en base a la propiedad de conductividad eléctrica del agua. Se requiere de un arreglo de resistencias acopladas al PLC para detectar la señal de voltaje al presentar contacto del agua. Un arreglo de este tipo requiere de al menos dos sondas para detectar el estado bajo y alto; siendo recomendable alojar al menos tres para tener posibilidad de manejar algoritmos de seguridad y eficiencia al activar la bomba de recirculación. Es una solución adaptable a tanques tipo vertical y horizontal. Este dispositivo existe con poca disponibilidad en el mercado, sin embargo se puede sustituir con un arreglo de cables conectados a resistencias para su interpretación por el PLC; su precio puede ser bajo dependiendo de los materiales con los que se fabriquen.

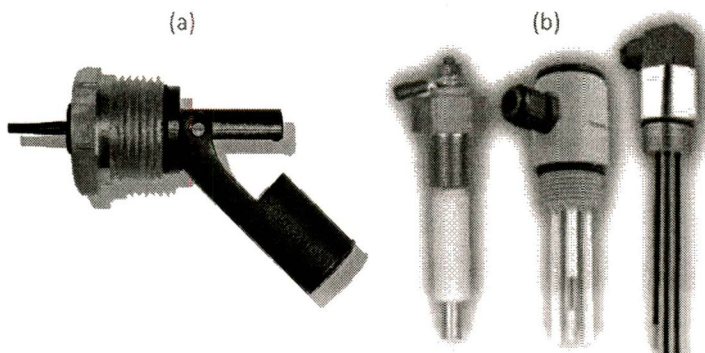


Figura 2.34. Sensores de nivel: (a) Tipo flotador, (b) Tipo electronivel. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

- ♦ **Tipo Capacitivo:** Se compone de un cuerpo en forma de barra cilíndrica que es alojada en el espacio donde el volumen varía su altura de tal manera que la barra sea sumergida en el estado alto y descubierta en el estado bajo. Dentro del cuerpo del sensor hay dispositivos eléctricos que detectan la presencia del agua. Un dispositivo simple solo detecta estado bajo y alto; aunque existen otras construcciones multinivel que son ampliamente utilizados en la industria. La señal que envían al PLC puede ser de corriente, voltaje o a través de protocolo industrial. Es una solución adaptable a tanques tipo vertical y horizontal. Estos dispositivos tienen alta disponibilidad en el mercado industrial pero su precio es elevado.
- ♦ **Tipo Ultrasónico:** Es un detector de proximidad que trabaja libre de roces mecánicos y que logra percibir objetos a distancias de hasta 8 m. El sensor emite un sonido y mide el tiempo que la señal tarda en regresar una vez que es reflejado en un objeto tal como la superficie del agua, el sensor recibe el eco producido y lo convierte en señales eléctricas. Este tipo de sensores trabajan únicamente en el aire, y pueden detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o polvorientos, sin embargo han de ser deflectores de sonido. Los sensores trabajan según el tiempo de transcurso del eco, es decir, se valora la distancia temporal entre el impulso de emisión y el impulso del eco. Al no requerir del contacto físico con el objeto, estos sensores ofrecen la posibilidad de detectar materiales frágiles, como pintura fresca, además detecta cualquier material, independientemente del color, al mismo alcance, sin ajuste ni factor de corrección. Los sensores ultrasónicos regularmente poseen una función de aprendizaje para definir el campo de detección, con un alcance mínimo y máximo de precisión de 0,006 m. El problema que presentan estos dispositivos son las zonas ciegas y de las falsas alarmas. Se define la zona ciega como la comprendida entre el lado sensible del detector y el alcance mínimo en el que ningún objeto puede detectarse de forma fiable. Tienen alta disponibilidad en el mercado industrial y son altamente costosos.

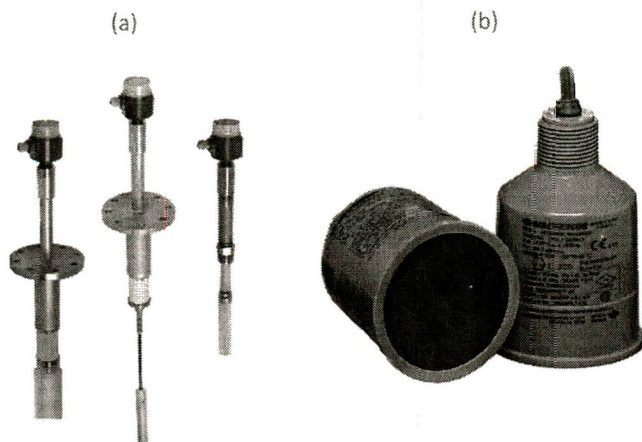


Figura 2.35. Sensores de nivel: (a) Tipo capacitivo, (b) Tipo ultrasónico. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

B) Electroválvulas de entrada (YV-1A) y salida (YV-1S): La función de la válvula de entrada es controlar el acceso de agua desde la fuente de suministro al termotanque, pudiendo ser la fuente de suministro puede ser un tanque elevado o un sistema de alimentación presurizado como un hidroneumático.

La válvula de salida controla el envío de agua caliente desde el termotanque hacia el uso final que puede ser un proceso industrial, comercial o de uso doméstico.

Estas válvulas se activan eléctricamente desde el PLC, a través de un solenoide que abre y cierra el mecanismo para permitir u obstruir el paso del agua. Esta operación se realiza por medio del algoritmo de control del PLC o de un mando activado desde el panel de usuario.

Existen diversas marcas y tamaños de electroválvulas en el mercado dependiendo del caudal requerido y el tipo de accionamiento que puede ser alimentado con corriente alterna o directa (12, 24, 48 VCD o 24 y 127 VAC). Es importante tomar en consideración las presiones mínimas y máximas de trabajo que especifica el fabricante para su óptimo funcionamiento, así como las dimensiones de las conexiones de entrada y salida.

C) Compuertas de Servicio (HV-1 y HV-1B): Son válvulas de compuerta operadas de forma manual que tienen la función de permitir el paso general de agua de alimentación y desde el termotanque hacia el servicio. Son utilizadas para aislar al sistema en labores de operación, mantenimiento o reparación.

D) Válvula Antirretorno (CV-1): Su función es asegurar el paso del fluido en un solo sentido, en este caso desde el suministro de agua hacia el termotanque.

E) Válvula de Dren (DREN): Su función es permitir el saneamiento del termotanque.



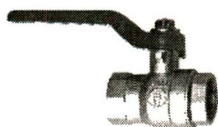
Válvula Antirretorno



Electroválvula metálica para agua caliente



Electroválvula de plástico para agua fría



Compuerta de Servicio



Compuerta de Alimentación



Compuerta de Dren

Figura 2.36. Imágenes de válvulas utilizadas en el lazo de control de nivel (lazo 1) del subsistema de control. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL (LAZO 1)

A continuación se enlistan las variables que intervienen en este lazo de control y se muestra un diagrama de lazo (Figura 2.37) para comprender mejor la relación entre ellas.

- ◆ **Variable de entrada (set point):** Nivel configurado en el panel de usuario.
 - ⇒ Tres posibles estados: bajo, medio y alto.
 - ⇒ Configurado desde el panel usuario.

- ◆ **Variable manipulada:** Flujo de agua que entra y sale del termotanque.
 - ⇒ Flujo de llenado y descarga del termotanque.
 - ⇒ Manipulado por medio de las electroválvulas YV-1A y YV-1S.

- ◆ **Variable controlada:** Nivel de agua dentro del termotanque.
 - ⇒ Conjunto sensor-transductor LT-1.
 - ⇒ Sensor: Tipo electronivel con 3 electrodos instalados en el termotanque.
 - ⇒ Transductor: Tarjeta adecuadora de señal con dos contactos secos.
 - ◇ Las terminales de estado medio y alto están abiertas, corresponde a estado bajo.
 - ◇ La terminal de estado medio está cerrada y la de alto abierta, se tiene estado medio.
 - ◇ Las terminales de estado medio y alto están cerradas, se tiene estado alto.

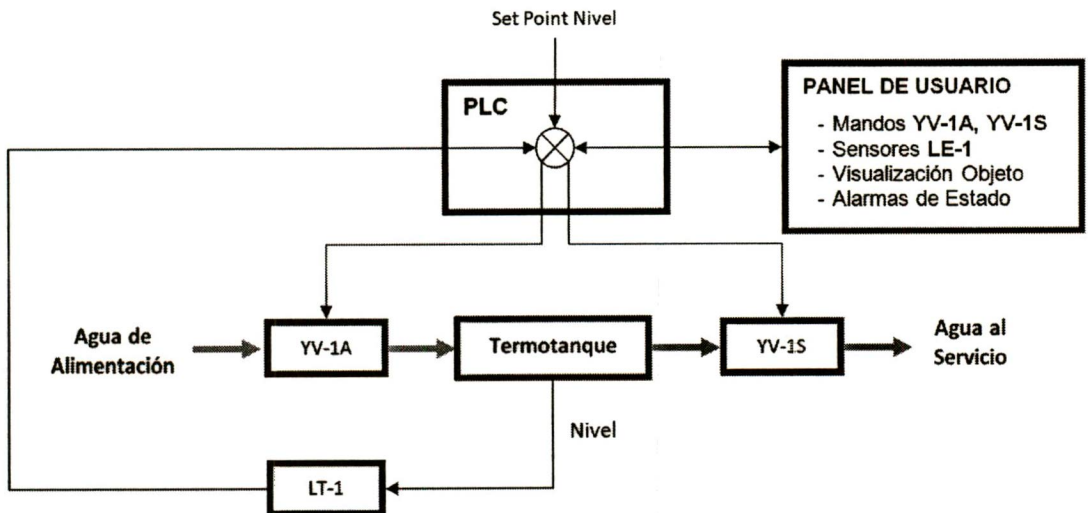


Figura 2.37. Diagrama de lazo de control de la variable nivel

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.4 LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA (LAZO 2)

El segundo lazo de control del STCCP se encarga de regular la temperatura del agua dentro del termostato, a fin de alcanzar el nivel de energía requerido en el volumen de la sustancia de trabajo. La arquitectura del lazo de control es la siguiente:

A) Sensor de temperatura del termostato (TT-2A): Su función es indicar al controlador la temperatura del volumen de agua disponible dentro del termostato. Cuando se alcanza la temperatura requerida por el usuario o una condición no-segura como por ejemplo niveles de temperaturas próximas a la evaporación del agua, el controlador envía una señal de paro de la bomba de recirculación.

B) Sensor de Temperatura a la entrada y salida del MCPP (TT-2B y TT-2C): Su función es indicar al controlador la temperatura del flujo de agua a la entrada y salida del módulo MCPP. Este dato es registrado en la memoria de datos del controlador a fin de analizar la ganancia de energía durante un periodo de tiempo bajo ciertas condiciones de operación tales como son: temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar.

Existen diversos tipos de sensores de temperatura para diversas aplicaciones, entre los que se emplean principalmente: termopar, RTD, termistor o del tipo circuito integrado; la selección dependerá del rango de operación, la exactitud y las condiciones ambientales en las que se realiza la medición.

- ♦ **Tipo Termopar:** Un termopar (también llamado termocople) es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia. En Instrumentación Industrial, los termopares son ampliamente usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a un grado Celsius son difíciles de obtener.
- ♦ **Tipo RTD (Resistance Temperature Detector):** Es un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia óhmica de un conductor con respecto a la temperatura del mismo, regularmente se mide como una variación lineal con coeficiente de temperatura positivo. Al calentarse un material metálico habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia; encontrando que a mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia. Este dispositivo tiene alta disponibilidad en el mercado y precios aceptables dependiendo del fabricante.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

- ♦ **Tipo Termistor:** Es un sensor resistivo de temperatura cuyo funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. Existen dos tipos de termistor; NTC (*Negative Temperature Coefficient*) y PTC (*Positive Temperature Coefficient*). Al aumentar la temperatura, los tipo PTC aumentan su resistencia y los NTC la disminuyen.
- ♦ **Tipo Circuito Integrado:** Es un sensor de temperatura cuyo funcionamiento se basa en sensores de circuito integrado con precisión aceptable, cuya salida en voltaje o corriente es proporcional a la medición de temperatura. Un circuito como el LM35, posee una precisión de entre $\pm\frac{1}{4}$ °C y $\pm\frac{3}{4}$ °C sobre un rango de -55 a +150 °C. tienen un costo bajo y son de fácil implementación en diferentes tipos de presentación.

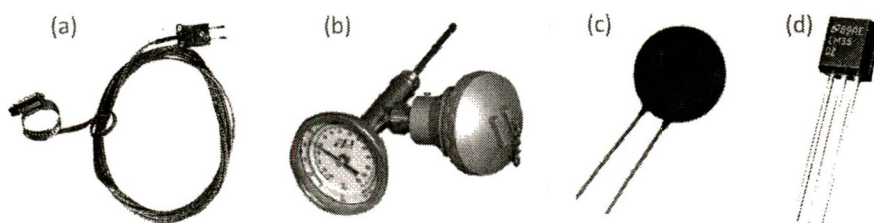


Figura 2.38. Imágenes de sensores de temperatura (a) Termopar de montaje en abrazadera, (b) TRD con carátula, (C) Termistor, (d) Circuito Integrado. Fuente: PowerGIE, 2013.

C) Bomba de Recirculación (JZ-2): Su función es crear una corriente convectiva en el circuito de calentamiento; a fin de captar la radiación que es concentrada en el receptor y convertirla en calor utilizable en el agua.

D) Válvula Reguladora de Flujo (FV-2): Su función es regular la carga hidráulica dentro del circuito de calentamiento a fin de aumentar o disminuir el flujo de fluido a su punto más óptimo para una cierta cantidad de energía radiante por día.

E) Transmisor de Flujo (FT-2): Su función es detectar el flujo de fluido para transmitir la señal hacia el PLC, a fin de indicar y registrar la magnitud de la variable en el subsistema de control.

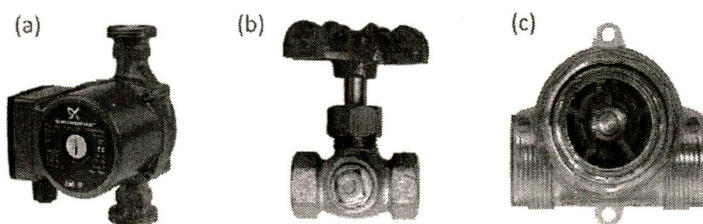


Figura 2.39. Imágenes diversos elementos de control (a) Bomba recirculadora, (b) Válvula manual reguladora de flujo, (C) Sensor de flujo volumétrico. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.4.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA (LAZO 2)

A continuación se enlistan las variables que intervienen en este lazo de control y se muestra un diagrama de lazo (Figura 2.40) para comprender mejor la relación entre ellas.

- ◆ **Variable de entrada (set point):** Temperatura configurada en el panel de usuario.
 - ⇒ Rango de valores: De 0 a 100 °C.
 - ⇒ Configurado desde el panel usuario.

- ◆ **Variable manipulada:** Flujo de agua desde el termotanque hacia el módulo MCCP.
 - ⇒ Flujo de recirculación del circuito de calentamiento.
 - ⇒ Manipulado por medio de la bomba de recirculación JZ-2.

- ◆ **Variable controlada:** Temperatura del agua dentro del termotanque.
 - ⇒ Conjunto sensores-transductores TT-2A, TT-2B y TT-2C.
 - ⇒ Sensores: 1 termopar tipo K instalado, 2 termopar tipo J instalado en la tubería.
 - ⇒ Transductor: Tarjeta transmisora conectada a las terminales de los termopares.
 - ◇ Las terminales del tipo K detectan la variable controlada.
 - ◇ La terminal tipo J servirán únicamente para el registro de variables.

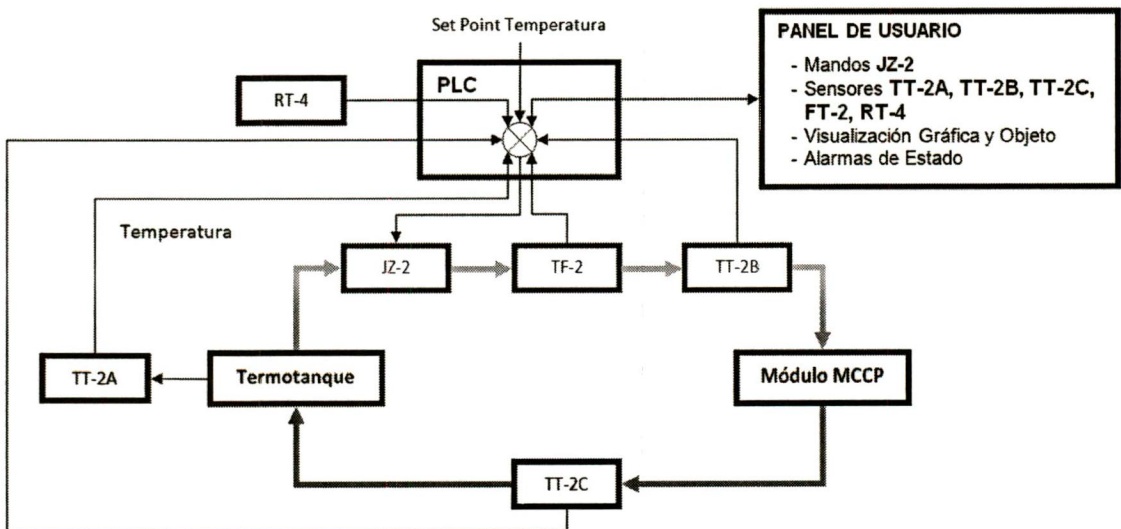


Figura 2.40. Diagrama de lazo de control de la variable temperatura.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.5 LAZO DE CONTROL DE POSICIÓN (LAZO 3)

El tercer lazo de control del STCCP se encarga de regular la posición angular del elemento reflector, a fin de orientarlo en función de la incidencia de los rayos solares, y captar la cantidad de energía solar requerida para calentar el volumen agua de diseño del STCCP. La arquitectura del lazo de control es la siguiente:

A) Sensor de posición solar (ZD-3): Su función es indicar al controlador si existe un error de posición entre el Sol y el eje de simetría del perfil parabólico, así como identificar el sentido de giro que debe realizar el elemento reflector, a fin de asegurar la incidencia de los rayos solares sobre el elemento receptor. Su construcción consta de una tarjeta electrónica que dispone de dos elementos foto-sensibles que transducen la energía solar incidente en una señal eléctrica de voltaje o corriente. Los dispositivos foto-sensibles pueden ser foto-resistencias, foto-transistores o foto-diodos.

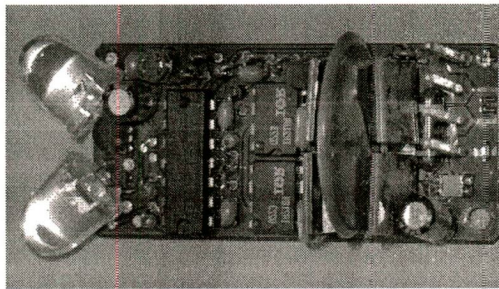


Figura 2.41. Sensor de posición solar de elementos foto-sensibles.

Fuente: PowerGIE, 2013.

B) Sensor de posición angular (Z-3B): Su función es indicar al controlador la posición angular del elemento reflector del módulo MCCP. Existen diversos tipos de sensores de posición angular: encóder incremental, encóder absoluto y de efecto Hall.

- ♦ **Tipo encóder incremental:** Se caracteriza porque determina su posición, contando el número de impulsos que se generan cuando un rayo de luz, es atravesado por marcas opacas en la superficie de un disco unido al eje. En el estator hay como mínimo dos pares de fotorreceptores ópticos, escalados un número entero de pasos más $\frac{1}{4}$ de paso. Al girar el rotor genera una señal cuadrada, el escalado hace que las señales tengan un desfase de $\frac{1}{4}$ de periodo si el rotor gira en un sentido y de $\frac{3}{4}$ si gira en el sentido contrario, lo que se utiliza para discriminar el sentido de giro. Un simple sistema lógico permite determinar desplazamientos a partir de un origen, a base de contar impulsos de un canal y determinar el sentido de giro a partir del desfase entre los dos canales. Algunos encóders pueden disponer de un canal adicional que genere un pulso por vuelta y la lógica puede dar número de vueltas más fracción de vuelta.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

- ♦ **Tipo encóder absoluto:** Es un sensor de posición angular similar al encóder incremental, la diferencia radica en que su disco contiene varias bandas dispuestas en forma de coronas circulares concéntricas, dispuestas de tal forma que en sentido radial el rotor queda dividido en sectores, con marcas opacas y transparentes codificadas en código Gray. Según la posición del disco, la luz emitida por cada emisor se enfrentará a un sector opaco o transparente: Si se enfrenta a un sector opaco, la luz se refleja y el receptor recibe la señal; si se enfrenta a un sector transparente, la luz no se refleja y el receptor no recibe la señal. Las diferentes combinaciones posibles de sectores dan origen a una señal de salida digital formada por cuatro bits que puede ser posteriormente procesada. Generalmente, los encóders incrementales proporcionan mayor resolución a un costo más bajo que los encóders absolutos. Además, su electrónica es más simple ya que tienen menos líneas de salida.
- ♦ **Tipo encóder efecto Hall:** Se los sensores Hall al trabajan bajo el principio de la detección de un flujo magnético al inducir una corriente en un punto fijo. Pueden trabajar en entornos extremos y polvorientos, sin darle mantenimiento de limpieza. Por otra parte está el costo económico: los sensores Hall digitales son un poco más baratos que las foto barreras.

C) Motorreductor (MP-3): Su función es convertir la energía eléctrica suministrada en movimiento rotatorio a través de un motor de corriente directa con imán fijo. Posee un juego de engranajes que le permiten incrementar el par de torsión y reducir la velocidad de giro a la salida de la flecha.

D) Drive para motorreductor (Z-3) y relé para cambio de sentido de giro (MZ-3): Su función adecuar en corriente, tensión y forma de onda (función PWM), la señal de alimentación al motorreductor, logrando controlar su velocidad, aceleración, par y con ayuda de un relevador su sentido de giro.

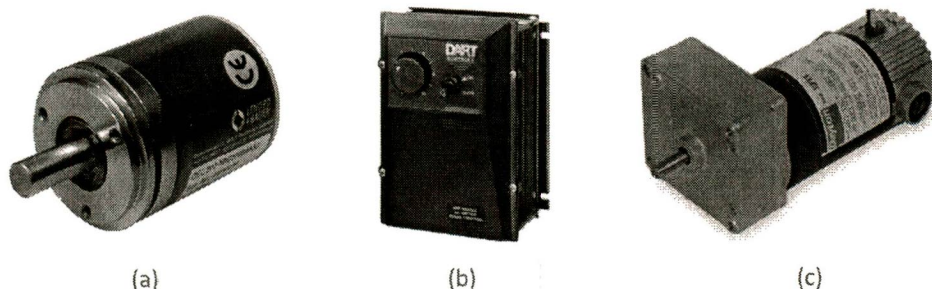


Figura 2.42. Imágenes de elementos del lazo de control de posición (a) Encóder tipo incremental, (b) Drive para motor de corriente directa, (c) Motorreductor. Fuente: PowerGIE, 2013.

2.6 SUBSISTEMA DE CONTROL

2.6.5.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE CONTROL DE POSICIÓN (LAZO 3)

A continuación se enlistan las variables que intervienen en este lazo de control y se muestra un diagrama de lazo (Figura 2.43) para comprender mejor la relación entre ellas.

- ◆ **Variable de entrada (set point):** Posición angular configurada en el panel de usuario.
 - ⇒ Rango de valores: De -60° a $+60^{\circ}$.
 - ⇒ Configurado desde el panel usuario.
- ◆ **Variable manipulada:** Desplazamiento angular y dirección del reflector del módulo MCCP.
 - ⇒ Desplazamiento angular del motorreductor MP-3.
 - ⇒ Sentido de giro manipulado por medio del relevador MZ-3.
- ◆ **Variable controlada:** Posición angular del elemento reflector del módulo MCCP.
 - ⇒ Conjunto sensores-transductor Z-3A, Z-3B y ZD-3.
 - ⇒ Sensores: 1 encóder Z-3B, 1 switch de límite Z-3A y 1 comparador de posición ZD-3.
 - ⇒ Transductor: contador de pulsos integrado en el controlador.
 - ◇ Terminal de conteo de frecuencia para el encóder incremental Z-3B.
 - ◇ Entrada digital para recibir pulsos del comparador de posición ZD-3.

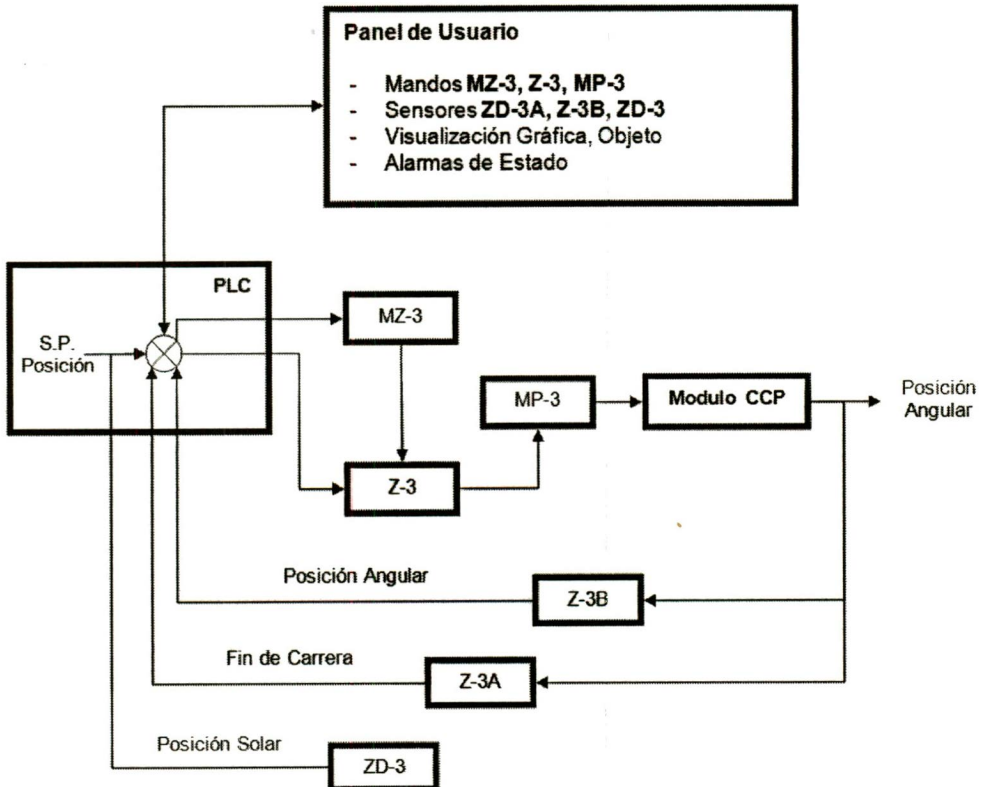


Figura 2.43. Diagrama de lazo de control de la variable posición angular

2.7 SUBSISTEMA ELÉCTRICO

2.7.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SUBSISTEMA ELÉCTRICO

La función principal del subsistema de eléctrico es suministrar de manera segura energía eléctrica al STCCP; a fin de activar los todos los elementos y componentes que lo componen.

Está integrado por una red de cables, interruptores y protecciones que trabajan a diferentes niveles de tensión y corriente.

Los elementos del subsistema eléctrico se representan de manera conceptual en la figura 2.44.

A continuación se presenta una breve descripción de cada elemento, indicando su funcionalidad en el subsistema eléctrico.

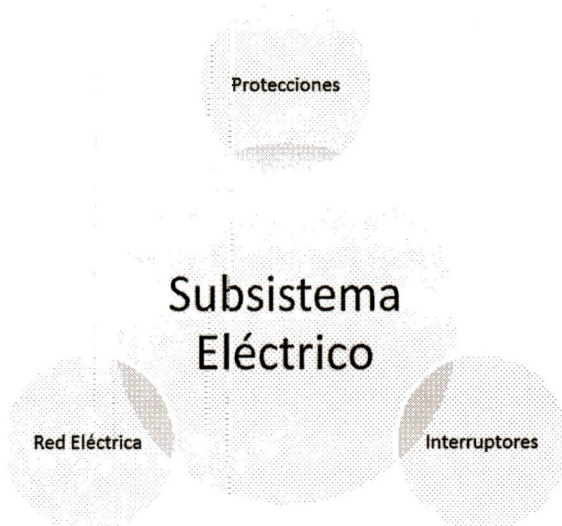


Figura 2.44. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema Eléctrico.

- ♦ **RED ELÉCTRICA:** Su función es suministrar electricidad desde el sistema de alimentación de energía eléctrica, que puede ser una acometida del servicio de la compañía eléctrica o desde un circuito ubicado el interior del sitio de instalación del STCCP. La red eléctrica se compone de un arreglo de hilos o cables conductores que trabajan a nivel de tensión y corriente ya sea en corriente alterna o directa, y en base a estas características tienen un calibre y aislamiento específico a fin de cumplir con los requerimientos de carga así como de seguridad.
- ♦ **INTERRUPTORES:** Estos elementos cumplen con la función de permitir o denegar el curso de la corriente eléctrica hacia diferentes secciones de la red, a fin de alimentar las cargas deseadas. Las cargas que pueden alimentar dentro del STCCP van desde el tablero central de control que contiene al controlador y a los transductores de la instrumentación, hasta los actuadores o elementos finales de control como son bombas, motores y alarmas. Los interruptores son alojados principalmente en la sección de alimentación del gabinete de control, sin embargo pueden haber interruptores locales a pie de máquina para cada elemento del STCCP.
- ♦ **PROTECCIONES:** Las protecciones tienen la función de restringir una sección definida de la red eléctrica en caso de existir algún fallo en la misma. La naturaleza del fallo puede ser un corto circuito debida a una pérdida de aislamiento en algún conductor o también derivado de una sobre carga debida a problemas mecánicos en algún motor o bomba. Las protecciones cubren la necesidad de mantener condiciones seguras de funcionamiento en todas las secciones del STCCP, protegiendo de daños a los aparatos y equipos que lo conforman, a los usuarios y operadores del sistema.

2.7 SUBSISTEMA ELÉCTRICO

2.7.1.1 INTERRUPTORES

Los principales tipos de interruptores utilizados en el STCCP son los siguientes:

- ♦ **Interruptor termomagnético o disyuntor:** Estos interruptores cuentan con un sistema magnético de respuesta rápida ante sobre corrientes abruptas (cortocircuitos), y una protección térmica basada en un bimetálico que se desconecta ante sobre corrientes de ocurrencia más lenta (sobrecargas). Estos disyuntores se emplean para proteger cada circuito de la instalación, siendo su principal función resguardar a los conductores ante sobre corrientes que pueden producir peligrosas elevaciones de temperatura.
- ♦ **Interruptor o protector diferencial:** El interruptor diferencial es un elemento destinado a la protección de las personas contra los contactos indirectos. Se instala en el tablero eléctrico después del interruptor automático del circuito que se desea proteger, siendo ampliamente utilizados en circuitos de enchufes, o bien, se le puede instalar después del interruptor automático general de la instalación si es que se desea instalar solo como protector diferencial, si es así se debe considerar que la capacidad nominal de corriente del disyuntor general sea inferior o igual a la del protector diferencial.

2.7.1.2 PROTECCIONES

Las protecciones utilizadas en el STCCP son las siguientes:

- ♦ **Fusibles o cortacircuitos:** Los fusibles o cortacircuitos, no son más que una sección de hilo más fino que los conductores normales, colocado en la entrada del circuito que se desea proteger, para que al aumentar la corriente, debido a un cortocircuito, sea la parte que más se caliente, y por tanto la primera en fundirse. Una vez que es interrumpida la corriente, el resto del circuito ya no sufre daño alguno.
- ♦ **Puesta a tierra:** Se denomina puesta a tierra a la unión eléctrica de todas las masas metálicas de una instalación a un electrodo (una placa o varilla metálica de cobre o de hierro galvanizado, enterrados en el suelo).

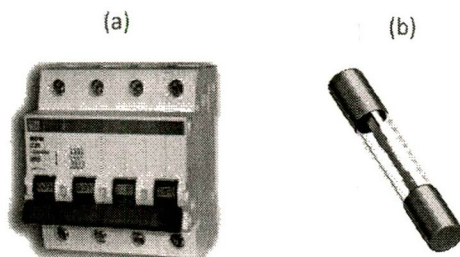


Figura 2.45. Imágenes de elementos del subsistema eléctrico
(a) Interruptor termomagnético, (b) Fusible. Fuente: PowerGIE, 2013.

CONFIGURACIÓN DEL DISEÑO



UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

3.1 MÓDULO CONCENTRADOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO

3.1.1 ARQUITECTURA E INTERFACES DEL SUBSISTEMA MÓDULO M CCP

Tomando en consideración la conceptualización del sistema, el análisis funcional apoyado en la herramienta desarrollada en MATLAB, así como los requerimientos y restricciones del sistema; se han generado tres alternativas de diseño que son bosquejadas y modeladas por medio de una herramienta de dibujo computarizado a fin de evaluar la conveniencia de construirlo.

Las diferencias existentes entre las tres propuestas radican fundamentalmente en la selección de materiales, así como en las características específicas de la arquitectura y sus interfaces; lo que implica una evaluación de la mejor propuesta analizando su nivel de cumplimiento a nivel funcional y de rendimiento, así como la viabilidad y costo de los procesos de manufactura, mantenimiento y refaccionamiento.

En base a la matriz de comparación y selección de propuestas, se elige la de mayor puntaje y posteriormente se detalla su diseño en planos para construcción. En la figura 3.1, se muestra un modelo tridimensional computarizado del módulo M CCP que fue seleccionado para ser construido.

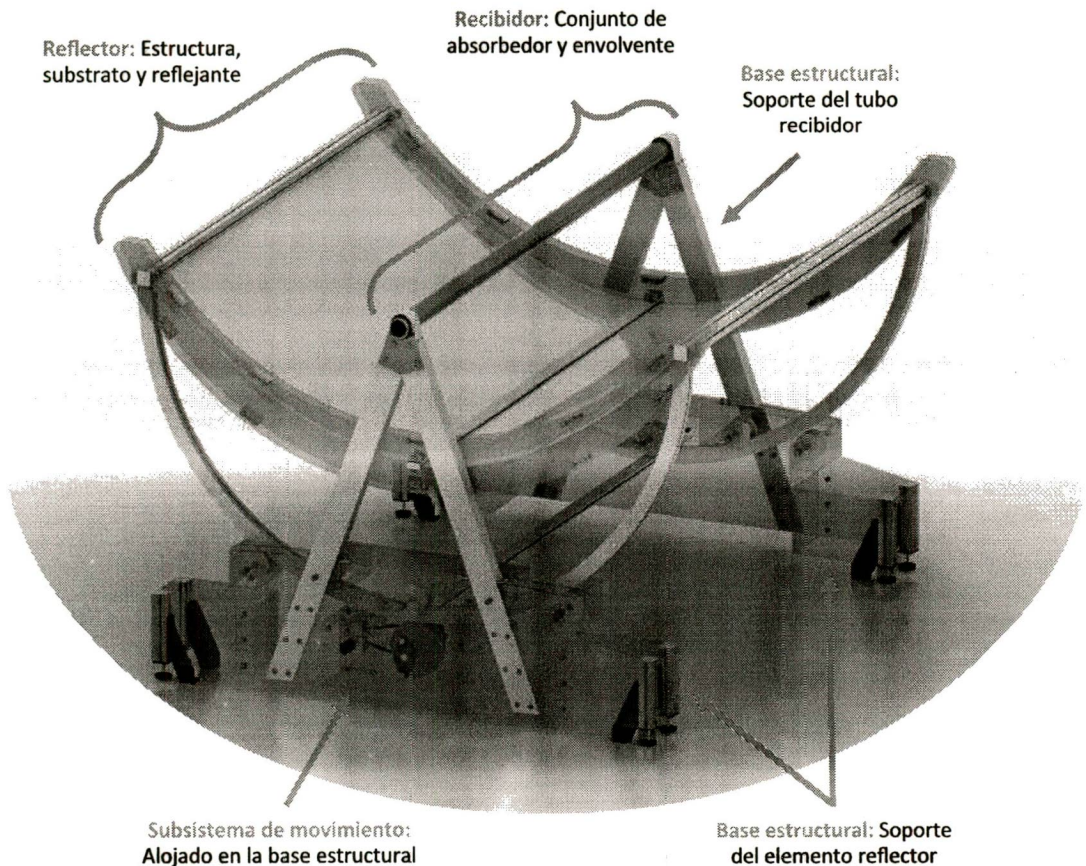


Figura 3.1. Modelo tridimensional detallado de la propuesta seleccionada del módulo M CCP.

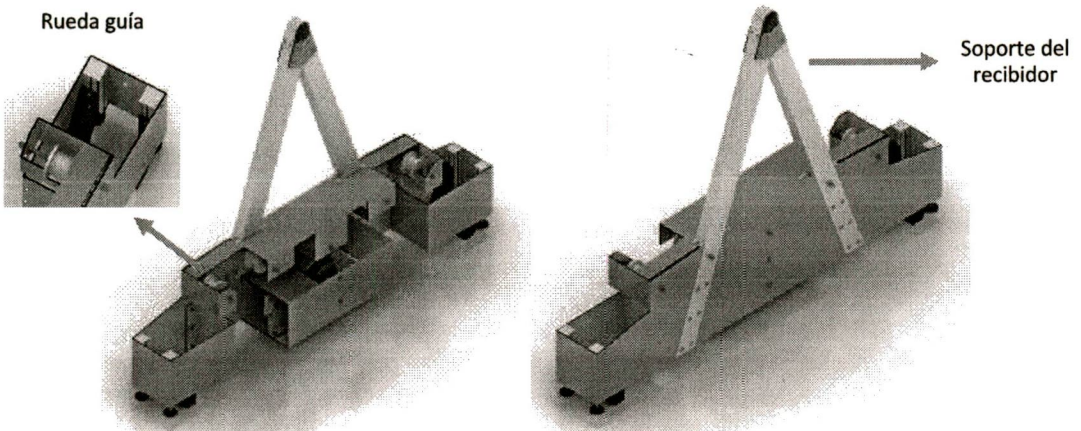
3.1 MÓDULO CONCENTRADOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO

3.1.1.1 BASE ESTRUCTURAL

Con base en las dimensiones obtenidas para el elemento reflector por medio de la herramienta de diseño de MATLAB, se plantea una arquitectura apropiada de la base estructural que cumpla con los requerimientos de soporte y estabilidad para el módulo MCCP.

Los materiales de construcción son una combinación de perfiles estructurales metálicos y de placas de aluminio ensambladas por medio de tornillería, a fin de evitar procesos de soldadura. Las interfaces de unión con el elemento reflector constan de un sistema de ruedas guía y para el receptor se dispone de un accesorio polimérico junto con una abrazadera metálica. Es importante destacar que dentro de una de las bases se alojará el subsistema de movimiento.

Base con tracción: Aloja al subsistema de movimiento y ruedas guía para el reflector.



Base simple: Contiene únicamente ruedas guía para el reflector.

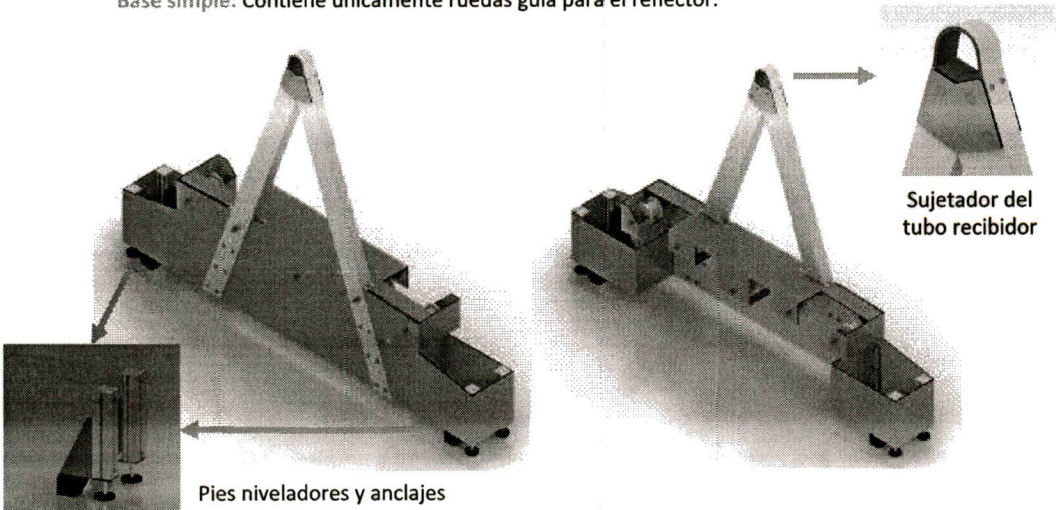


Figura 3.2. Modelo tridimensional detallado de las bases estructurales del MCCP.

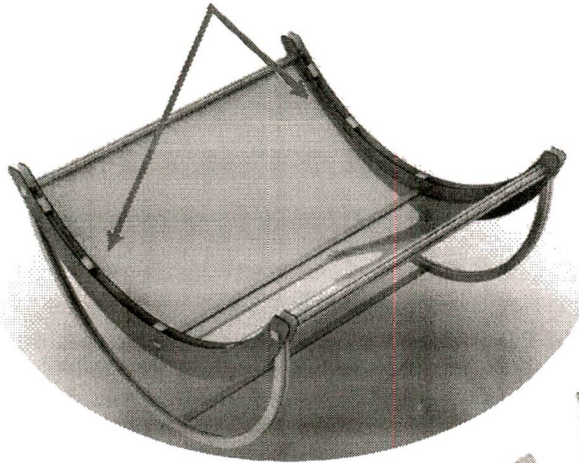
3.1 MÓDULO CONCENTRADOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO

3.1.1.2 REFLECTOR

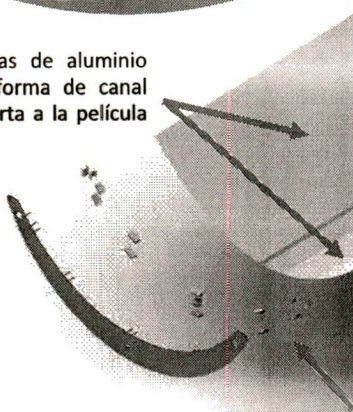
Con base en las dimensiones obtenidas para el elemento reflector por medio de la herramienta de diseño de MATLAB, se plantea la configuración y arquitectura del elemento reflector, a fin de cumplir con las características geométricas, ópticas, térmicas y de resistencia mecánica.

Los materiales de construcción son una combinación de perfiles estructurales y de láminas de aluminio, también se emplea una película reflejante especial para aplicaciones solares y uniones tipo herraje para evitar procesos de soldadura. La interfaz de unión con la base estructural consta de un par de perfiles metálicos semicirculares dispuestos a los extremos del reflector rodajas y un accesorio polimérico respectivamente. Es importante destacar que dentro uno de las piezas de las bases alojará al subsistema de movimiento.

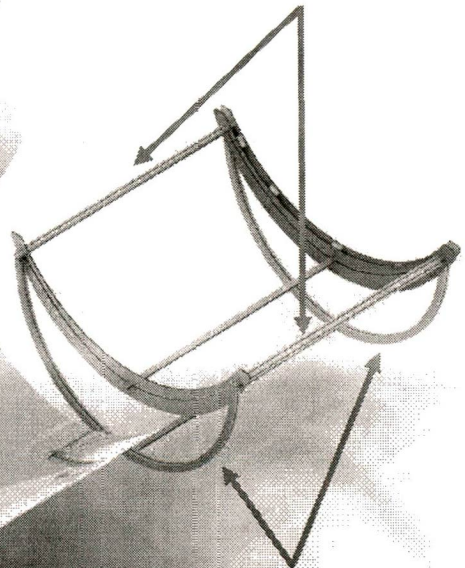
Perfiles parabólicos: Estructura metálica que soporta y da forma de canal parabólico al substrato (lámina metálica).



Substrato: Láminas de aluminio que adoptan la forma de canal parabólico y soportan a la película reflejante.



Largueros: Perfiles estructurales metálicos que unen los perfiles parabólicos.



Perfiles circulares: Estructura metálica que unen al elemento reflector con el sistema de movimiento, se soportan sobre las ruedas guía de la base estructural.

Herrajes: Elementos de sujeción mecánica que unen a los perfiles y al substrato.

Figura 3.3. Modelo tridimensional detallado del reflector del MCCP.

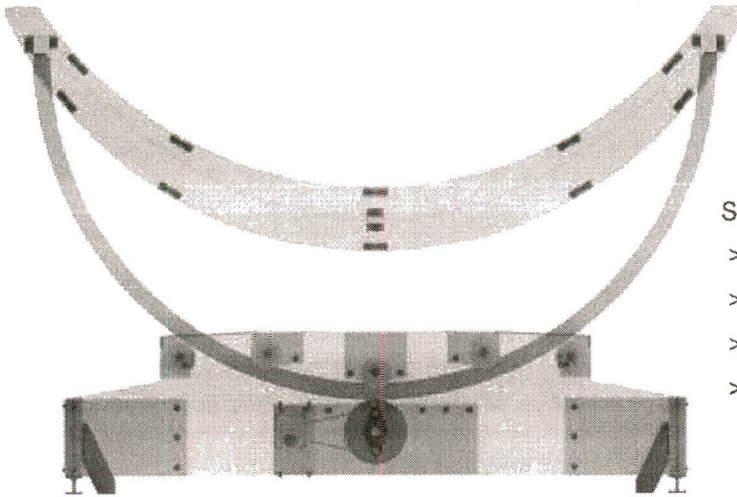
3.2 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

3.2.1 PARTES COMPONENTES DEL SUBSTEMA DE MOVIMIENTO

El sistema de movimiento esta compuesto por un arreglo de poleas y un motor reductor que mueve al canal reflector por medio de la fricción entre una rueda de hule y un perfil tipo campana que va en la ranura del perfil curvo.

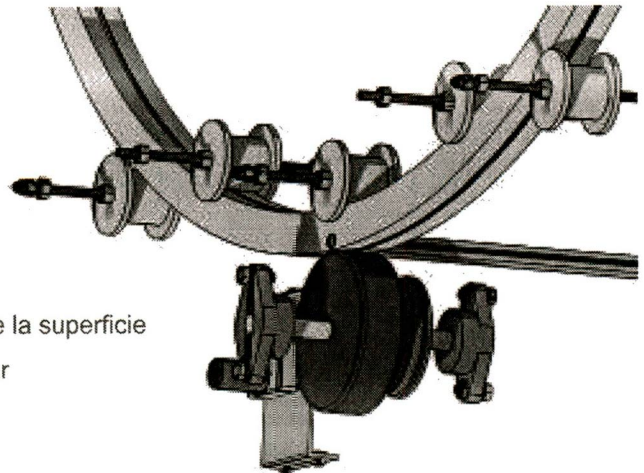
Mediante un sensor solar se enviara la señal para que el motor se ponga en funcionamiento y impulse a la rueda de hule para mover el canal. Este sensor será instalado de manera independiente alineado al foco en el receptor.

También tiene una serie de poleas que sirven como guías para el perfil curvo donde este corre libremente impulsado por la fricción de la rueda del sistema de movimiento.



Sistema de movimiento:

- > Bandas y poleas
- > Rueda de fricción
- > Motorreductor
- > Instalación en una de las bases



Detalle de mecanismo de fricción entre la superficie de la rueda de hule con el perfil circular

Figura 3.4. Modelo en CAD del subsistema de movimiento.

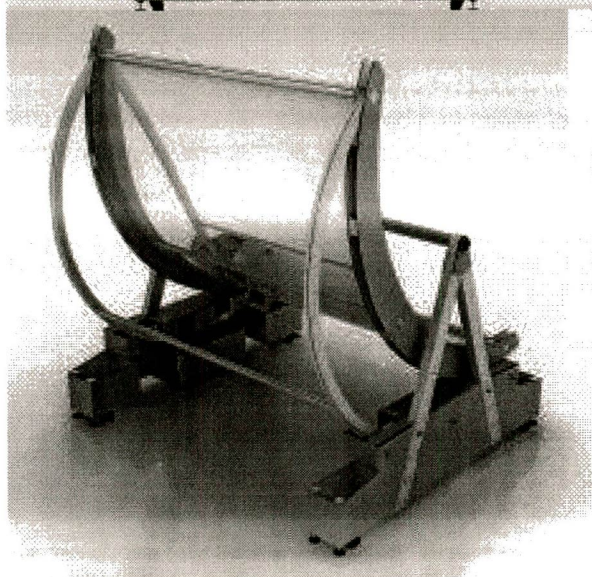
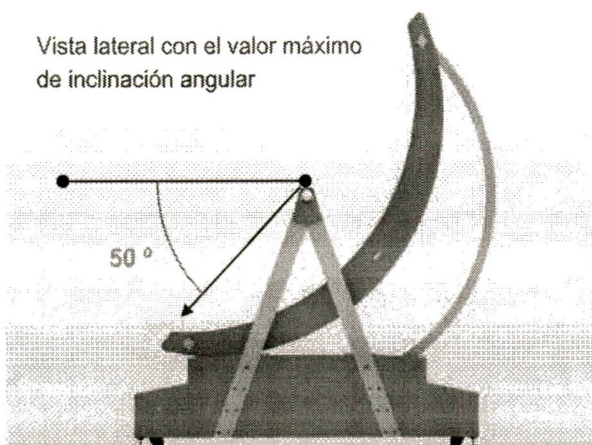
3.2 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

3.2.2 RESTRICCIONES FUNCIONALES

El canal reflector seguirá al sol de Norte a Sur (rotación con eje de giro orientado este-oeste), debido a que esta disposición permite un mayor aprovechamiento de la energía solar en invierno a comparación del seguimiento Este - Oeste.

Se ha restringido para que tenga un movimiento angular máximo de 50 grados con respecto a su eje del perfil parabólico, el movimiento del canal se genera por medio de la fricción de la rueda de hule y el arco de perfil modular de aluminio, el canal mantiene la posición del foco en el centro del canal, asegurando que los rayos solares caen de manera perpendicular en el reflector.

Vista lateral con el valor máximo de inclinación angular



Vista Posterior con el canal a su máxima inclinación



Vista Frontal con el canal a su máxima inclinación

Figura 3.5. Modelos 3D en CAD del MCCP con posicionamiento angular.

3.3 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

3.3.1 TERMOTANQUE, TUBERÍA Y ELEMENTOS DE CONEXIÓN

El Termotanque ha sido diseñado para contener 300 litros de agua caliente y para trabajar a presiones de hasta 5 kg/cm^2 , que es un valor típico de los sistemas de presurización de agua.

La tuberías se unen con conectores roscados debido a que el uso de soldaduras no cumple con lo requerimientos de diseño al ser poco prácticas y no resistir las condiciones de trabajo.

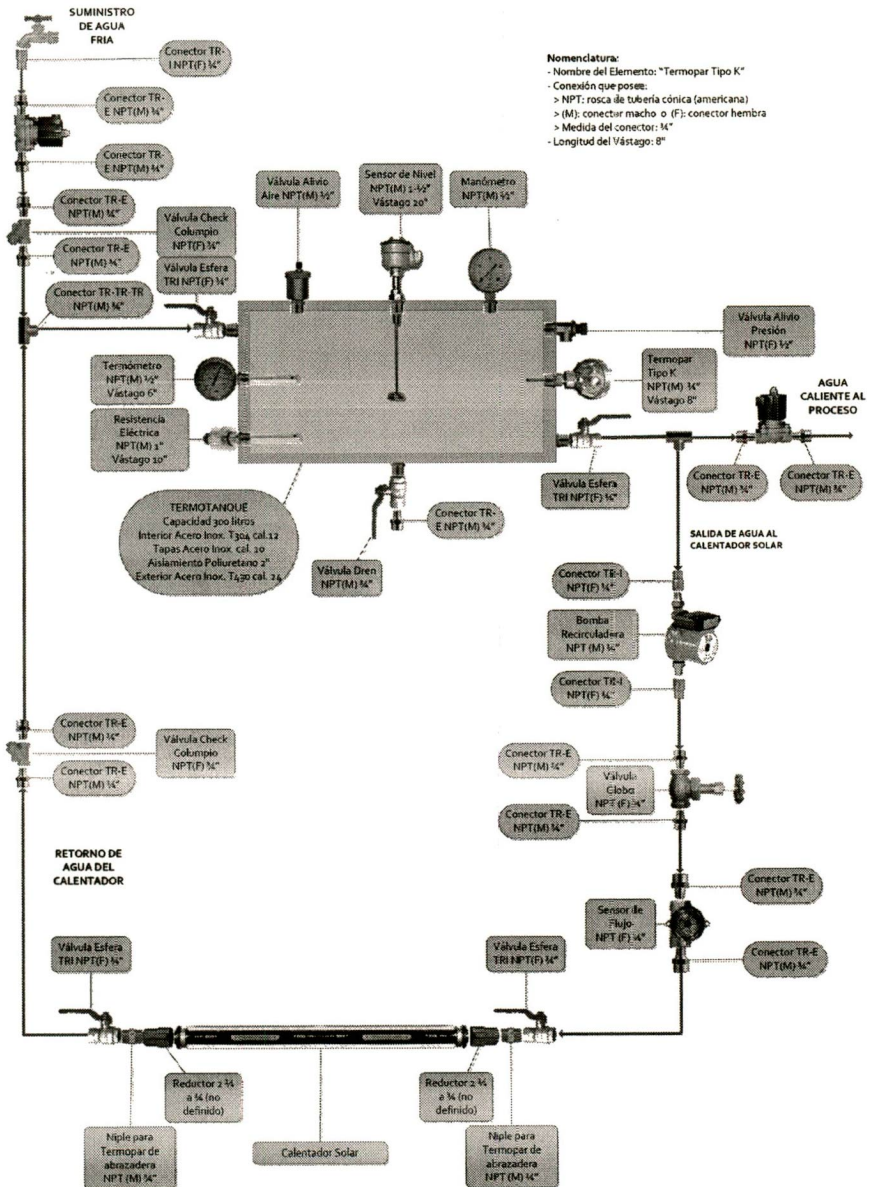


Figura 3.6. Diagrama del subsistema hidráulico.

3.4 SUBSISTEMA DE CONTROL Y ELÉCTRICO

3.4.1 DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN (DTI)

El DTI muestra todos los elementos requeridos para monitorear, controlar y automatizar el STCCP (Figura 3.7), tales como sensores, actuadores, equipo primario y tuberías. De igual forma indica las variables en forma de señales eléctricas, mecánicas y térmicas, que existen dentro del sistema.

La identificación de los elementos y componentes instalados en campo facilitan el diseño de las secuencias de programación que serán insertadas en el PLC, por lo que es importante dar un nombre específico y único a cada uno de los instrumentos y actuadores que regulan el proceso de generación de calor de proceso.

Es recomendable utilizar la norma ANSI / ISA 5.1 - 1984 (Rev. 1992), para la identificación de símbolos e instrumentos, a fin de emplear un lenguaje común en todos los planos y los programas de software.

En el diagrama de la figura 3.7 no se indican las protecciones eléctricas, sin embargo al contar el número de elementos y con las fichas técnicas de cada uno se puede determinar el nivel de protección que requiere así como la carga que deben soportar las fuentes de alimentación.

Con respecto al monitoreo de variables vale la pena destacar el uso de un PLC que es capaz de almacenar históricos de datos de todas las variables y eventos que ocurren en el sistema.

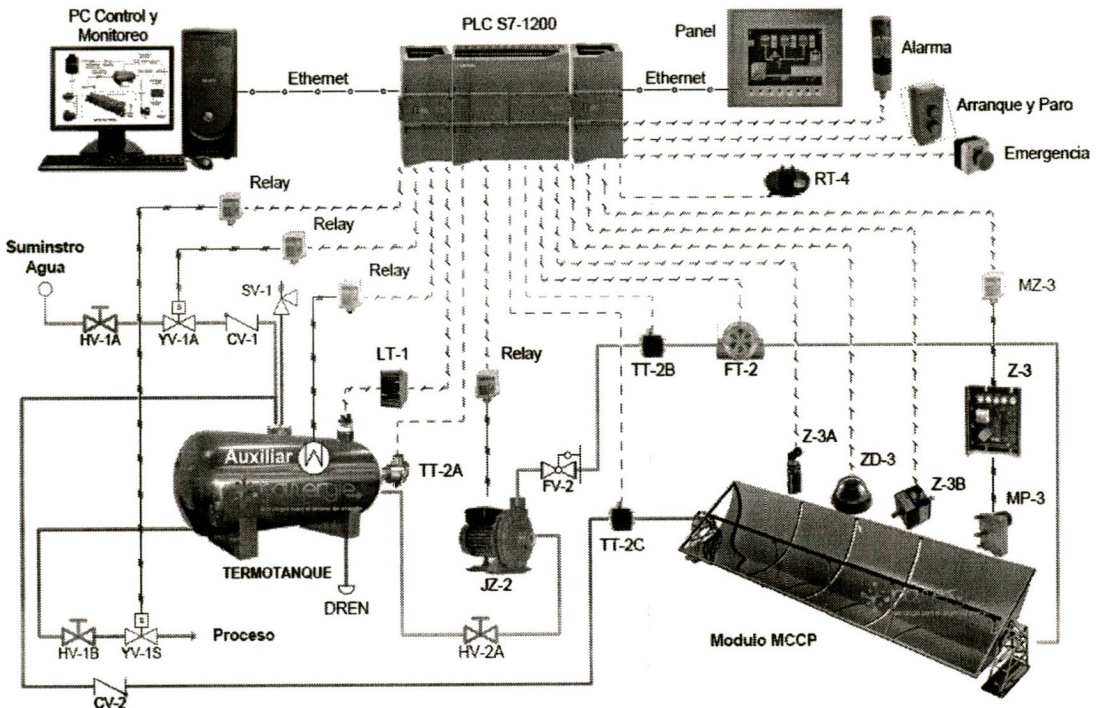


Figura 3.7. Diagrama del subsistema de control.



RESULTADOS

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.1 MODULO CONCENTRADOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO

De acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en los requerimientos, se construye la propuesta de Micro Concentrador Solar de Canal Parabólico.

Cabe destacar que durante la fabricación se debieron realizar ajustes estructurales debido a que los procesos de maquila y ensamble disponibles en el mercado difieren de los encontrados en la bibliografía clásica.

Como resultado se generaron modificaciones en el arreglo estructural y en las dimensiones, que fueron incrementadas a fin de aumentar el aprovechamiento del material y los procesos de producción.

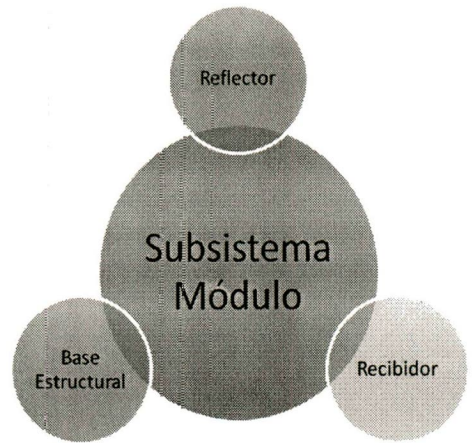


Figura 2.12. Diagrama de funciones de los elementos del módulo MSCP.

En la figura 4.1 se observan las principales modificaciones en cuanto a dimensiones y formas estructurales realizadas en comparación con la primera propuesta mostrada en la figura 3.1.

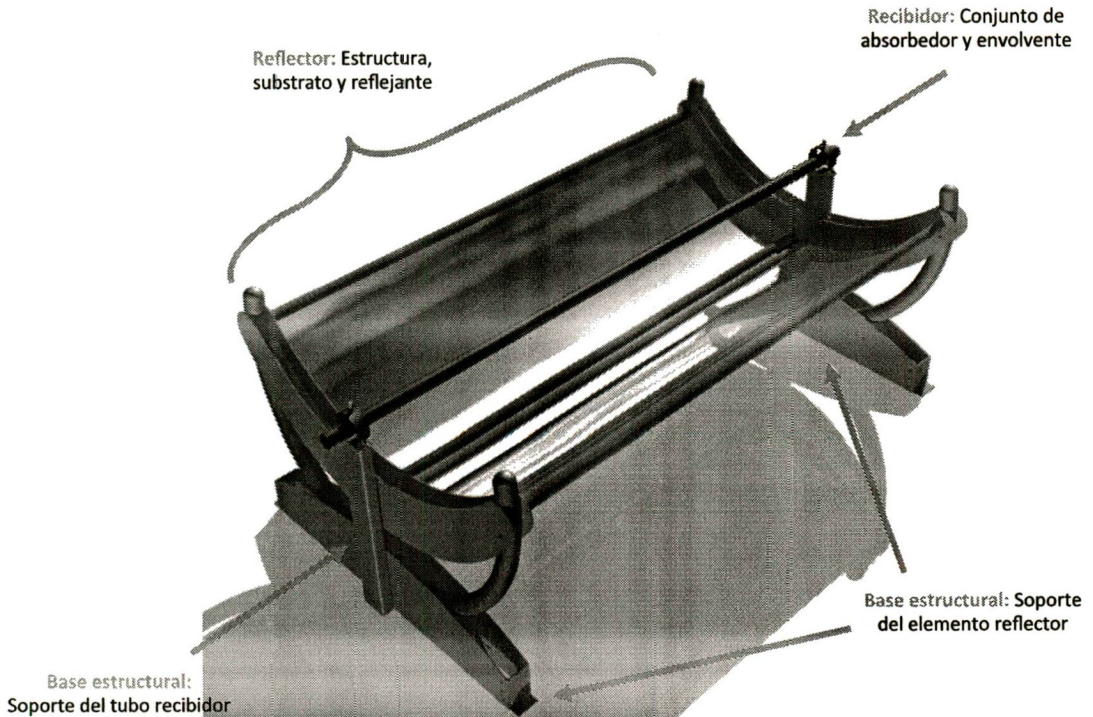


Figura 4.1. Modelo tridimensional de la propuesta modificada del MSCP.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.1.1 MODULO MCCP INSTALADO EN SITIO

La figura 4.2 muestra una fotografía del Micro Concentrador de Canal Parabólico, así como el detalle de algunas de sus partes componentes.

Entre los cambios más relevantes se pueden observar el alargamiento del reflector de 2 a 2.5 metros de longitud, conservando el ancho de 1.6 metros, teniendo un total de superficie de captación de 3.9 m^2 . Se modificaron las bases de soporte y se añadieron dos tirantes para asegurar que la forma del perfil parabólico no sufra modificaciones en su geometría.

Cabe señalar que el proceso de construcción es de bajo costo debido a que todas las piezas que conforman el módulo poseen medios ensamble que le permiten ser transportado con facilidad, además de tener una rápida instalación en sitio sin necesidad de maquinaria o equipo especializado, solo es requerido tener herramientas básicas como desarmadores, pinzas, llaves; y un equipo de dos a tres personas para llevar a cabo todo el proceso de armado.

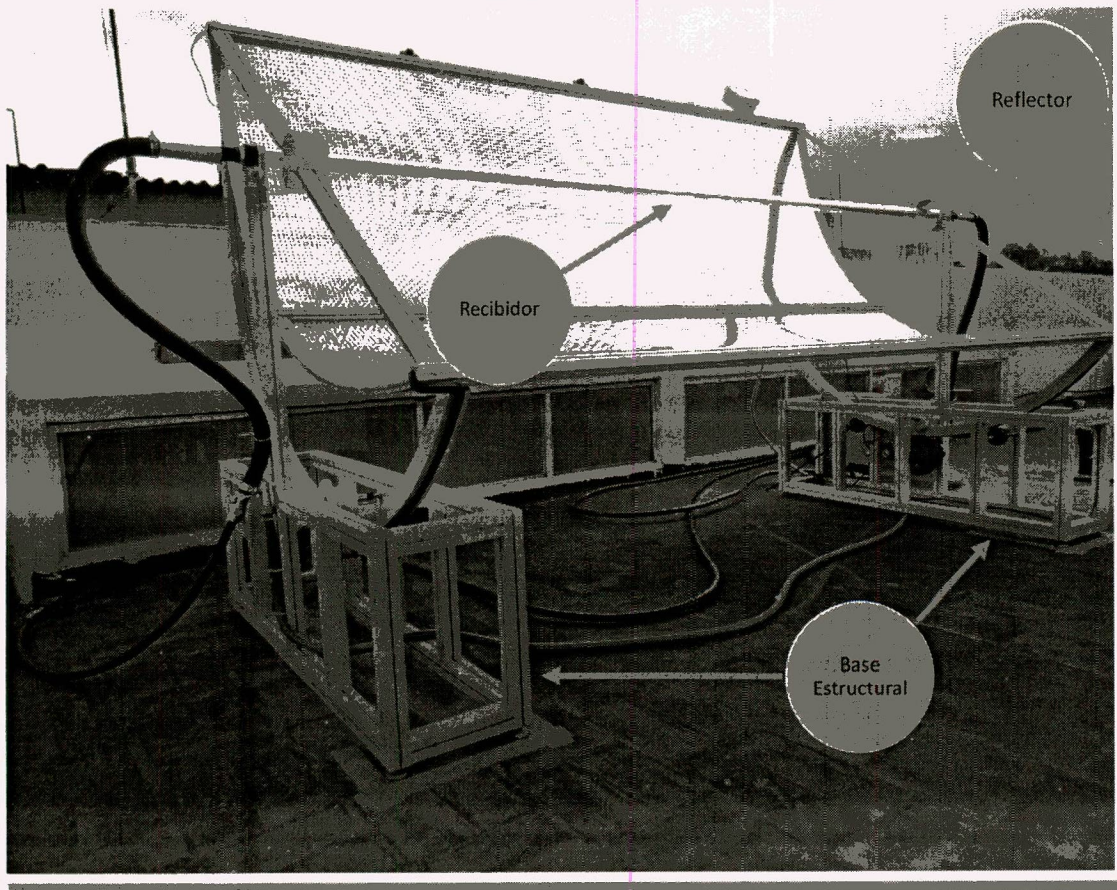


Figura 4.2. Subsistema MCCP instalado en sitio.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.1.2 PROCESO DE INSTALACIÓN

El ensamble del colector solar se realizó posterior a la colocación del patrón para CDIN sobre los paneles. Esto se llevó a cabo en el sitio del ensayo por parte del personal de empresa Powergie S.A.P.I. de C.V. según sus procedimientos, tal como es mostrado en la siguiente secuencia de imágenes de la figura 4.3.

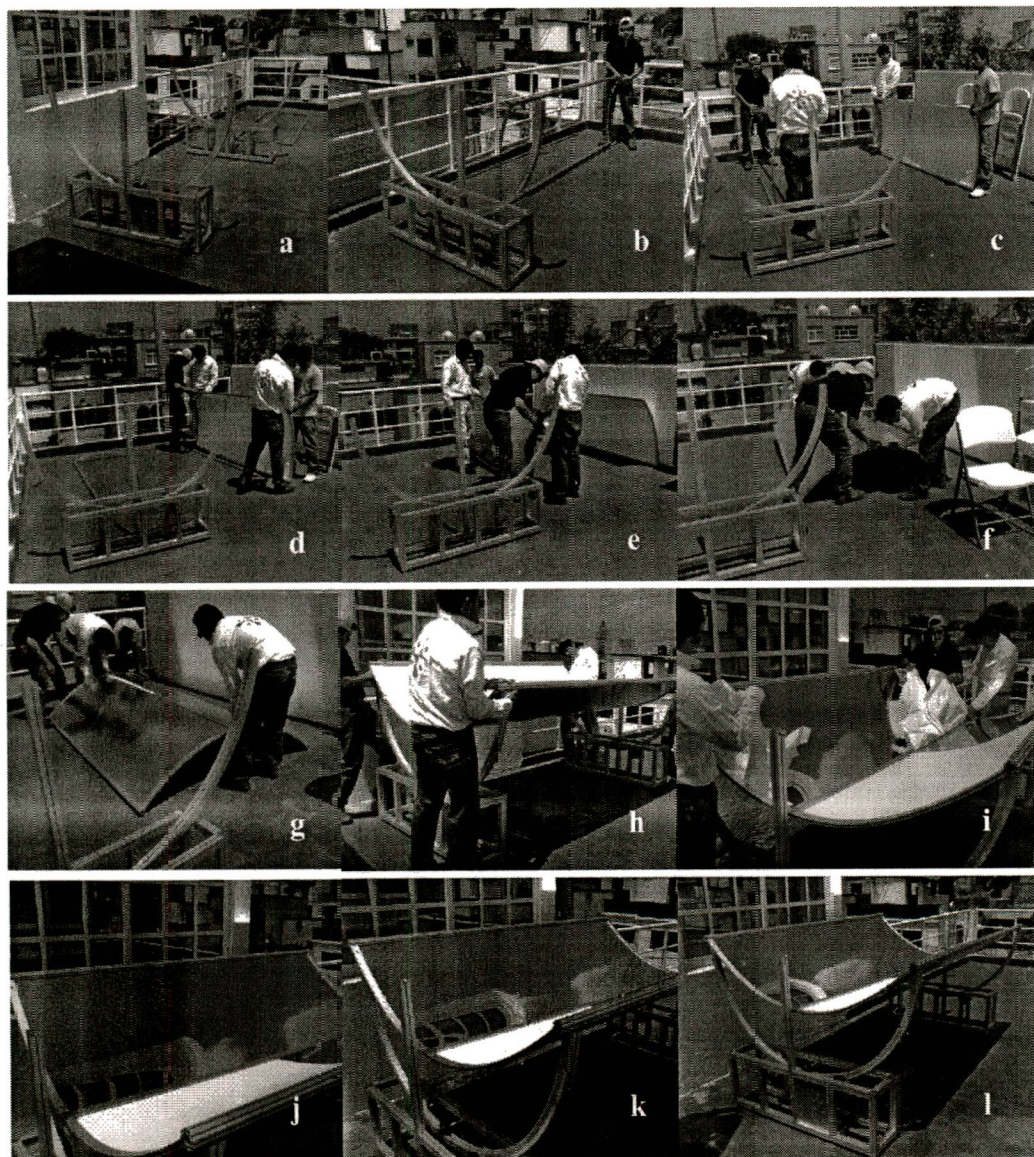


Figura 4.3. Ensamble de los paneles en el colector solar. a) – c) Ubicación del soporte del colector solar. d) – f) Colocación de los reflectores solares el marco. g) – i) Instalación del marco reflector en el soporte. j) – l) Calibración y orientación del colector solar. Fuente: Gallegos, D.; Hernández, H.; Jinés, J.A.; Torres, M., 2013.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.1.3 PRUEBAS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS

Para asegurar que la forma del perfil parabólico del concentrador conserva su geometría, es necesario estudiar la deformación que sufre el arreglo estructural, para fue requerido hacer un estudio en sitio, a fin de contar con las condiciones ambientales a las que será sometido el módulo concentrador.

Con el apoyo de especialistas del Laboratorio de Materiales del IPN, se realizaron pruebas para conocer la variaciones en la forma del reflector, aplicando la técnica CDIN, que a través de la recolección de imágenes con una cámara CCD sobre un periodo de tiempo determinado; se realiza una comparativa por medio de un procesador de imágenes que permiten identificar los desplazamientos y deformaciones de la superficie reflectora (Gallegos, D.; Hernández, H.; Jinés, J.A.; Torres, M., 2013).

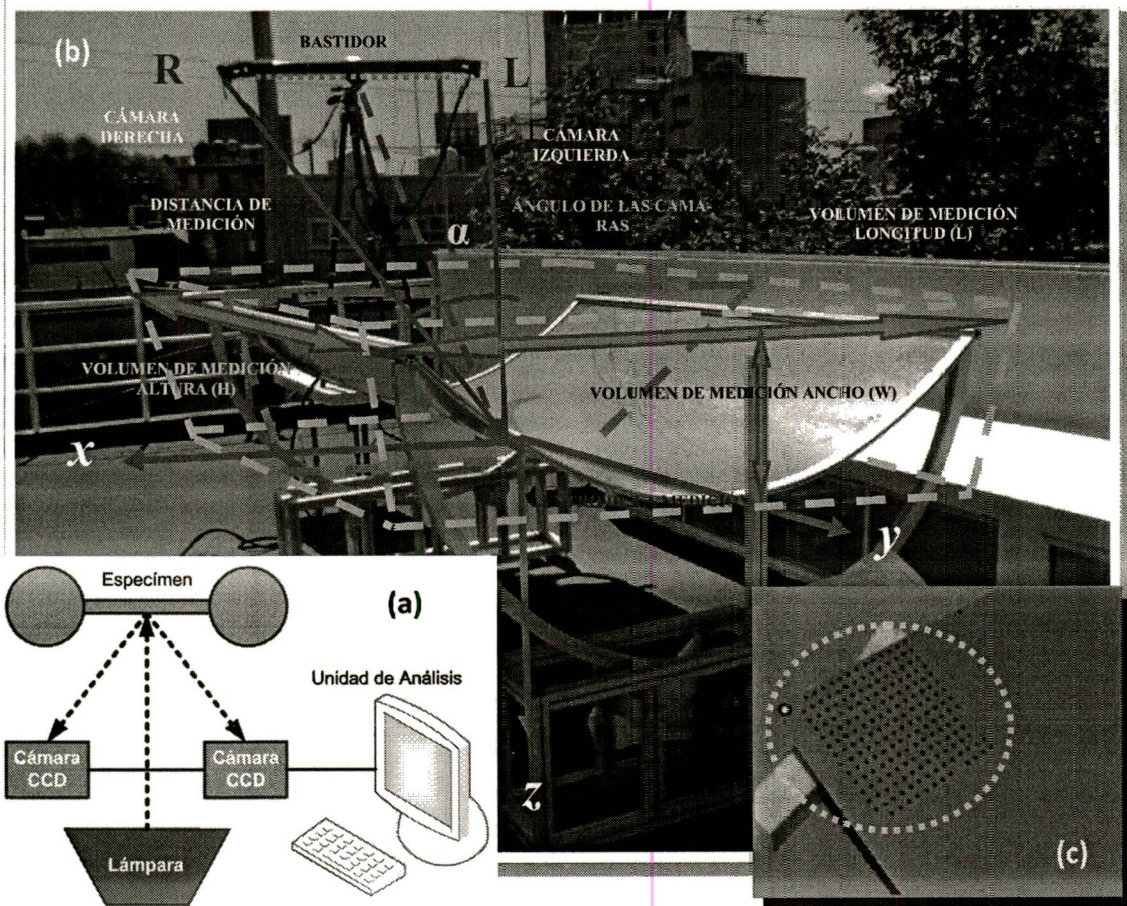


Figura 4.4. Metodología de correlación de imágenes numéricas. (a) Esquema general del equipo utilizado. (b) Arreglo de cámaras CCD y el MCPP. (c) Sección de superficie reflectiva con puntos de vinil adhesivo.

Fuente: Gallegos, D.; Hernández, H.; Jinés, J.A.; Torres, M., 2013.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DEFORMACIONES MECÁNICAS

En la figura 4.5 se muestran gráficamente los resultados del estudio, donde se localizaron las zonas de mayor y menor desviación en la dirección focal, así como el perfil de temperaturas observado al zenit para un día con radiación solar promedio de 750 W/m^2 .

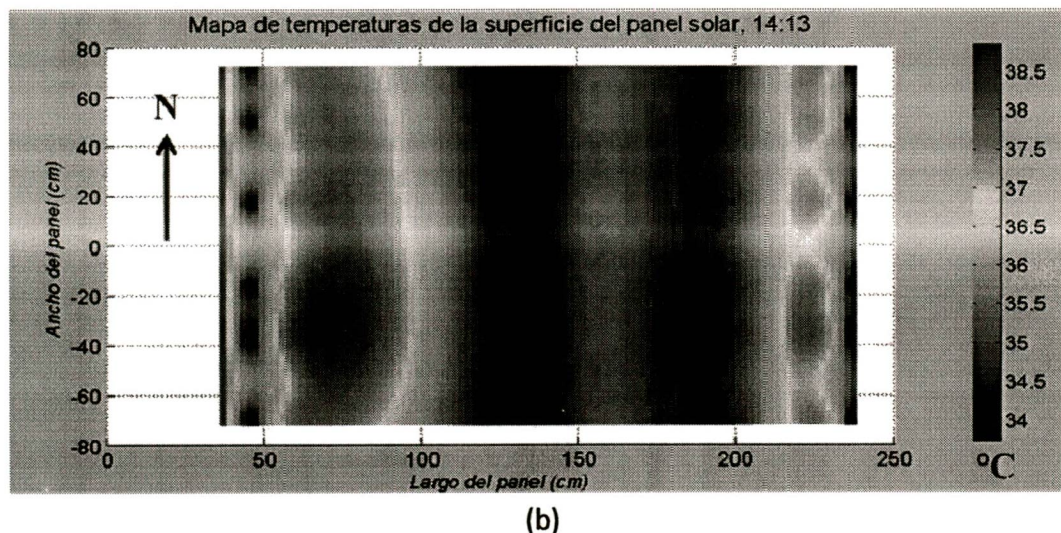
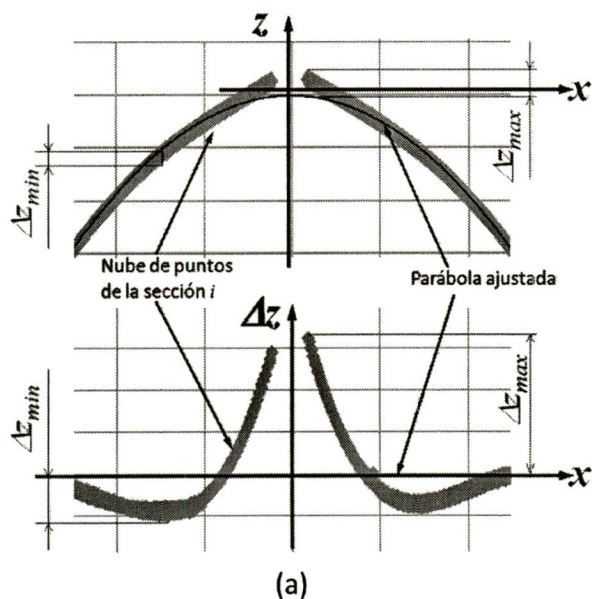


Figura 4.5. Resultado del análisis de deformación de la superficie reflectora. (a) Localización de las zonas de mayor y menor desviación en dirección focal. (b) Mapa térmico del panel solar al zenit mediante una aproximación de cuarto orden de los datos térmicos experimentales.

Fuente: Gallegos, D.; Hernández, H.; Jinés, J.A.; Torres, M., 2013.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.1.5 CONCENTRACION SOLAR EN EL RECIBIDOR

Con respecto al nivel de concentración y el ajuste de la superficie reflectiva a una geometría de canal parabólico, a continuación se muestra una imagen que permite visualizar el nivel de concentración de los rayos solares sobre el tubo receptor.

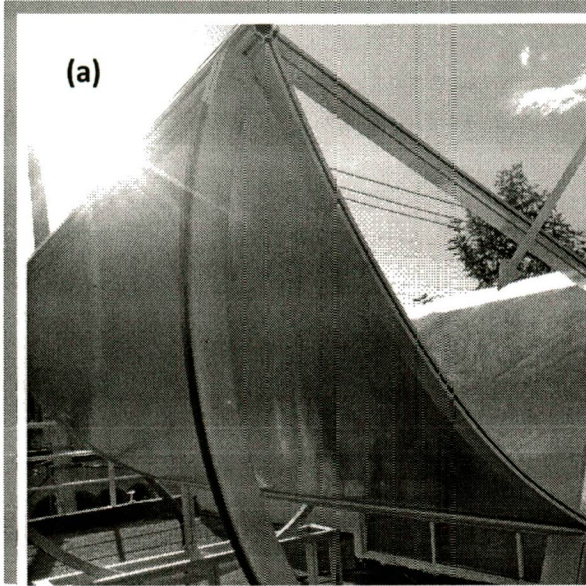
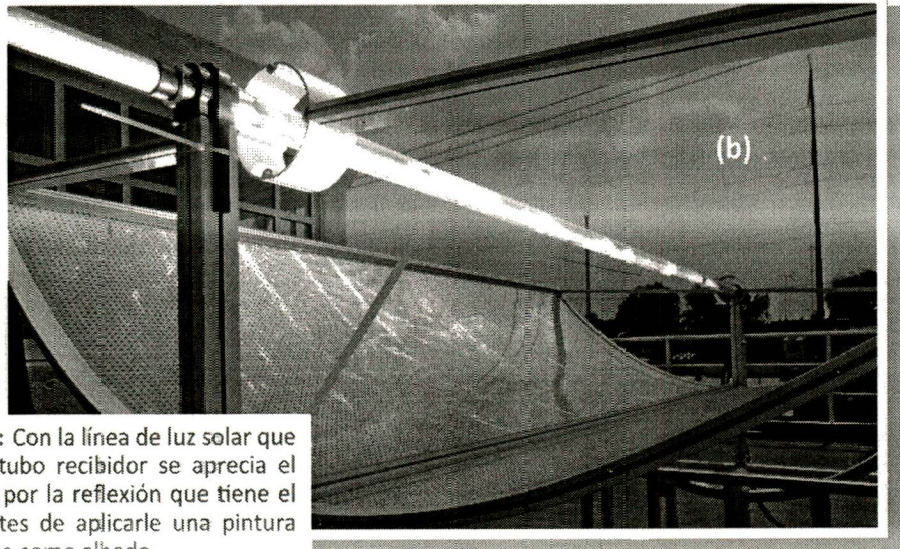


Imagen Reflejada: Línea de luz solar concentrada generada por el reflector parabólico sobre una superficie de referencia.

Este proceso sirve como parámetro para conocer la forma de la imagen reflejada y para verificar el proceso de alineación del MCCP.



Concentración Solar: Con la línea de luz solar que se genera sobre el tubo receptor se aprecia el nivel de iluminación por la reflexión que tiene el tubo absorbedor antes de aplicarle una pintura selectiva que funciona como albedo.

Figura 4.6. Línea de luz solar concentrada
(a) Sobre una superficie de prueba. (b) Sobre el tubo receptor.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.2 SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

De acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en los requerimientos, se construye la propuesta del subsistema de movimiento.

Es importante destacar que el diseño de este subsistema representa una revolución en el campo de la energía solar, debido a su gran precisión en el posicionamiento angular del MCCP, su bajo consumo de energía, así como por su bajo costo de fabricación, operación y mantenimiento.

La integración de este subsistema se presenta a detalle en la siguiente imágenes.

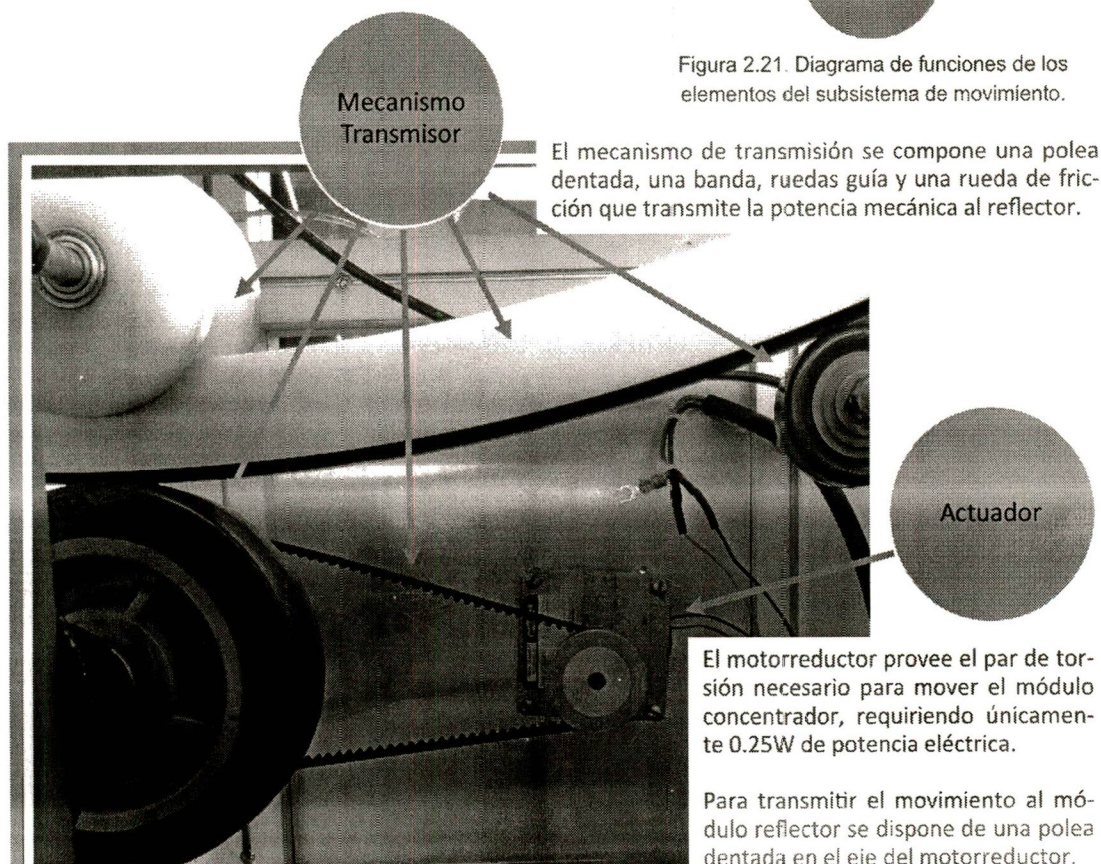
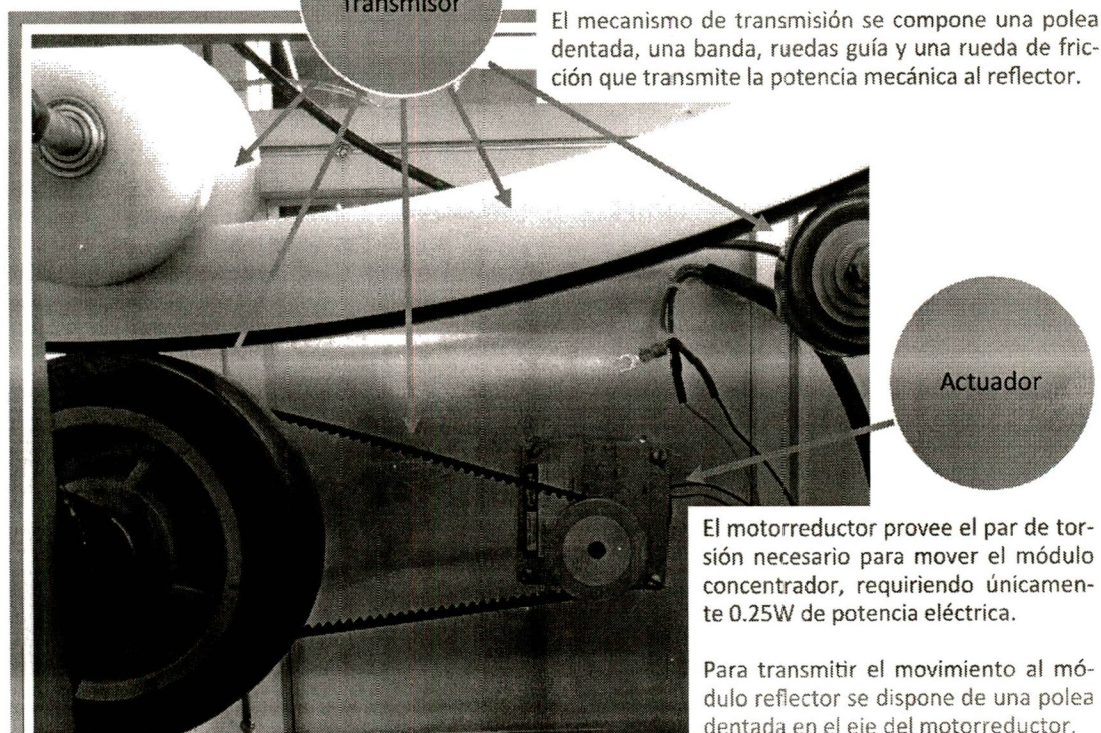


Figura 2.21. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema de movimiento.



El mecanismo de transmisión se compone una polea dentada, una banda, ruedas guía y una rueda de fricción que transmite la potencia mecánica al reflector.

El motorreductor provee el par de torsión necesario para mover el módulo concentrador, requiriendo únicamente 0.25W de potencia eléctrica.

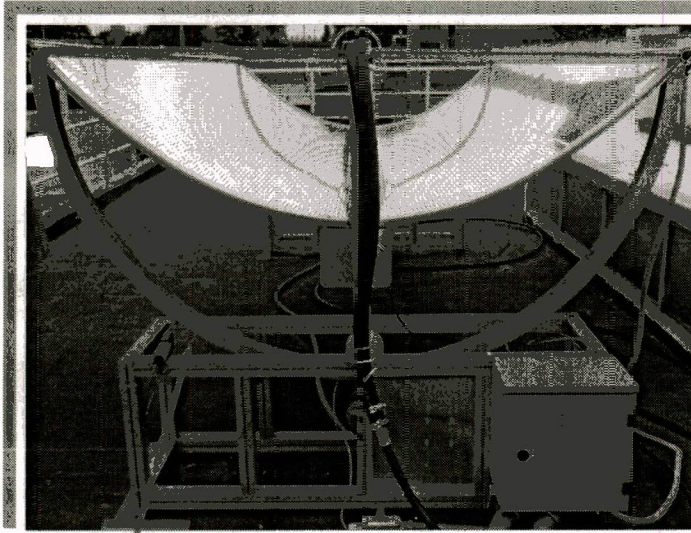
Para transmitir el movimiento al módulo reflector se dispone de una polea dentada en el eje del motorreductor.

Figura 4.7. Subsistema de movimiento montado en el MCCP.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.2.1 POSICIONAMIENTO DEL REFLECTOR

Para observar con mayor detalle el proceso de posicionamiento del reflector, a continuación se presentan algunas imágenes donde se aprecia a detalle el subsistema de movimiento.



Estado de reposo

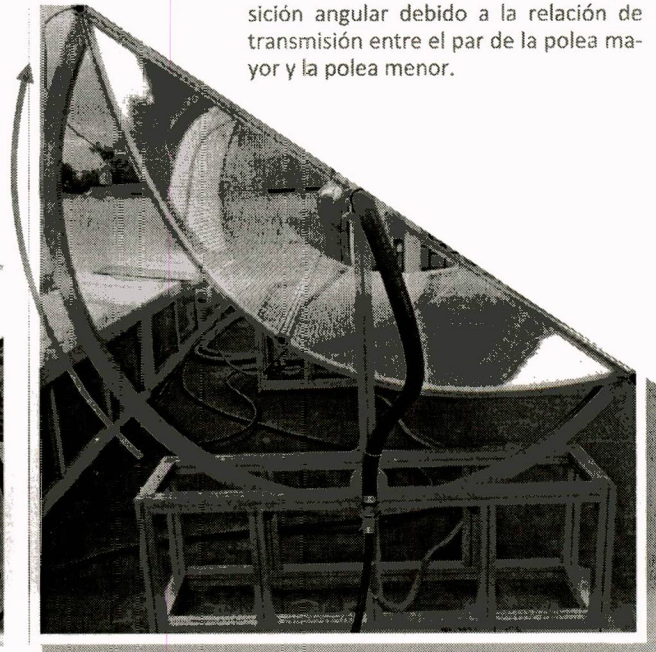
Para comprobar la precisión en el movimiento angular del reflector, es necesario referenciar el sistema a un punto de inicio, el cual es ubicado en la posición de reposo del reflector, donde la gravedad lo ubica en su estado de equilibrio.

Posteriormente se activa el actuador para comenzar el movimiento rotacional del reflector sobre la estructura de soporte.

El ángulo máximo de giro es de 50° hacia el sur y 50° hacia el norte, y la velocidad angular es de $0.1^\circ/s$, con una precisión de 0.5° en el avance.

Una vez que el reflector es posicionado en el ángulo requerido, el motor debe ser desactivado y manteniéndose la posición angular debido a la relación de transmisión entre el par de la polea mayor y la polea menor.

Sentido de giro del reflector



Sentido de movimiento de los elementos del subsistema de movimiento

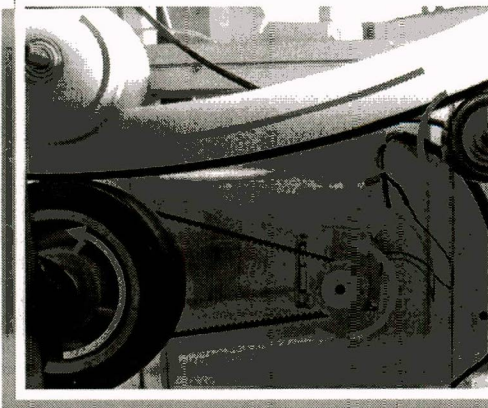


Figura 4.8. Funcionamiento del subsistema de movimiento.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.3 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

De acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en los requerimientos, se construye la propuesta del subsistema hidráulico.

Para lograr cumplir con los requerimientos, se han seleccionado elementos y componentes de fácil manejo tanto para su instalación en sitio y también versatilidad para su transporte.

Con respecto a la funcionalidad del subsistema los requerimientos con mayor importancia son los niveles de temperatura y presión que deben soportar, así como su durabilidad bajo esas condiciones de trabajo.

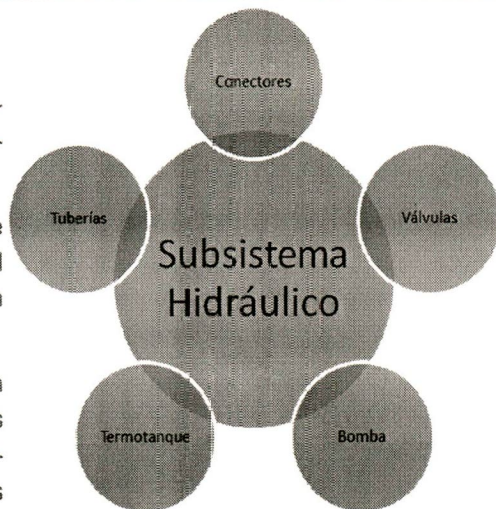
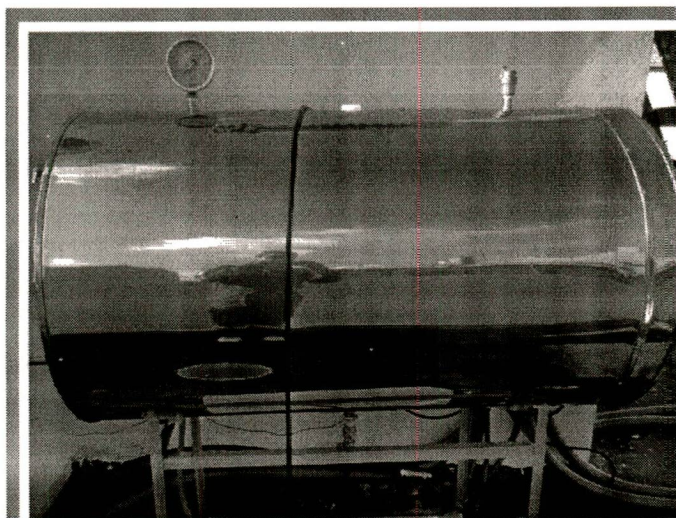


Figura 2.28. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema hidráulico.



El termotanque está especialmente diseñado para soportar hasta 7 kg/cm^2 , el volumen total que puede contener es de 300 litros. Dispone de entradas de diferentes medidas para que pueda ser instrumentado con medidores de carátula tanto de presión como de temperatura, sensores electrónicos de nivel y de temperatura, así como de válvulas de seguridad de alivio de presión y de aire.

La salida de agua fría y de salida de agua caliente se encuentran en las caras opuestas del tanque, la válvula de drenado se encuentra en la parte inferior del tanque.

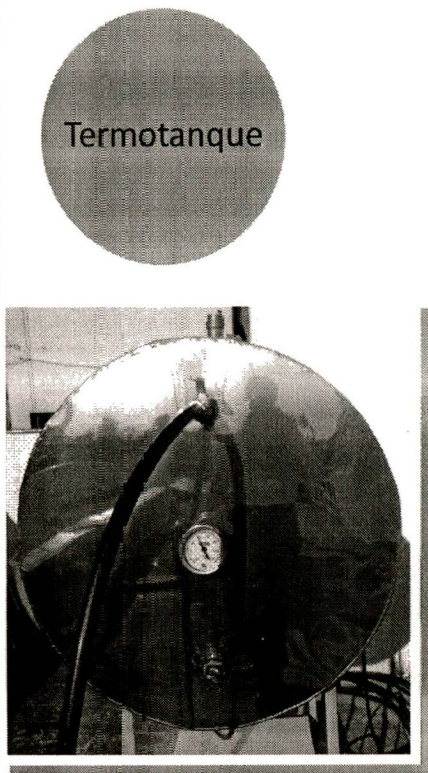


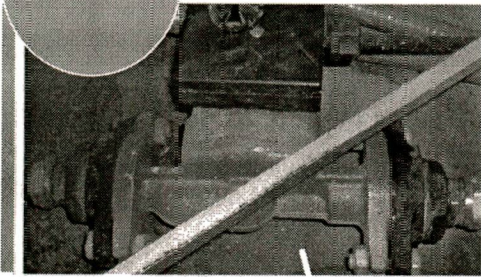
Figura 4.9. Termotanque instalado en sitio.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.3.1 ELEMENTOS DEL SUBSISTEMA HIDRÁULICO INSTALADOS EN SITIO

Para observar con mayor detalle algunos de los componentes del subsistema hidráulico, a continuación se presentan imágenes que sirven para ilustrar el montaje del mismo.

Bomba



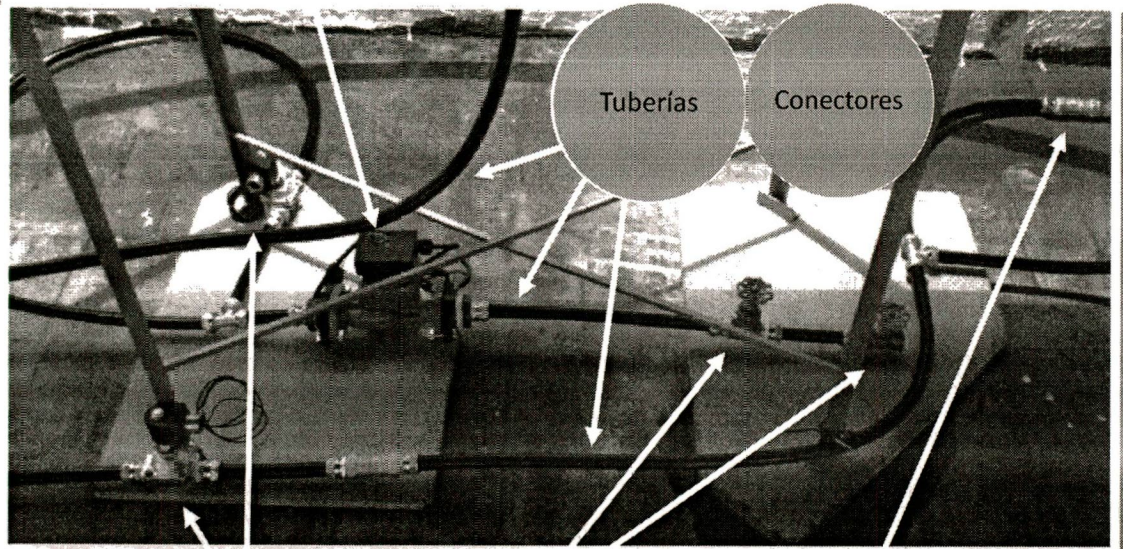
La bomba suministra energía cinética a la sustancia de trabajo forzándola a circular en el recipiente y de esta forma incrementar también su calor interno.

La tubería está fabricada con un polímero especial capaz de soportar temperaturas de hasta 110 °C y presiones de hasta 10 kg/cm².

Las válvulas controlan la dirección de flujo del fluido en el circuito hidráulico y también sirven como elementos de seguridad, como el caso de las válvulas de alivio.

Tuberías

Conectores



Válvulas

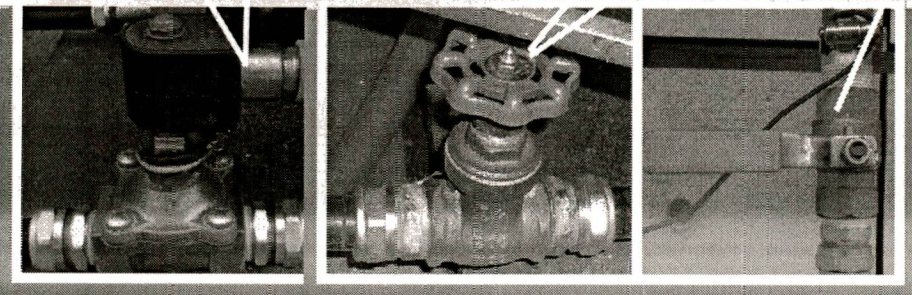


Figura 4.10. Elementos en detalle del subsistema hidráulico instalados en sitio.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.4 SUBSISTEMA DE CONTROL

El subsistema de control es el encargado de regular todos los procesos del STCCP, como son la lectura y registro de las variables que intervienen en el proceso de calentamiento, así como la activación de los actuadores y alarmas.

Adicionalmente el subsistema de control aloja la interfaz con la que interactúa el usuario y que le permite visualizar y modificar los parámetros de operación.

Para disponer de los datos que son registrados en la memoria del subsistema de control, éste tiene una interfaz para conectar una PC.

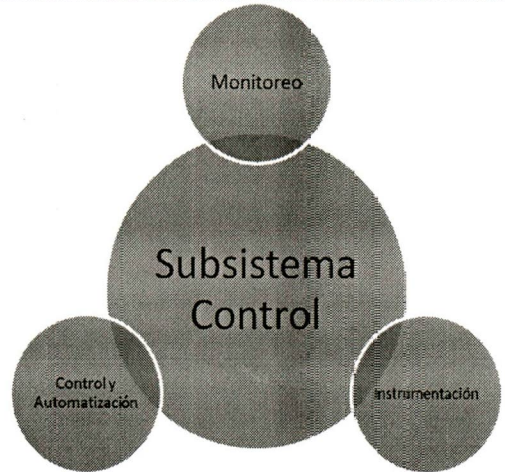
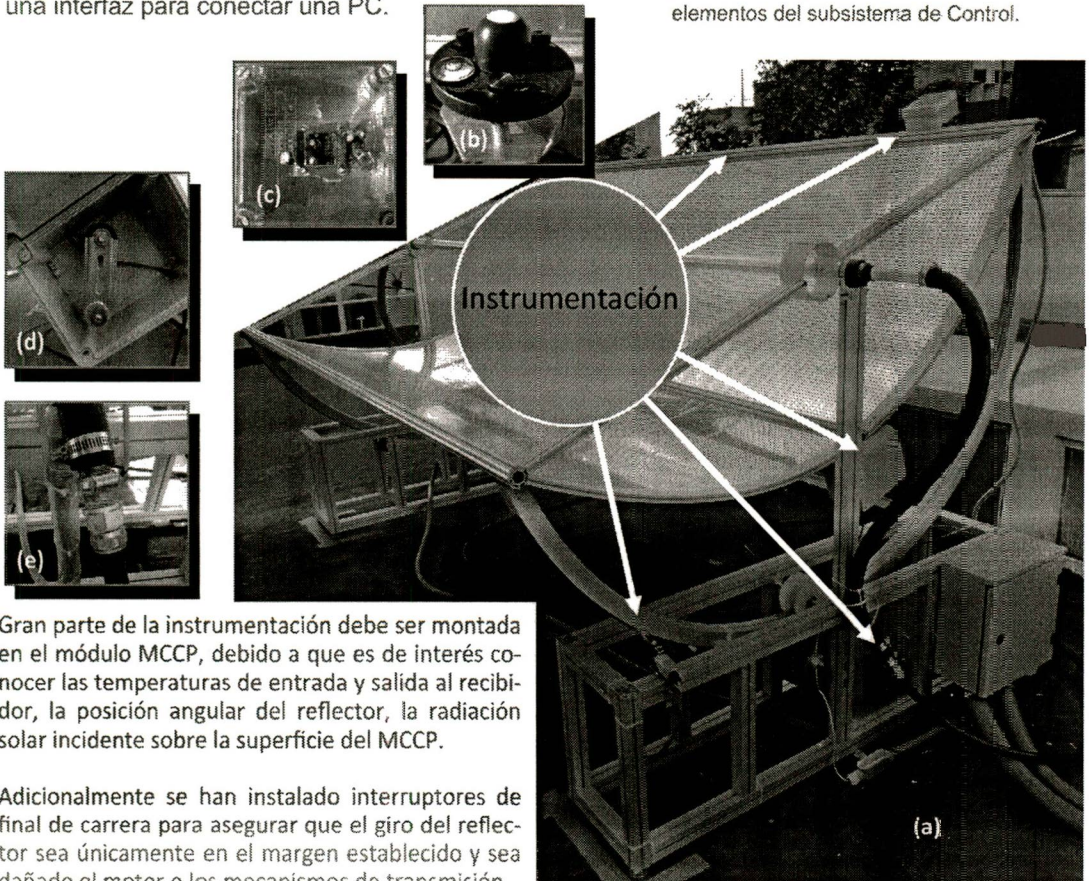


Figura 2.32. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema de Control.



Gran parte de la instrumentación debe ser montada en el módulo MCCP, debido a que es de interés conocer las temperaturas de entrada y salida al receptor, la posición angular del reflector, la radiación solar incidente sobre la superficie del MCCP.

Adicionalmente se han instalado interruptores de fin de carrera para asegurar que el giro del reflector sea únicamente en el margen establecido y sea dañado el motor o los mecanismos de transmisión.

Figura 4.11. Instrumentación del MCCP (a) Montaje en el MCCP, (b) Piranómetro montado en el MCCP, (c) Seguidor solar, (d) Encoder Incremental, (e) Termopar montado en la entrada del MCCP, (f) Interruptor de fin de carrera, (g) Motor de transmisión.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.4.1 SUBSISTEMA DE CONTROL: INSTRUMENTACIÓN

El resto de la instrumentación del STCCP se ubica en el Termotanque, estas variables son: la temperatura de la sustancia de trabajo que es medida directamente en el termotanque por un termómetro bimetalico de carátula, y también por un termopar que envía una señal eléctrica al tablero de control.

El flujo de recirculación de la sustancia de trabajo y el nivel de sustancia en el tanque son monitoreadas con sensores electrónicos para su visualización y registro en el tablero de control.

La presión manométrica es una de las variables que deben mantenerse siempre dentro de los rangos de seguridad de operación requeridos, tanto para resguardar la integridad de los equipos como de los operadores y usuarios.

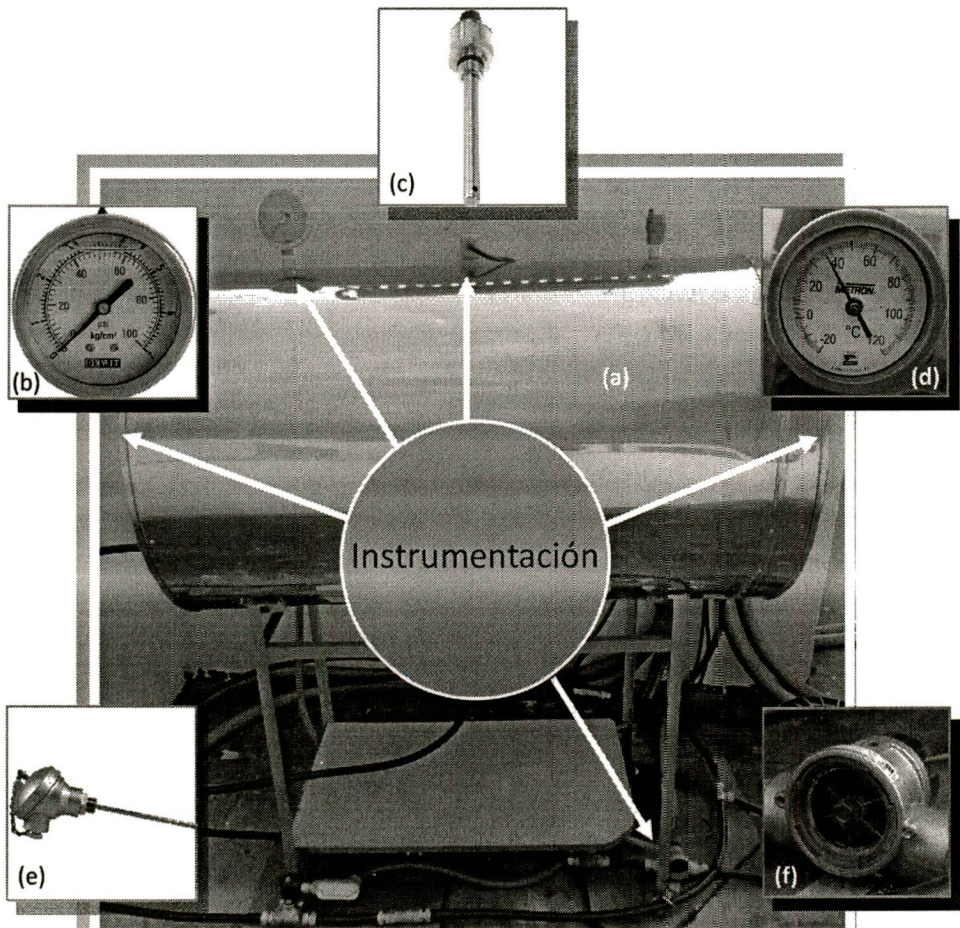


Figura 4.12. Instrumentación del Termotanque (a) Montaje en el Termotanque, (b) Manómetro de Carátula, (c) Sonda de Nivel, (d) Termómetro de Carátula, (d) Termopar, (f) Medidor de Flujo.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.4.2 SUBSISTEMA DE CONTROL: CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Los elementos de control y automatización son todos los dispositivos que permiten integrar las variables del proceso, así como generar acciones para regular el estado de las variables que se controlan. Estas acciones pueden llevarse a cabo de forma manual o de manera automática.

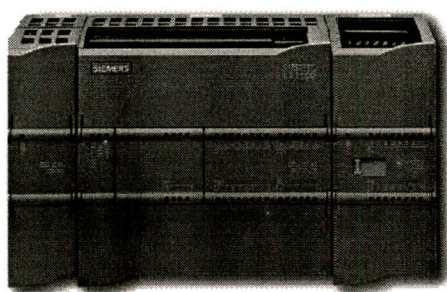
Para que las acciones se lleven a cabo de forma automática es requerido contar con un controlador automático, en este caso se ha seleccionado un Controlador Lógico Programable (PLC) de la marca SIEMENS, que nos permite procesar las señales de campo de manera digital para que por medio de programación puedan realizarse las acciones que regulan el estado de las variables del proceso.

Las señales que recibe el PLC, pueden ser de tipo analógico o digital, dependiendo del tipo de sensor que se trate, por ejemplo los termopares y el piranómetro, se manejan señales de tipo analógico que varían de 0 a 20 mA y de 0 a 5 VCD respectivamente. Los sensores de flujo y de posición angular son señales digitales de alta frecuencia, mientras que los sensores de final de carrera, el sensor de nivel y el sensor seguidor solar generan señales digitales binarias.

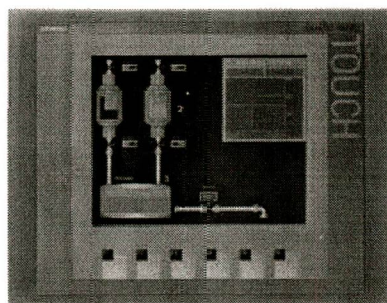
Una vez que el controlador adquiere las señales de campo, estas son procesadas a través de una lógica que es previamente programada, el resultado del procesamiento es la activación o desactivación de los actuadores.

Los actuadores utilizados en el STCCP son alimentados con energía eléctrica, requiriendo diferentes niveles de tensión y corriente para su funcionamiento, por ejemplo para el caso de las electroválvulas y la bomba de recirculación ubicados en el tanque, se emplean 110 V de corriente alterna para ambos casos y niveles de corriente de 300 mA y 1 A respectivamente. El motor para el posicionamiento del reflector utiliza 12 V de corriente directa y demanda 30 mA.

Los parámetros de operación son configurados a través de un panel de proceso donde es posible visualizar todos los estados y alarmas, para ello se dispone de una pantalla tipo táctil que es programada a través de la herramienta STEP 7.



(a)



(b)

Figura 4.13. Elementos del subsistema de control.
(a) PLC SIEMENS S7-1200 (b) Panel táctil para configuración.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.4.3 SUBSISTEMA DE CONTROL: CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Existen otra serie de dispositivos que permiten adecuar las señales que llegan desde los sensores al controlador y que salen del mismo hacia los actuadores en campo y las alarmas del tablero de control, estos adaptadores transducen diferentes niveles de corriente y de tensión a otros que sean adecuados para la lectura o envío de señales.

Para el caso de los sensores encontramos a la tarjeta que convierte señales de termopar de 4 a 20 mA a señales digitales y a la tarjeta transductora de nivel a estados binarios. Referente a los actuadores se utilizan el drive para la regulación de velocidad/aceleración/par de torsión del motorreductor así como relevadores para activación y cambio de giro; de igual forma se utilizan relevadores electromecánicos para la activación de las electroválvulas y la bomba. En el caso del calentador auxiliar se debe emplear un relevador de estado sólido que permite ser activado con niveles de tensión de 3 a 30 VCD y la carga máxima de corriente es de hasta 8 A.

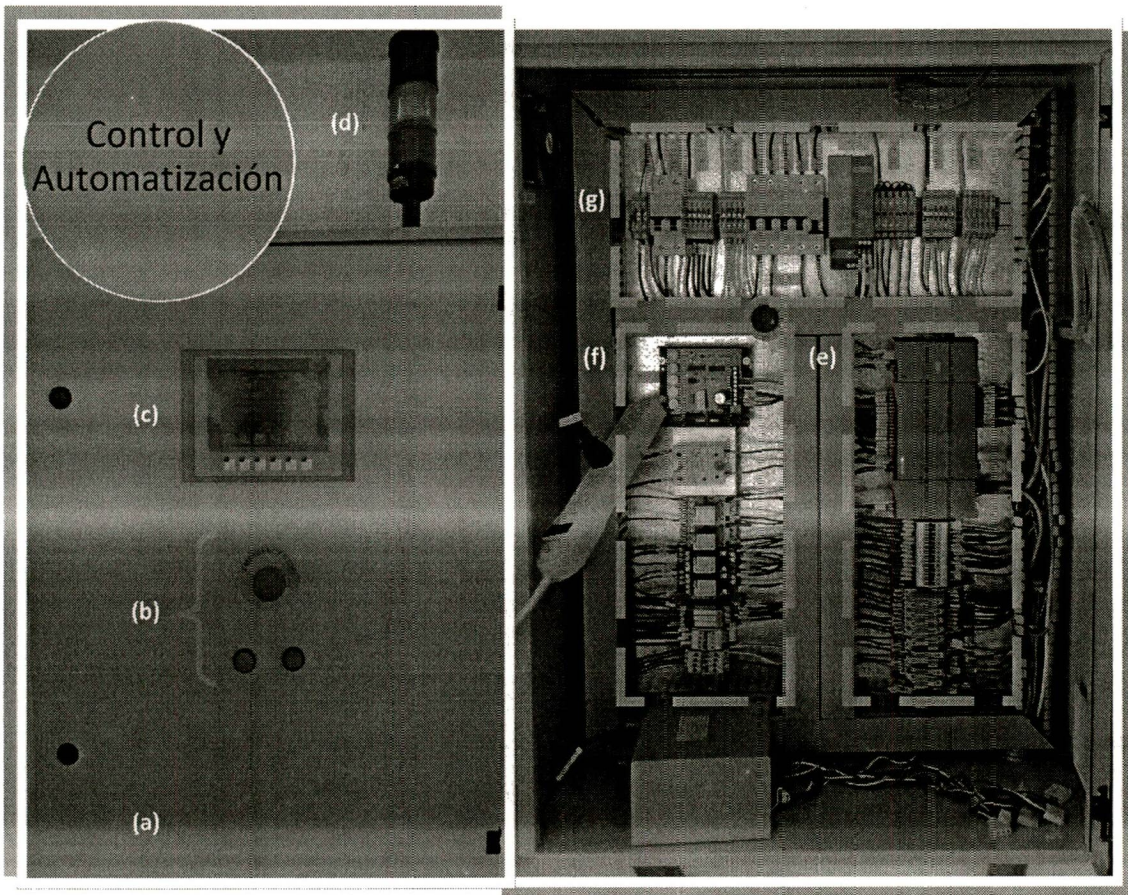


Figura 4.14. Gabinete de control (a) Parte frontal (b) Botones de arranque y paro y paro de emergencia (c) Panel táctil (d) Alarma de eventos (e) PLC y tarjeta termopares (f) Transductores, Relés y Drives (g) Protecciones eléctricas.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.4.4 SUBSISTEMA DE CONTROL: MONITOREO

El sistema de monitoreo consta de dos partes principales que están integradas dentro de PLC, la primera parte es la unidad de memoria interna del autómatas que permite registrar una serie de datos del proceso, principalmente las variables de campo.

La segunda parte es la interfaz de comunicación, que permite descargar los datos del PLC a un ordenador PC o laptop. Esta interfaz tiene una herramienta web precargada dentro de la memoria del PLC, la cual no requiere programación adicional para tener acceso a los datos, sino que se abre a través de un explorador comercial como *Internet Explorer, Mozilla o Chrome*.

La navegación dentro de la interfaz web es intuitiva, y están ordenadas de tal forma que se pueden identificar rápidamente los links para configuración y los links para acceder a los datos y descargarlos hacia la PC.

Los archivos generados tienen un formato universal llamado *Archivo Separado por Comas (CVS)*, el cual puede ser visualizado en un editor de texto plano o en un manejador de matrices como Excel, Matlab por citar algunos.

Finalmente los datos son procesados en el manejador de matrices o de texto plano para convertirlo en información útil, que nos permita visualizar el comportamiento histórico del STCCP,

Cabe señalar que el tiempo de almacenamiento de información, es decir, el periodo máximo la memoria interna del PLC podrá contener la información depende directamente del periodo de muestreo y de la cantidad de variables que se desean almacenar en la memoria, por ejemplo en este caso específico se monitorean 10 variables provenientes de los sensores de campo, sin embargo, se almacenan solo 7 de estas y adicionalmente 3 que corresponden a la posición angular con respecto al plano de rotación del reflector, el zenit y el azimut y que son calculados por la función SPA de seguimiento solar de SIEMENS-NREL para aplicaciones que fue cargada para el proyecto.

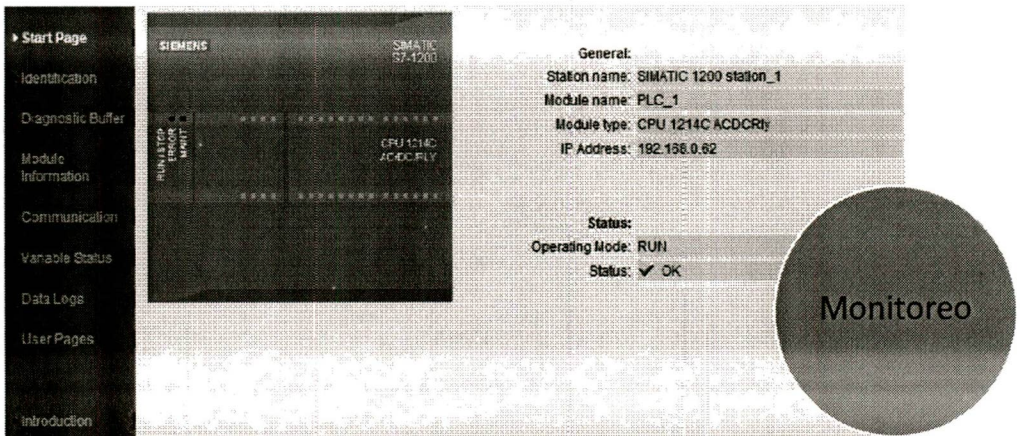


Figura 4.15. Interfaz del SIMATIC Web Server de SIEMENS.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.4.5 SUBSISTEMA DE CONTROL: FUNCIÓN NREL-SPA-SIEMENS

Otra de las grandes ventajas que proporciona este autómata es que puede ser programado no solamente en el lenguaje convencional de contactos, memorias y temporizadores, sino que también permite la programación con bloques de función como la función NREL-SPA-SIEMENS, la cual calcula los vectores de posicionamiento solar: zenit y el azimut.

El zenit y el azimut son calculados por esta función en base a los siguientes parámetros: *longitud y latitud geográfica, elevación sobre el nivel del mar, presión atmosférica, temperatura ambiente, refracción atmosférica y la hora local.*

Los vectores zenit y azimut pueden ser utilizados directamente para realizar un seguimiento puntual del movimiento del Sol, es decir un seguimiento para un equipo solar que requiere un movimiento de dos grados de libertad como por puede ser un concentrador de disco parabólico o un panel fotovoltaico con seguimiento puntual.

En la aplicación de un colector solar de canal parabólico, lo más conveniente es seleccionar solo un eje de giro, ya sea el eje Norte-Sur o el Este-Oeste, para lo cual se debe realizar una transformación de proyección de los vectores zenit y azimut sobre el plano de interés.

En el caso del seguimiento solar cuando la ubicación del eje de giro es Este-Oeste, se debe conocer la inclinación angular para el reflector con respecto al plano formado por el vector del Sur geográfico y de la normal con la superficie terrestre.

Para obtener la proyección del zenit sobre el plano YZ primero se debe calcular el vector de altura solar que es la diferencia entre un ángulo recto y el ángulo del zenit. Con el coseno de la altura solar multiplicado por un vector unitario se obtiene la proyección sobre el plano XY luego con el coseno del ángulo azimutal multiplicado por el resultado anterior se obtiene la proyección sobre el plano YZ. Finalmente con el arco tangente el seno de la altura solar entre el resultado anterior, es posible calcular el ángulo de inclinación al que debe inclinarse el reflector del MCCP.

A este resultado se le ha llamado ángulo sobre el Plano YZ y se presenta de este forma en el panel de proceso y también se registra en la memoria para su estudio posterior.

Delta T.	+67.0258	PLANO YZ
Latitud Geográfica	+19.402	+64.6598
Longitud Geográfica	-99.128	AZIMUT
Elevación	+2233.0	+287.608
Presión atmosférica	+785.603	ZENIT
Temperatura	+20.0	+81.8470
Reflección atmosférica	+0.0	

(a)

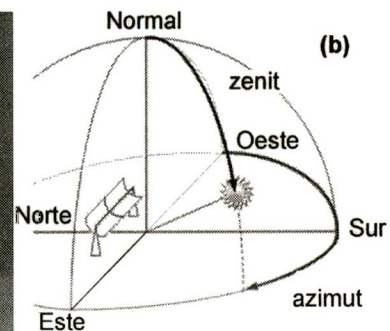


Figura 4.16. Función NREL-SPA-SIEMENS. (a) Pantalla de configuración en el panel de proceso de la función NREL-SPA-SIEMENS. (b) Diagrama de referencia para los vectores de la función NREL-SPA-SIEMENS.

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.5 SUBSISTEMA ELÉCTRICO

El subsistema eléctrico está conformado por elementos y componentes para adecuar los niveles de tensión y corriente que son utilizados en el STCCP, además de que provee protección contra cortos circuitos y sobre corrientes y sobre tensiones.

El subsistema de control está muy relacionado con el subsistema eléctrico, debido a que ambos son un conjunto de elementos y componentes para interrumpir o permitir el flujo de energía.

Los interruptores del subsistema de eléctrico son llamados interruptores generales y permiten que la potencia eléctrica que requiere el STCCP.

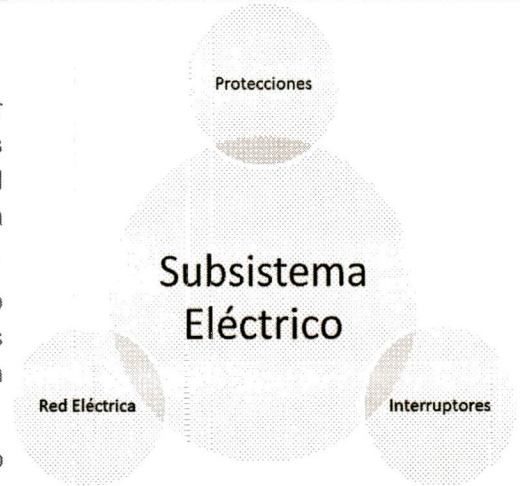
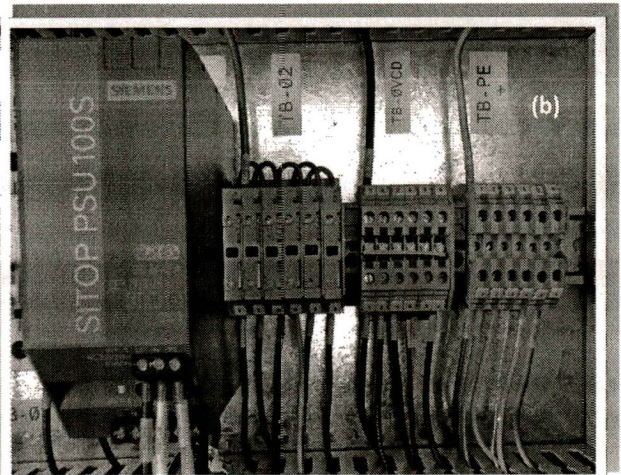
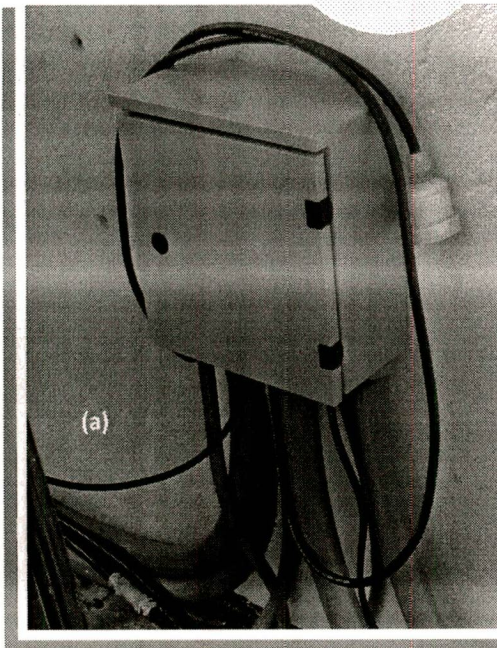


Figura 2.44. Diagrama de funciones de los elementos del subsistema Eléctrico.

Red Eléctrica



La red eléctrica se compone de todos los elementos de campo que permiten la conducción de la energía eléctrica, diferentes niveles de tensión y corriente, desde los conductores o cables, los gabinetes o puntos de distribución, ductos de protección para cables, hasta las fuentes de alimentación.

Los gabinetes de distribución alojan de forma segura a todos los elementos eléctricos, principalmente fuentes, y bornes de conexión. El tipo de protección depende del ambiente al cual estarán sometidos, por ejemplo para este proyecto todos los elementos se encuentran instalados a la intemperie, donde están expuesto al polvo y al agua, por lo tanto el grado de protección adecuado es del tipo IP65.

Figura 4.17. Componentes de la red eléctrica (a) Gabinete de conexión, ductos de protección para conductores y cables para conexión de equipos (b) Fuente de alimentación y bornes de conexión

4.1 SISTEMA IMPLEMENTADO EN SITIO

4.1.5.1 ELEMENTOS DEL SUBSISTEMA ELÉCTRICO

Las protecciones eléctricas son todos los elementos que permiten que los dispositivos tanto de campo como de dentro de los gabinetes, así como el usuario trabajen de forma segura y que en caso de una eventualidad, como por ejemplo un corto circuito o una falla en la alimentación, éstos nos resulten dañados.

Entre las principales protecciones están los fusibles que protegen contra sobrecorrientes, las fuentes conmutadas contienen protecciones internas contra sobretensiones que ocurren en la red de alimentación principal, también se ubican a los interruptores termomagnéticos.

Los interruptores termomagnéticos son dispositivos que nos ayudan a controlar el flujo de energía en la red eléctrica, seccionándola en circuitos para su manipulación segura, a modo que dentro de una red es común encontrar secciones divididas por tipos de carga que contiene o por un área específica de trabajo, por ejemplo para una industria se tienen interruptores específicos para la iluminación y otros para los motores o máquinas eléctricas de potencia, y en otros como por ejemplo en una casa se secciona la red por habitaciones.

En nuestro caso particular la red se ha dividido en cuatro secciones: *Control* (incluye al PLC y la pantalla táctil), *Instrumentación*, *Actuadores* y *Alarmas*.

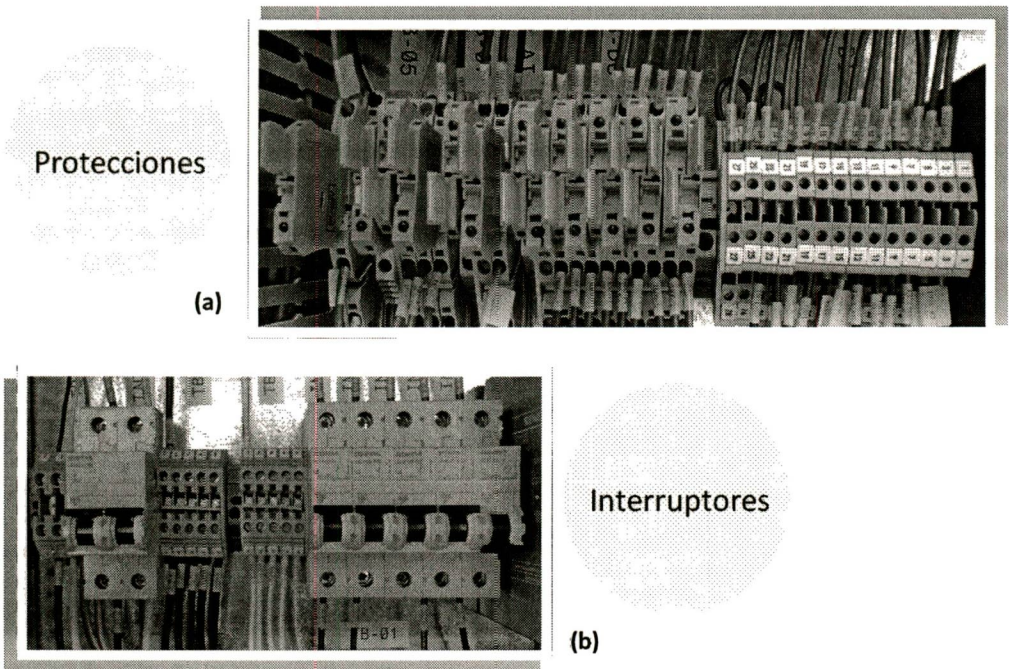


Figura 4.18. Componentes del subsistema eléctrico. (a) Fusibles para señales de campo y fusibles para actuadores. (b) Interruptores termomagnéticos para alimentación principal y para secciones.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2.1 RESULTADOS

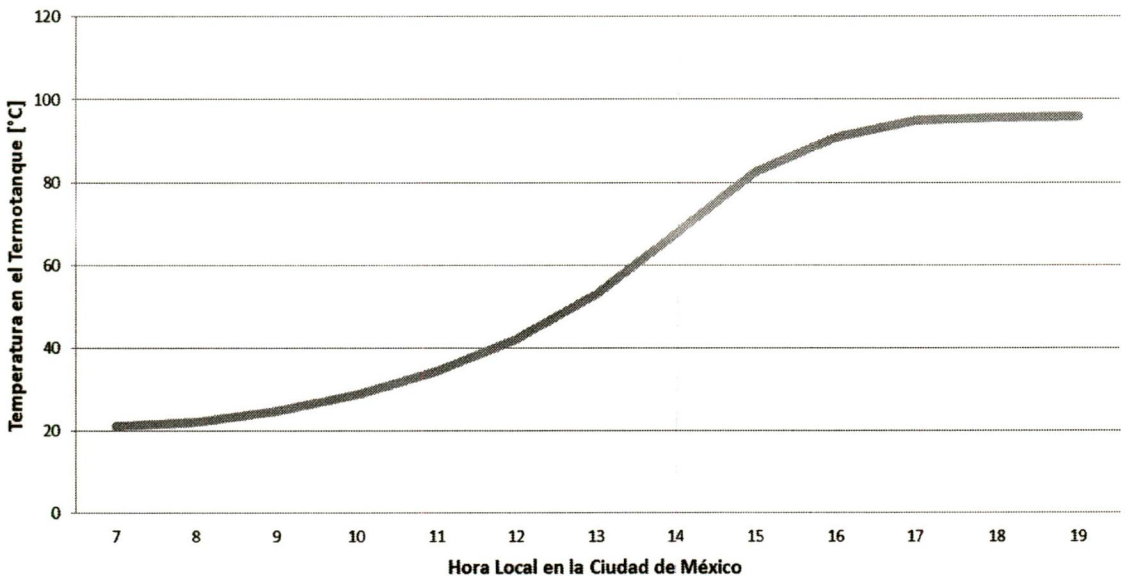
Una vez diseñado y construido el Sistema Termosolar de Concentración Canal Parabólico, se realizaron pruebas de funcionamiento en sitio, se evalúan los resultados obtenidos y se comparan con las premisas iniciales de diseño, a fin de conocer el nivel de cumplimiento y de saber si es necesario realizar mejoras o cambios.

4.2.1.1 PRUEBAS DE CALENTAMIENTO SOLAR: REGISTRO Y ANÁLISIS DE DATOS

Derivado de las pruebas realizadas al sistema de concentración solar y con apoyo del sistema de control y adquisición de datos, a continuación se presentan las gráficas obtenidas en uno de los días con mayor incidencia solar de este último periodo, que fue el viernes 26 de julio del 2013.

En la figura 4.19, se muestra la gráfica de temperatura del agua dentro del termotanque a lo largo del día 26 de julio del 2013. Se observa el comportamiento de un sistema de primer orden, tal como se planteó en el diseño matemático, la temperatura máxima alcanzada es de 80 °C, valor que se debe comparar con la información del diseño preliminar para condiciones de energía solar promedio de 19 MJ/m² para un día despejado, puesto que la energía solar promedio incidente para el día del experimento fue de 21 MJ/m².

El flujo volumétrico fue de 28 litros/minuto con el fin de aumentar la turbulencia del fluido de trabajo, y con ello la transmisión de energía desde el absorbedor.

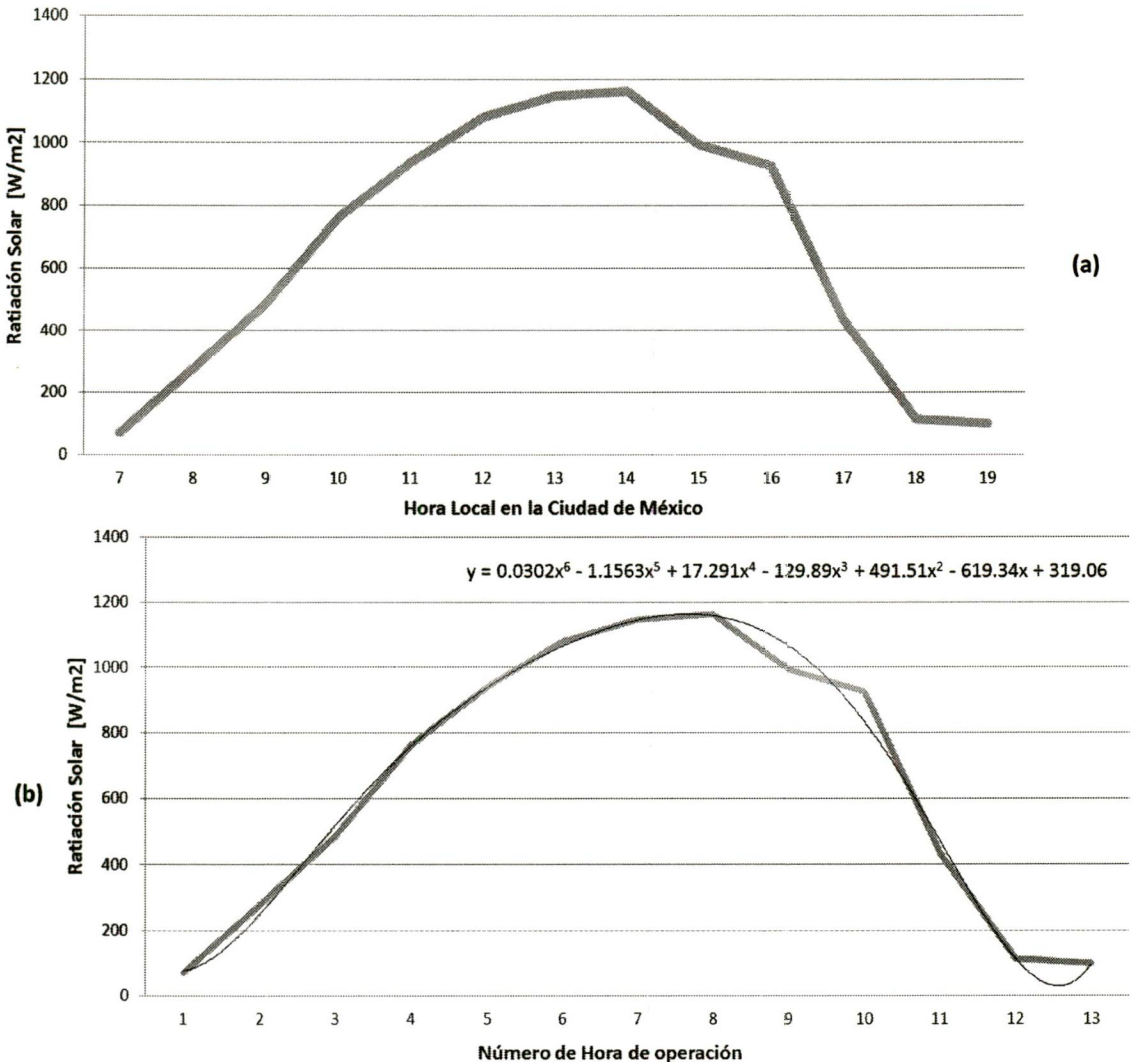


Gráfica 4.1. Temperaturas en grados Celsius alcanzadas en el termotanque, los puntos trazados corresponden al promedio por hora.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 4.2 se muestra la de radiación solar para para el día 26 de julio, que es medida sobre el plano recto del MCCP. La integración de energía nos indica un aprovechamiento de hasta un 65% de la energía incidente en el módulo concentrador solar, con el inicio del calentamiento a las 9 horas y finalización a las 17 horas, con una temperatura inicial del agua de 25 °C.

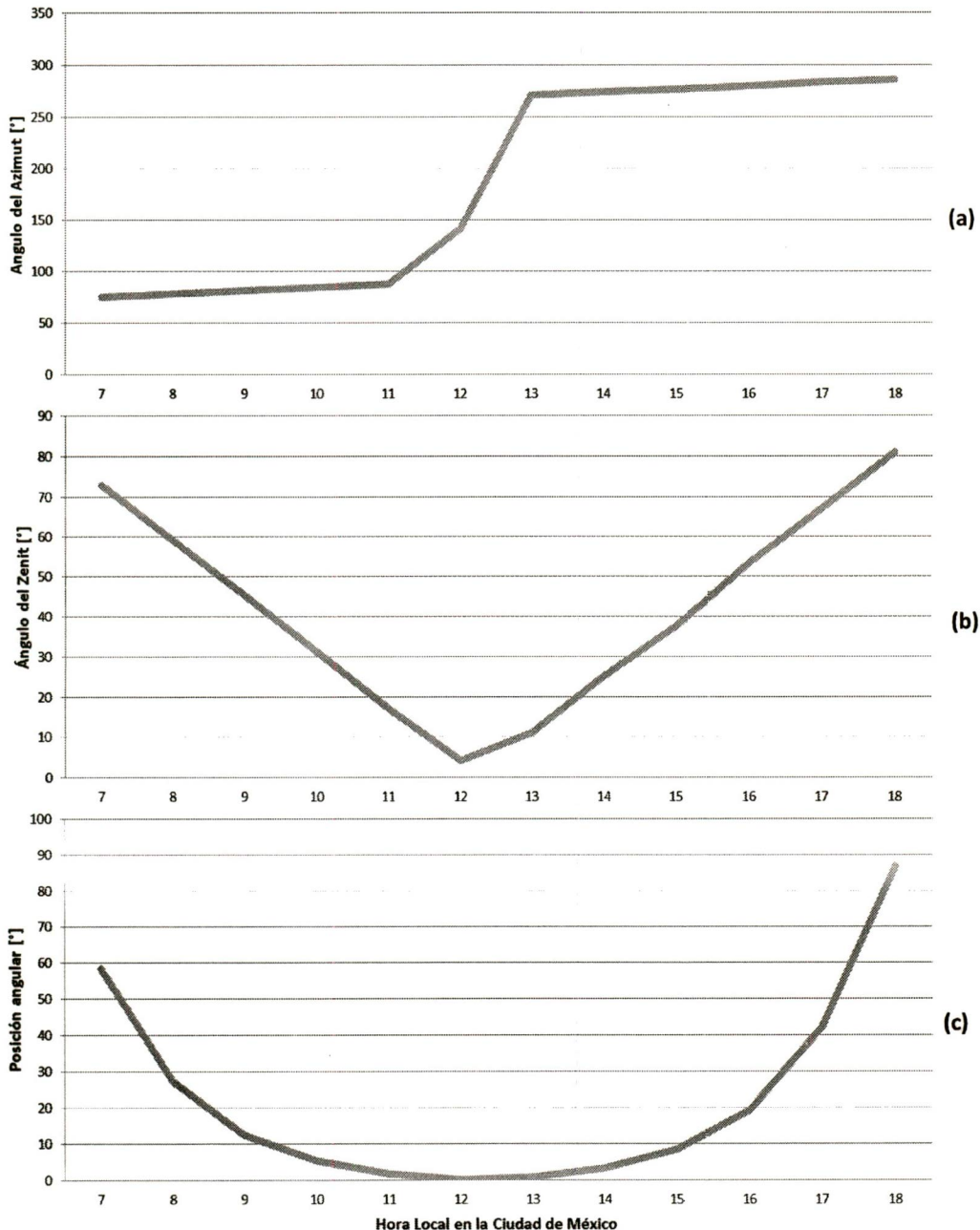
El método de integración de la energía radiante sobre el plano recto del reflector consistió en registrar los datos de radiación cada 3 minutos, posteriormente estos datos fueron ordenados en una tabla de Excel y mediante el método de regresión polinómica se obtuvo un modelo matemático en una ecuación de sexto grado. Finalmente mediante MATLAB, se realiza la integración del modelo en el rango seleccionado y se obtiene la energía incidente de 21 MJ/m².



Gráfica 4.2. Radiación solar incidente sobre el plano recto de la parábola (a) En la escala de tiempo de la hora local para la Ciudad de México (b) Comparada con su curva aproximada de sexto orden.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con referencia a los ángulos de seguimiento solar, en la figura 4.21 se presentan gráficamente tanto los vectores calculados del zenit y del azimut, como los ángulos de posicionamiento del MCCP, que fueron registrados por medio del autómeta.



Gráfica 4.3. Graficas de ángulos solares (a) Ángulo Azimutal (b) Ángulo Zenital (c) Posición angular del reflector leída por el encóder incremental.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se evalúan los parámetros de diseño en base a los resultados obtenidos:

- I. Incrementar la temperatura de un volumen de 90 litros de agua hasta 80 grados centígrados por cada metro cuadrado de MCCP instalado, en un periodo de 6 horas, para una localidad donde la radiación incidente sobre el plano horizontal sume la cantidad de 19 MJ/m².

Realizando el cálculo de rendimiento de energía, dividiendo la energía almacenada dentro de la sustancia de trabajo entre la energía recibida por el MCCP, se determina que su valor es del 60%, equivalente a calentar un volumen de agua de 50 litros a 80 grados centígrados.

Se concluye que se alcanzó parcialmente el valor deseado de energía almacenada, deberá observarse si la pérdida de energía en las tuberías y conexiones metálicas afectan son las causantes del bajo rendimiento del STCCP.

- II. Se considera que el cliente no cuenta con personal especializado para operar del STCCP, se debe contar con un panel de control de secuencia, apoyada por un manual de operación.

Se alcanzo el objetivo al implementar un panel de control para regular, visualizar y monitorear los procesos del STCCP. El panel tiene un manejo intuitivo y no requiere de personal con alta especialización para manipularlo. Los automatismos son sencillos de entender y las alarmas actúan de manera oportuna.

- III. Se requiere que el STCCP, pueda ser integrado con un sistema de calentamiento auxiliar de gas, diesel o eléctrico, a fin de asegurar el suministro de energía cuando el recurso solar sea escaso o nulo.

Se alcanzo el objetivo al implementar un calentador auxiliar eléctrico que permite complementar el calentamiento de la sustancia de trabajo.

- IV. Las tuberías, bombas, válvulas y accesorios, que interconectan el Termotanque y el MCCP deben funcionar bajo una presión promedio de 7 kg/cm² y máxima de 10 kg/cm². El rango de temperatura de trabajo es de -18 a 93 °C, considerando agua como fluido de calentamiento, a fin de evitar su evaporización.

Se alcanzo el objetivo al diseñar un termotanque que soporta presiones de hasta 7 kg/cm² y al utilizar uniones roscadas para la sujeción en tuberías y elementos del subsistema hidráulico.

- V. El STCCP será alimentado con una tensión e 127 V de corriente alterna, o a través de una fuente de 48 o 24 V de corriente directa.

Se alcanzo el objetivo con un gabinete de control con fuente conmutada.

- VI. Debe representar un beneficio económico en comparación con no adquirir el STCCP. El valor económico de la unidad energética producida por el STCCP, debe ser evaluada en su BAUE y comparado con el costo energético actual.

Se deben seguir haciendo pruebas para evaluar este requerimiento.

CONCLUSIONES



UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

5.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten evaluar el Sistema Termosolar de Concentración de Canal Parabólico (STCCP), observándose que fueron alcanzados la mayor parte de los requerimientos.

Es importante mencionar que durante la implementación del sistema se realizaron cambios al diseño original debido a la factibilidad de conseguir materiales con proveedores locales o también realizar mejoras en la funcionalidad con base al diseño considerado.

Las temperaturas alcanzadas en el termostanque para el mes de julio oscilan entre 50 a 80 °C debido a que se tienen una gran cantidad de días nublados, afectando en gran medida el rendimiento del STCCP, sin embargo estos datos son relevantes porque permiten tener información de su comportamiento en días de poca radiación.

Entre los productos generados en este trabajo, se destacan los siguientes:

- I. La creación de un módulo de Micro Concentración de Canal Parabólico de rápida integración en sitio, gracias a sus componentes y formas de ensamble, éste puede ser ensamblado por dos instaladores en un tiempo de 30 minutos, las herramientas requeridas son llaves allen, desarmadores y pinzas. Un módulo completo tiene un peso de 50 kg, y puede ser transportado en un auto compacto debido a su concepto modular y es posible escalar el sistema integrando un arreglo en serie o en paralelo conforme a las necesidades del usuario. Las deformaciones mecánicas del panel y los efectos térmicos sobre la superficie de reflexión no son significativos en la óptica requerida por el sistema.
- II. La creación de un sistema de movimiento de bajo consumo de energía y alta precisión, que es objeto de ser registrado como modelo de utilidad, debido a que su aplicación puede darse a diversos tipos de colectores o paneles solares.
- III. La implementación de un autómata que es capaz de registrar todas las variables del proceso y al mismo tiempo almacenar la información para su posterior procesamiento en un PC. Este es un hecho importante debido a que permite una solución stand alone, sin la necesidad de tener un PC en sitio.
- IV. El empleo de la función de seguimiento solar SPA-SIEMENS que fue desarrollada basada en el algoritmo "*Solar Position Algorithm*" (*SPA Calculator*) del National Renewable Laboratory en conjunto con la empresa alemana SIEMENS, para su uso en el autómata S7-1200 de la nueva familia de microautomatización. De acuerdo a la empresa SIEMENS, es la primera aplicación desarrollada en México utilizando esta herramienta.

Se lograron alcanzar los objetivos planteados al diseñar, construir y evaluar un STCCP con un nuevo modelo de Módulo Concentrador de Canal Parabólico. La evaluación de las mejoras en comparación con las tecnologías existentes en el mercado, requiere seguir monitoreando la producción de calor en un tiempo de por lo menos un año.

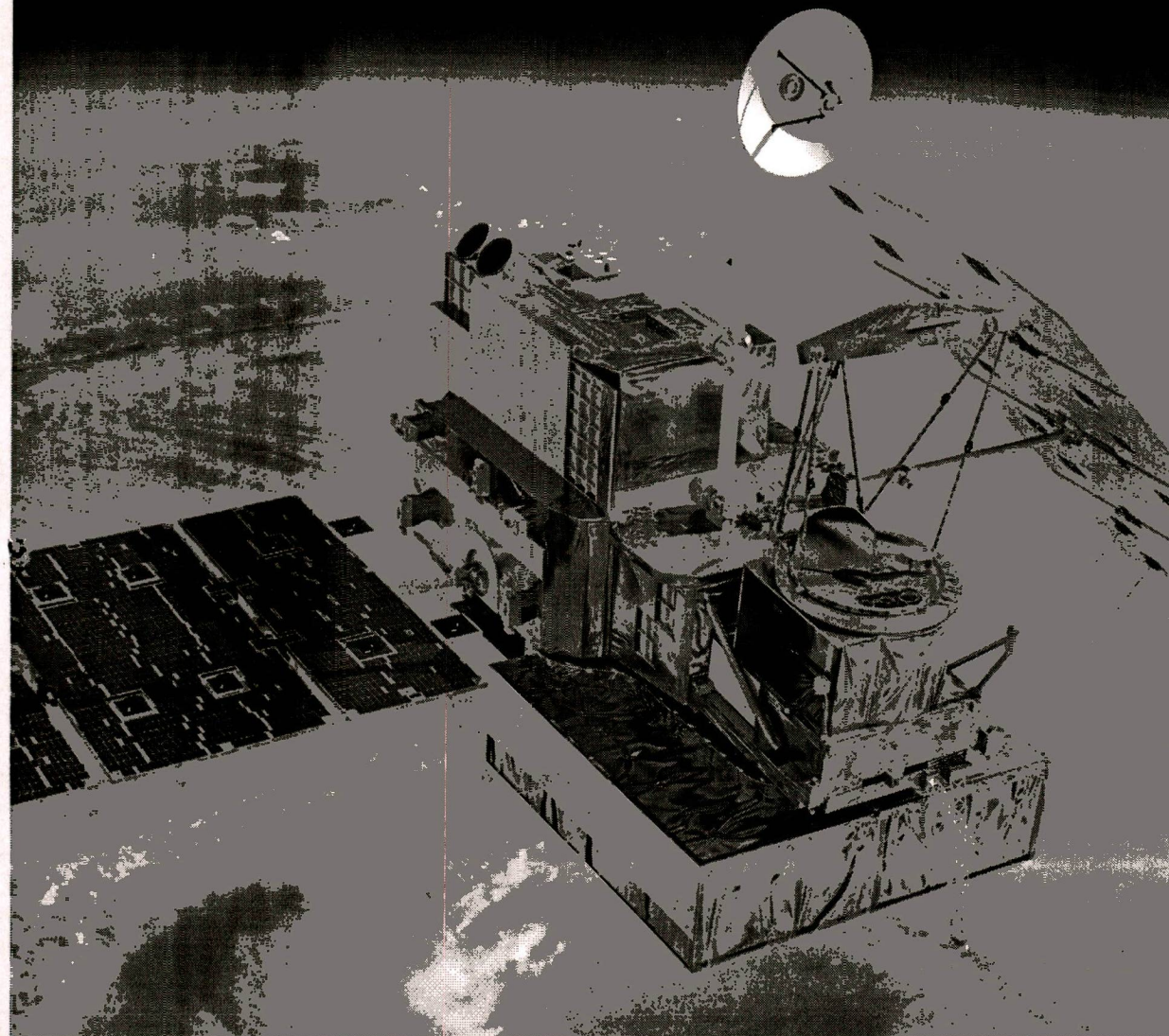
5.2 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

Este proyecto ha permitido generar una propuesta tecnológica con potencial de ser comercializada en el mercado, por lo que se deberá seguir trabajando en su evaluación y generando mejoras al diseño para lograr una propuesta competitiva a nivel nacional y global.

A largo plazo se tienen considerados trabajos de perfeccionamiento del STCCP, simplificando las herramientas utilizadas y desarrollando sistemas cada vez más sencillos, ya que esto permitirá tener un mejor costeo sobre todo en el área de control y de materiales constructivos para el MCCP.

Para lograr este objetivo se requiere de la participación no solo de las empresas privadas, sino que, como en este caso, se requiere de la participación conjunta de alumnos, profesores, centros de investigación y de fondos tanto privados como gubernamentales que permitan el desarrollo de este tipo de tecnologías que llegarán a tener un impacto significativo en la economía de los usuarios potenciales.

BIBLIOGRAFÍA



UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

6.1 BIBLIOGRAFÍA

Almanza, R.; Muñoz, F. (1994). Ingeniería de la Energía Solar. D.F., México: El Colegio Nacional.

Almanza, R.; Lentz, A., y Jiménez, G. (1997). Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs. En: *Solar Energy*, 61 (4), pp. 275-278.

Alvarado, P. (2007). Padre Himalaya, a Portuguese Pioneer on Solar Energy. En *treehugger*. Consultado el 1 de Septiembre del 2013, Disponible en: <http://www.treehugger.com/solar-technology/padre-himalaya-a-portuguese-pioneer-on-solar-energy.html>

Bakos, G. C.; Adamopoulos, D.; Soursos, M., y Tsagas, N. F. (1999). Design and construction of a line-focus parabolic trough solar concentrator for electricity generation. En: *Proceedings of ISES Solar World Congress*, Jerusalem.

Cohen, G. y Kearney, D. (1994). Improved Parabolic Trough Solar Electric System Based on the SEGS Experience. En: *Proceedings, ASES Annual Conference Solar*, 94, pp. 147-150.

CONUEE (2013). Normas Mexicanas. En CONUEE. Consultado el 17 de Septiembre del 2013, Disponible en: http://www.conuee.gob.mx/wbi/CONAE/normas_y_nmx

Dwivedi, V. (2009). *Thermal Modelling and Control of Domestic Hot Water Tank*. Fort Belvoir, Tesis de Maestría, Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK.

ESTIF (2013). European Relevant Standards. En *The Solar Keymark*. Consultado el 17 de Septiembre del 2013, Disponible en: <http://www.estif.org/solarkeymarknew/manufacturers/european-standards>

Gallegos, D., Hernández, H., Jinés, J.A., Torres, M. (2013). *Estudio de la variación de forma en reflectores solares parabólicos PowerGIE S.A.P.I. de C.V. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Ticomán, Programas de Ingeniería Aeronáutica*. Distrito Federal, México.

Greenpeace; SolarPACES y ESTELA (2009). En: *Energía Solar Térmica de Concentración, Perspectiva Mundial*.

Greenpeace, STIA, Solar Thermal Power 2020 (2007), Exploiting the Heat From the Sun to Combat Climate Change, The Netherlands.

Fernández Zayas, J.L. (1987). *Introducción al Estudio de los Sistemas Solares Activos*, D.F., México: Series del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M..

Kalogirou, S. y Lloyd, S. (1992). Use of Solar Parabolic Trough Collectors for Hot Water Production in Cyprus. A feasibility study. En: *Renewable Energy*, 2 (2), pp. 117-124.

Kalogirou, S.; Lloyd, S.; Ward, J., y Eleftheriou, P. (1994). Design and Performance Characteristics of a Parabolic Trough Solar Collector System. En: *Applied Energy*, 47, pp. 341-354.

Kalogirou, S. (1996). Parabolic trough collector system for low temperature steam generation: design and performance characteristics. En: *Applied Energy*, 55, pp. 1-19.

Kearney, D.W. (2007). *Parabolic Trough Collector Overview notes on a bit of history, development after Luz, and a recent surge in trough collector technology offerings*. Golden Colorado, U.S.A.: Parabolic Trough Workshop 2007 NREL.

6.1 BIBLIOGRAFÍA

Khammas, A.A. (2007). Geschichte der Solarenergie 1901 – 1974. En *Buch der Synergie*. Consultado el 1 de Septiembre del 2013. Disponible en: http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_04_02_sonne_geschichte_2.htm

Kraemer, S. (2013). Niche Markets for micro-CSP. En *CSP today Business Intelligence*. Consultado el 17 de Septiembre del 2013, Disponible en: <http://social.csptoday.com/emerging-markets/niche-markets-micro-csp>

Lippke, F. (1996). Direct Steam Generation in Parabolic Trough Solar Power Plants: Numerical Investigation of the Transients and the Control of a Once-Through System. En: *Journal of Solar Energy Engineering*, 118, Feb., pp. 9-14.

May, E. K. y Murphy, L. M. (1983). Performance Benefits of the Direct Generation of Steam in Line-Focus Solar Collectors. En: *Journal of Solar Energy Engineering*, 105, May., pp. 126-133.

Muirhead, J. (2013). Niche Markets for micro-CSP. En *CSP today Business Intelligence*. Consultado el 17 de Septiembre del 2013, Disponible en: <http://social.csptoday.com/emerging-markets/niche-markets-micro-csp>

National Aeronautics and Space Administration (2007). *Systems Engineering Handbook*. Washington, D.C., USA: NASA.

PowerGIE (2013). *Investigación Tecnológica para la Construcción de Prototipo de Concentrador Solar Parabólico para Calentamiento de Agua a Grandes Volúmenes*. ICyTDF, Distrito Federal, México.

Sargent & Lundy LLC Consulting Group (2003). Assessment of parabolic trough and power tower solar technology cost and performance forecasts. En: *National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-550-34440*.

Sendagorta, E. (2012). *The Future of Concentrating Solar Power (CSP), The "GemSolar" Plant*. Luxemburgo: European Investment Bank and Torresol Energy.

Silva Pérez, M. (2005). *Sistemas Termosolares de Concentración. Aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura*. Sevilla, España: Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos.

SRCC (2013). Standards for solar energy. En *Solar Rating & Certification Corporation*. Consultado el 17 de Septiembre del 2013, Disponible en: <http://www.solar-rating.org/index.html>

Thomas, A. (1994). Simple structure for parabolic trough concentrator. En: *Energy Conversion Management*, 35 (7), pp. 569-573

Valan Arasu, A. y Sornakumar, T. (2005). Design, and Simulation Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector Hot Water Generation System, En: *International Energy Journal*, 6 (2), pp. 13-25.

Valan Arasu, A., Sornakumar, T. (2006). Performance Characteristics of Parabolic Trough Solar Collector System for hot Water Generation, En: *International Energy Journal*, 7 (2), pp. 137-145.

ANEXO 1

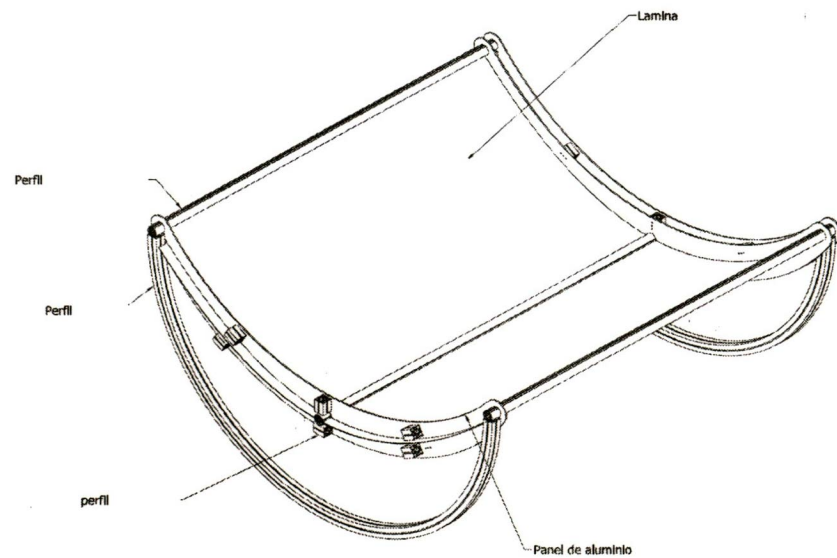
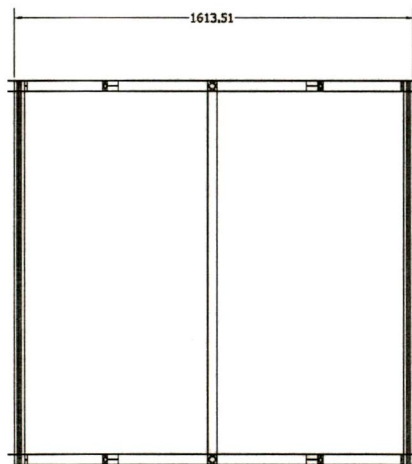
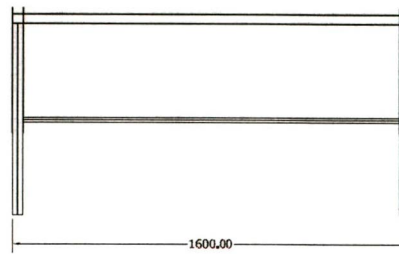
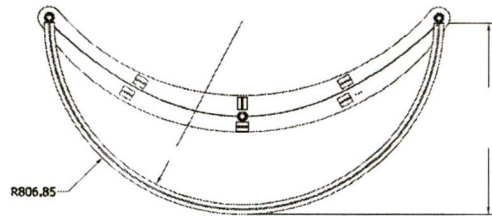
PLANOS PRE-CONSTRUCTIVOS DEL MCCP



UACM
Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

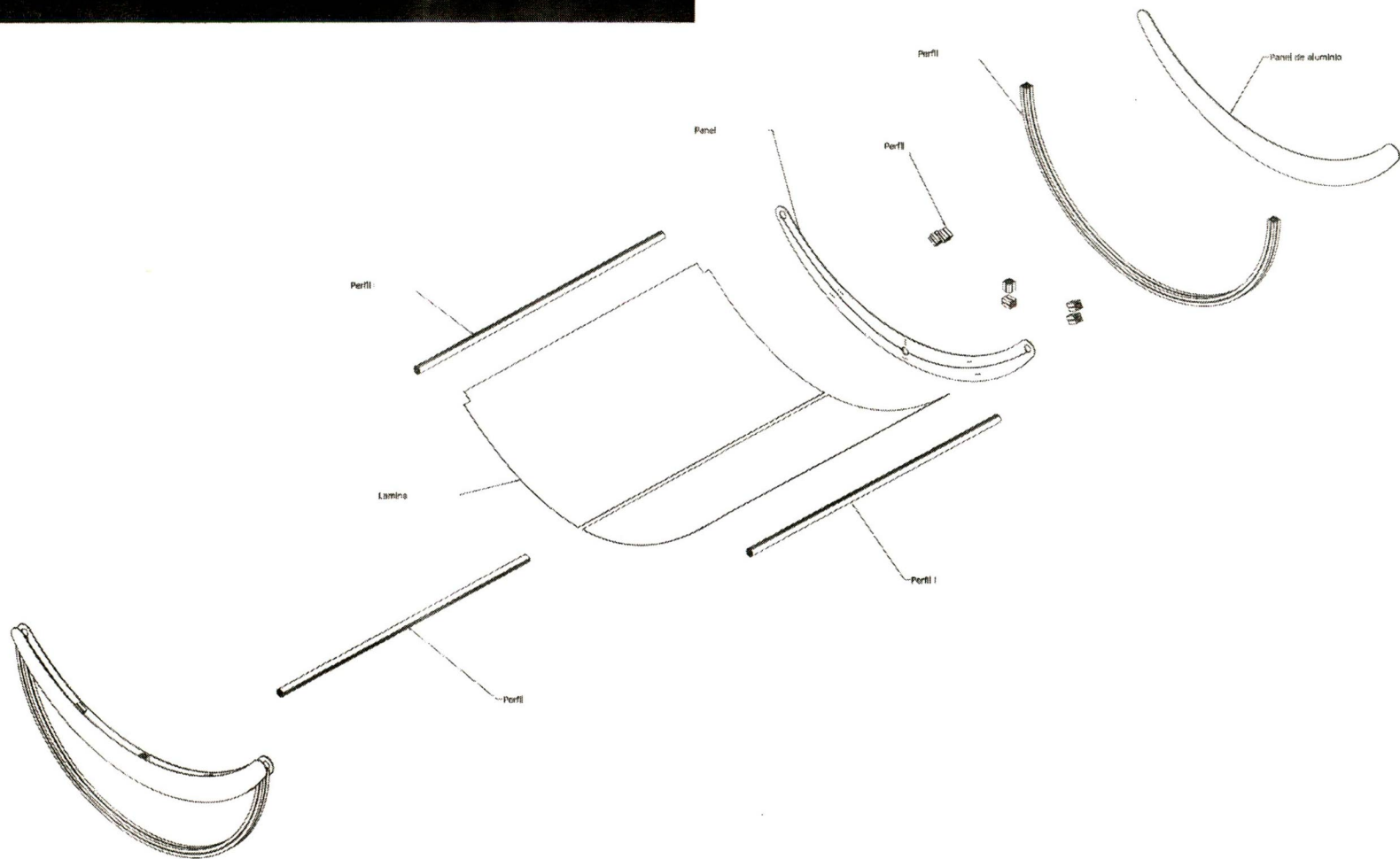
Anexo 1

Planos Pre-constructivos del MCCP



Anexo 1

Planos Pre-constructivos del MCCP



ANEXO 2

INGENIERÍA DETALLADA DEL SUBSISTEMA DE CONTROL



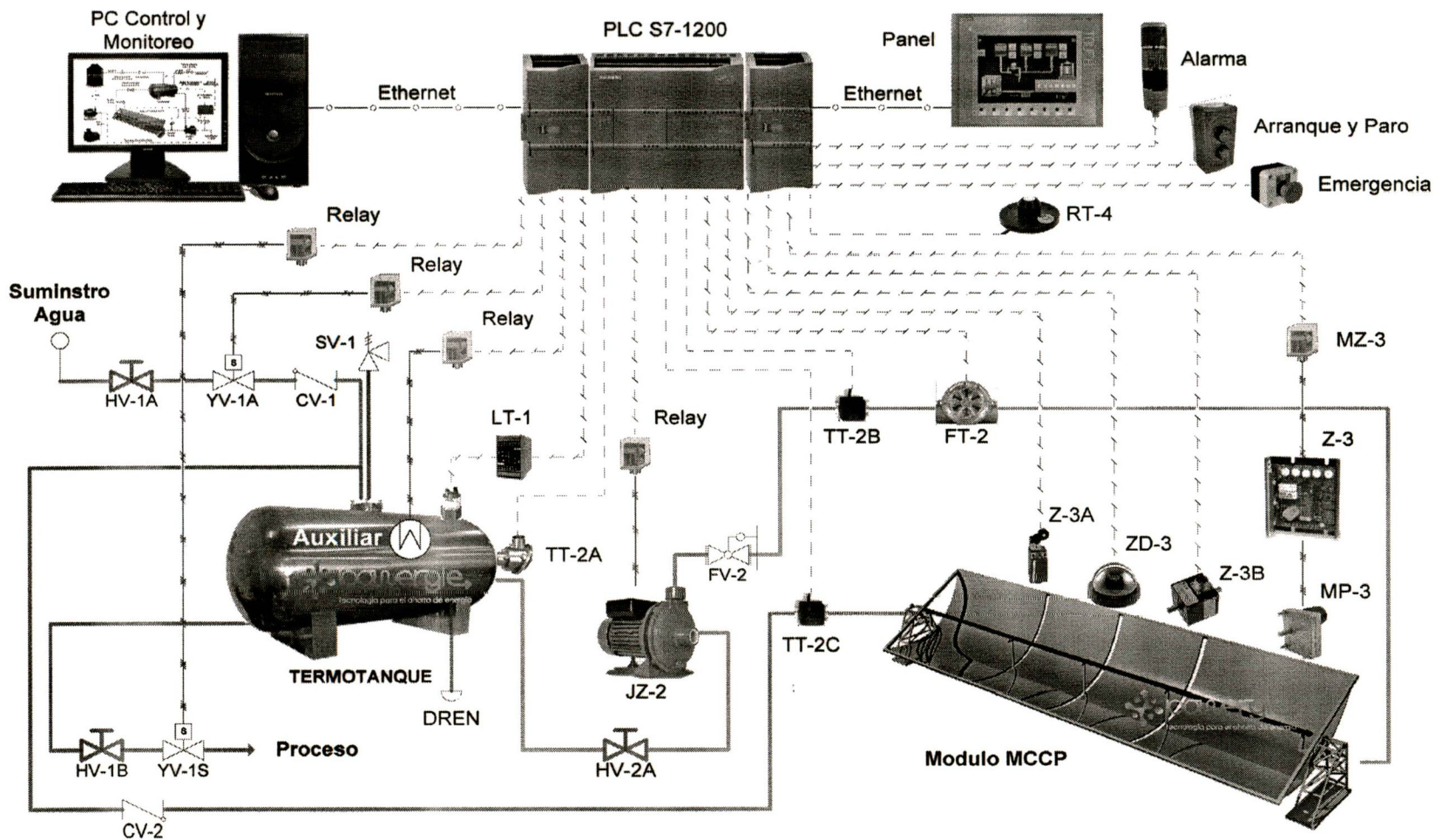
UACM

Universidad Autónoma

de la Ciudad de México

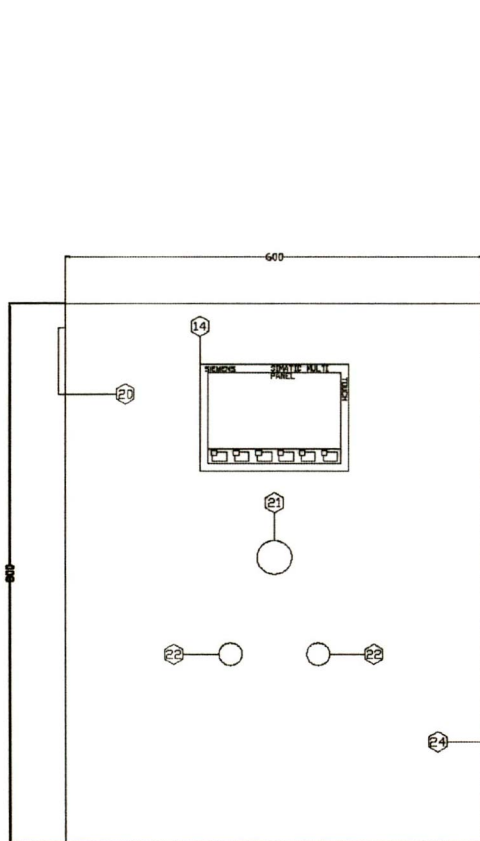
Anexo 2

Ingeniería detallada del subsistema de control

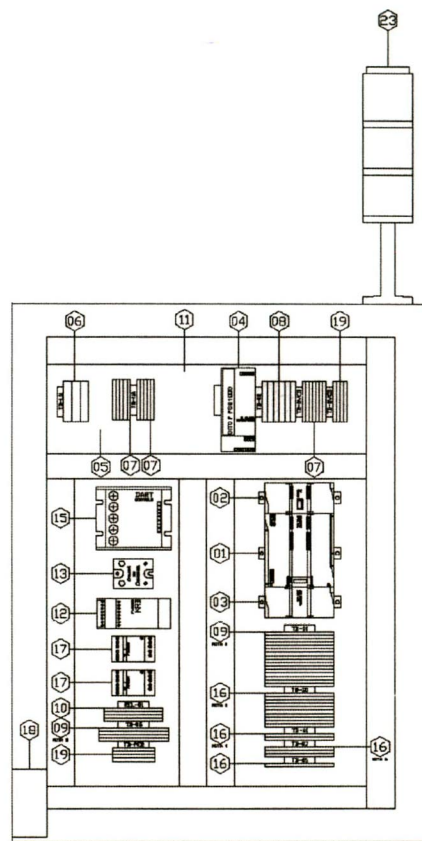


Anexo 2

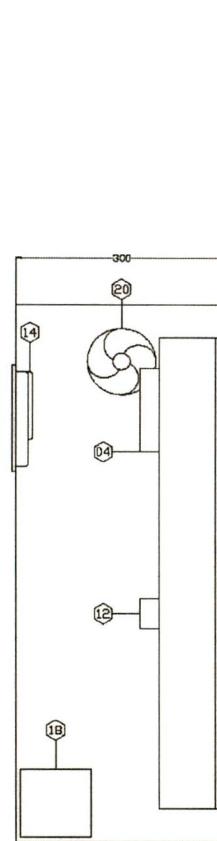
Ingeniería detallada del subsistema de control



GABINETE 1
VISTA FRONTAL



GABINETE 1
VISTA FRONTAL



GABINETE 1
VISTA LATERAL

Parte	Descripcion
01	SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/3C/DC
02	ANALOG INPUT SM 1231 TC, 4 AI THERMOCOUPLE
03	CSM 1277 SWITCH INDUSTRIAL ETHERNET
04	SITOP PSU100S POWER SUPPLY 120 VCA-2424V/5 A
05	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE 2 POLOS SIEMENS 6A
06	CLEMA DE DISTRIBUCION WEIDMULLER
07	CLEMA DE PASO WEIDMULLER
08	CLEMA PORTAFUSIBLE WEIDMULLER
09	CLEMA DOBLE PISO WEIDMULLER
10	RELEVADOR FINDER 6A/250VCA - 24VCD
11	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE 1P SIEMENS 2 AMP
12	TRANSMISOR DE NIVEL KR0 AUTOMATIZACION
13	RELEVADOR ESTADO SOLIDO CROUZET
14	PANTALLA TACTIL KTP 600 BASIC COLOR PN
15	DRIVE MOTOREDUCTOR CPP BART CONTROL S
16	CLEMA PORTAFUSIBLE DOBLE PISO WEIDMULLER
17	RELEVADOR 4P FINDER 24VCD 10A/250 VCA
18	FUENTE 12V/5V 20 A
19	CLEMA DE PASO TIERRA FISICA WEIDMULLER
20	VENTILADOR 115 VCA EBMFAPST
21	BOTON PARO EMERGENCIA SIEMENS
22	BOTON PULSADOR SIEMENS
23	BALIZA INDICACION ESTADO DE SISTEMA SIEMENS
24	FILTRO EXTERIOR RITAL

NOTA 2: REGLETERO DE CLEMAS DE ENTRADAS DIGITALES

NOTA 3: REGLETERO DE CLEMAS PORTAFUSIBLE DE SALIDAS DIGITALES

NOTA 4: REGLETERO DE CLEMAS PORTAFUSIBLE DE ENTRADAS ANALOGICAS

NOTA 5: REGLETERO DE CLEMAS PARA ALIMENTACION A 120V DE BOBINAS

NOTA 6: REGLETERO DE CLEMAS PORTAFUSIBLE PARA ALIMENTACION A 24VCD

ANEXO 3

MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA REPÚBLICA MEXICANA



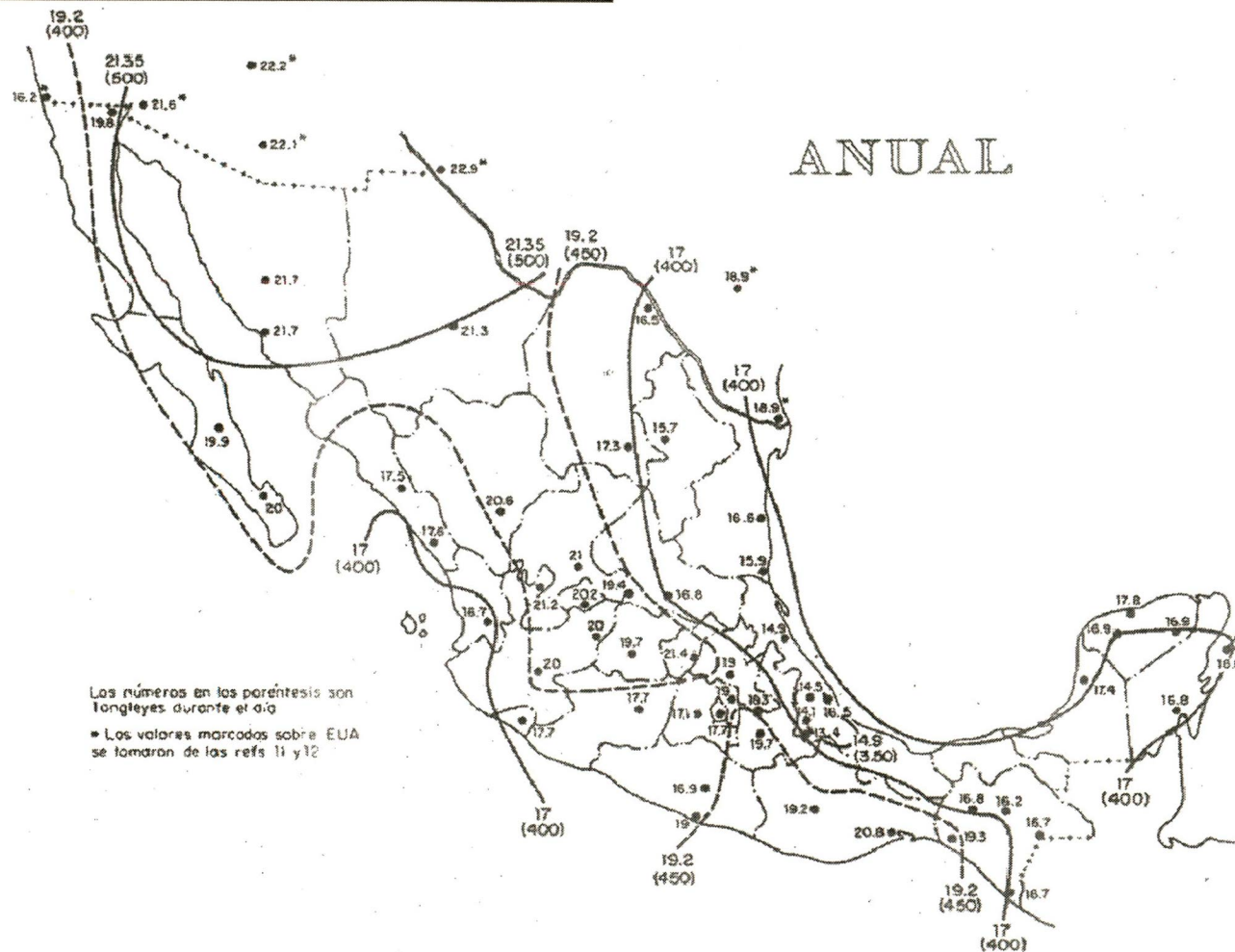
UACM

Universidad Autónoma

de la Ciudad de México

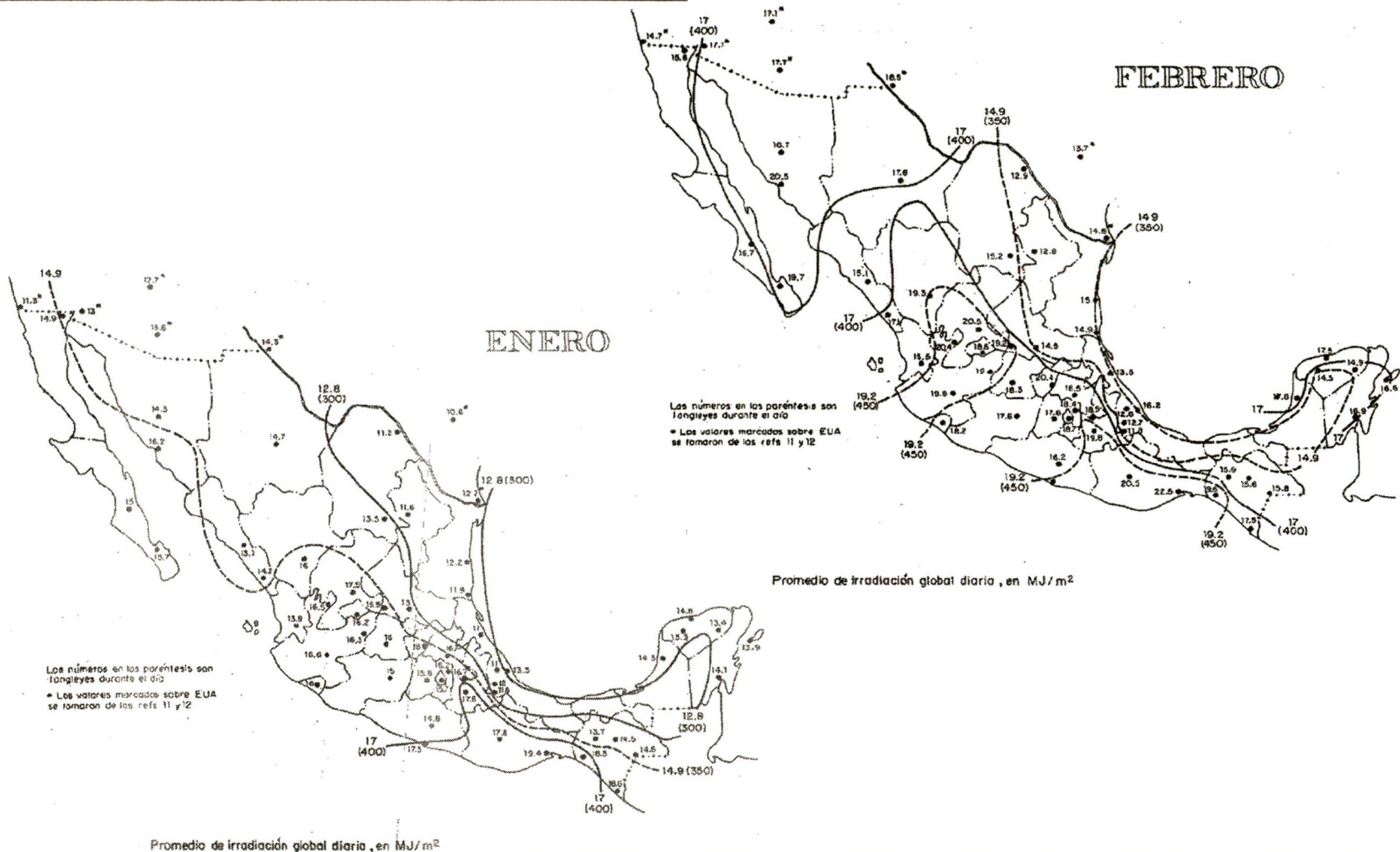
Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana



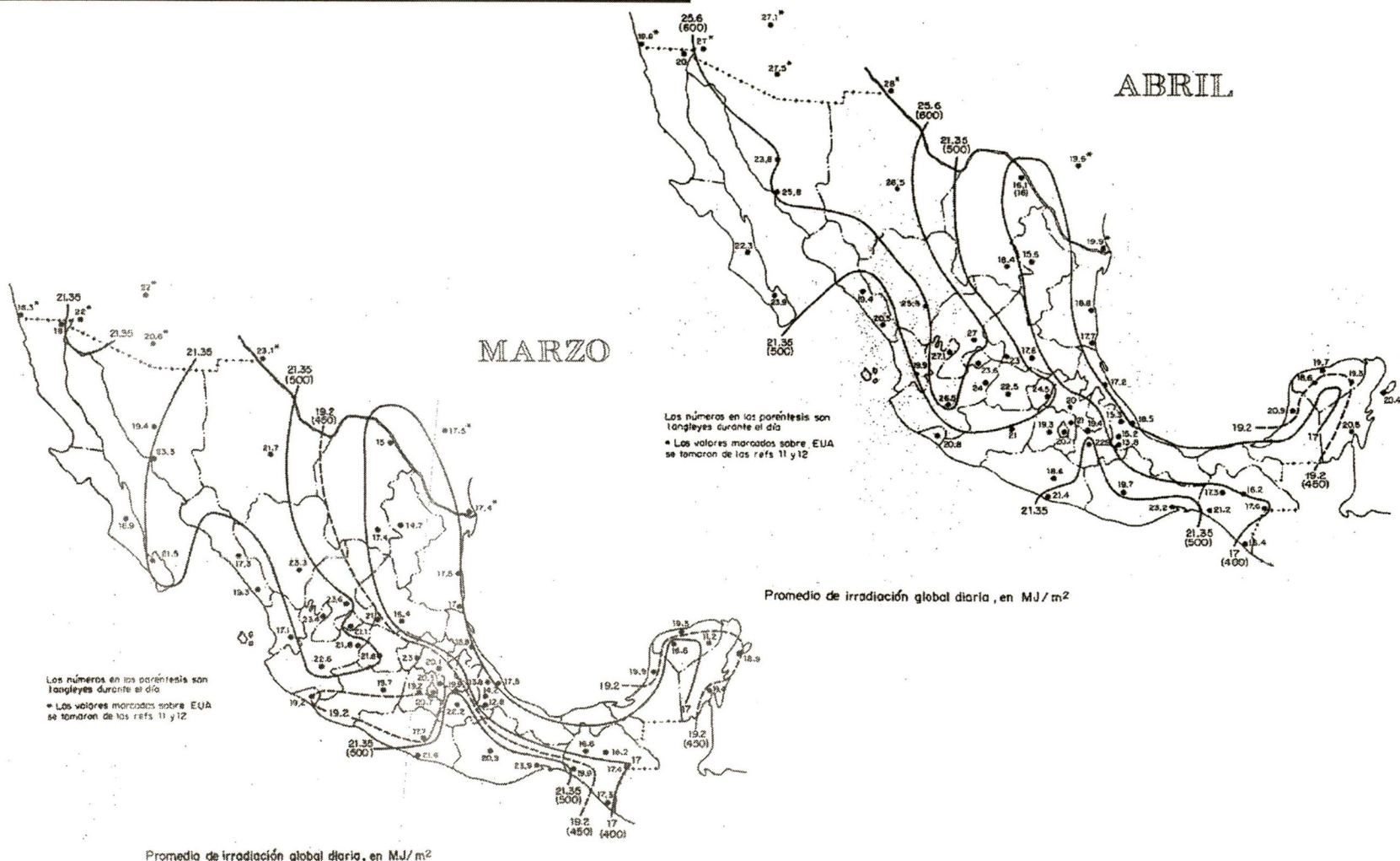
Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana



Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana



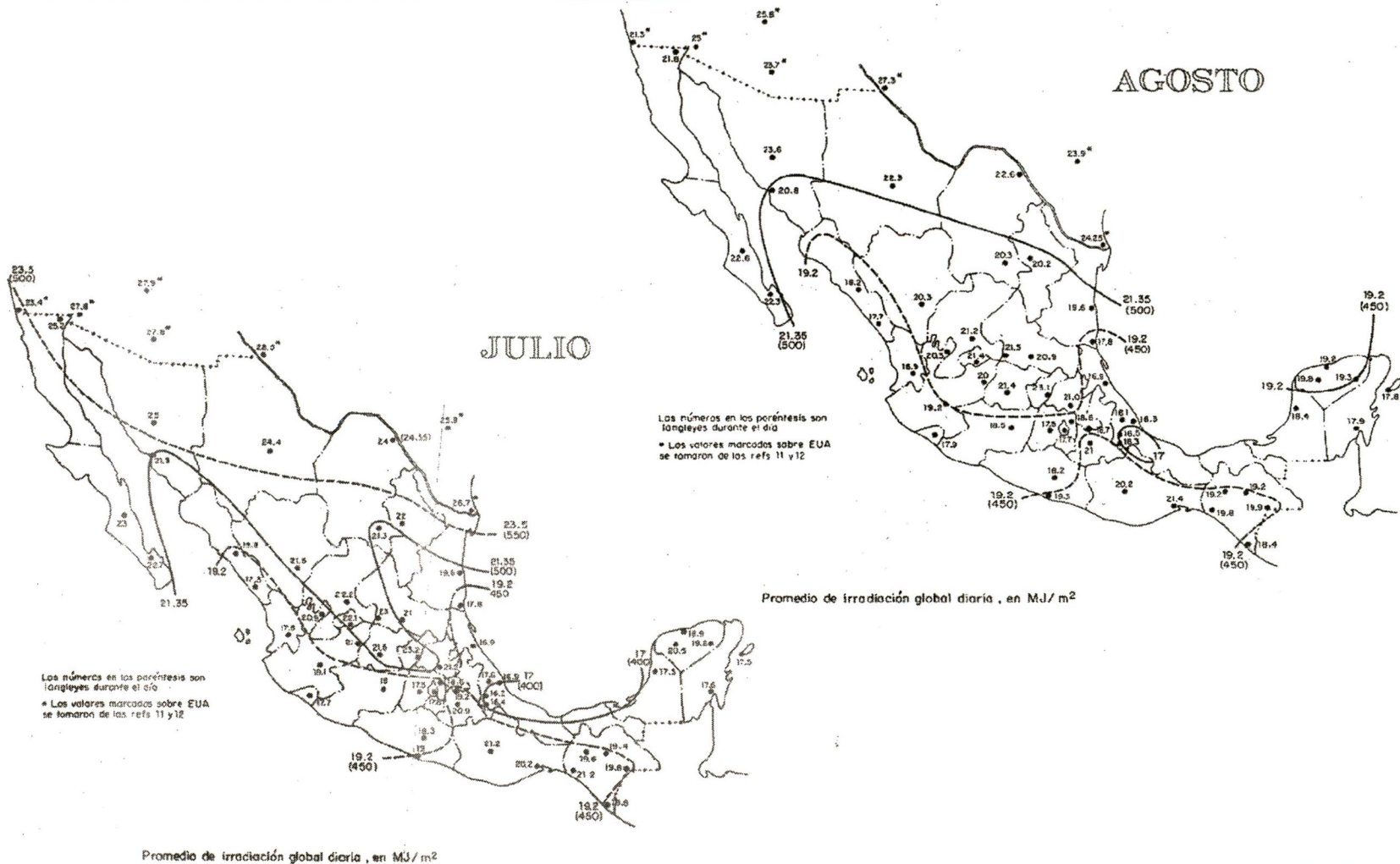
Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana



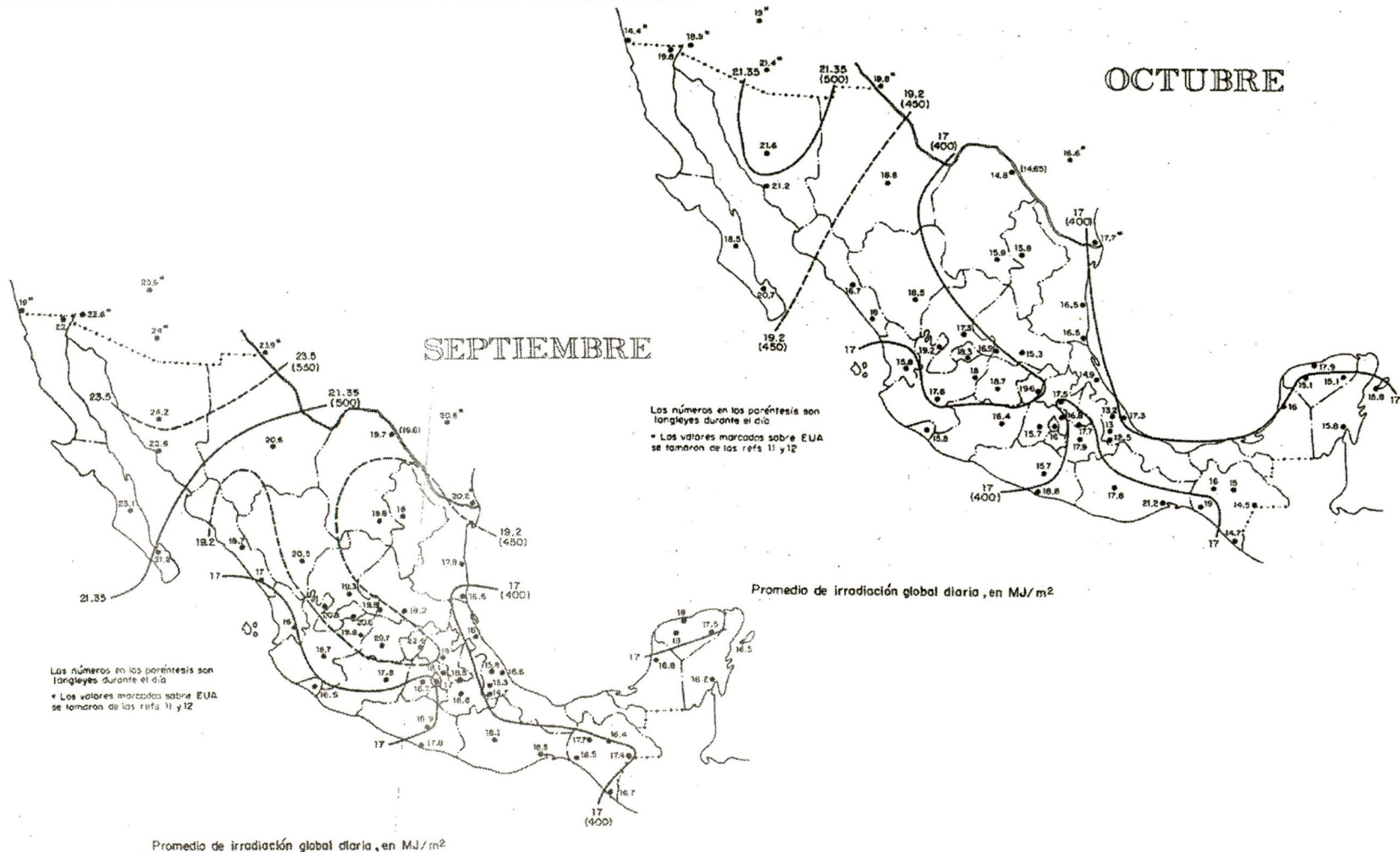
Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana



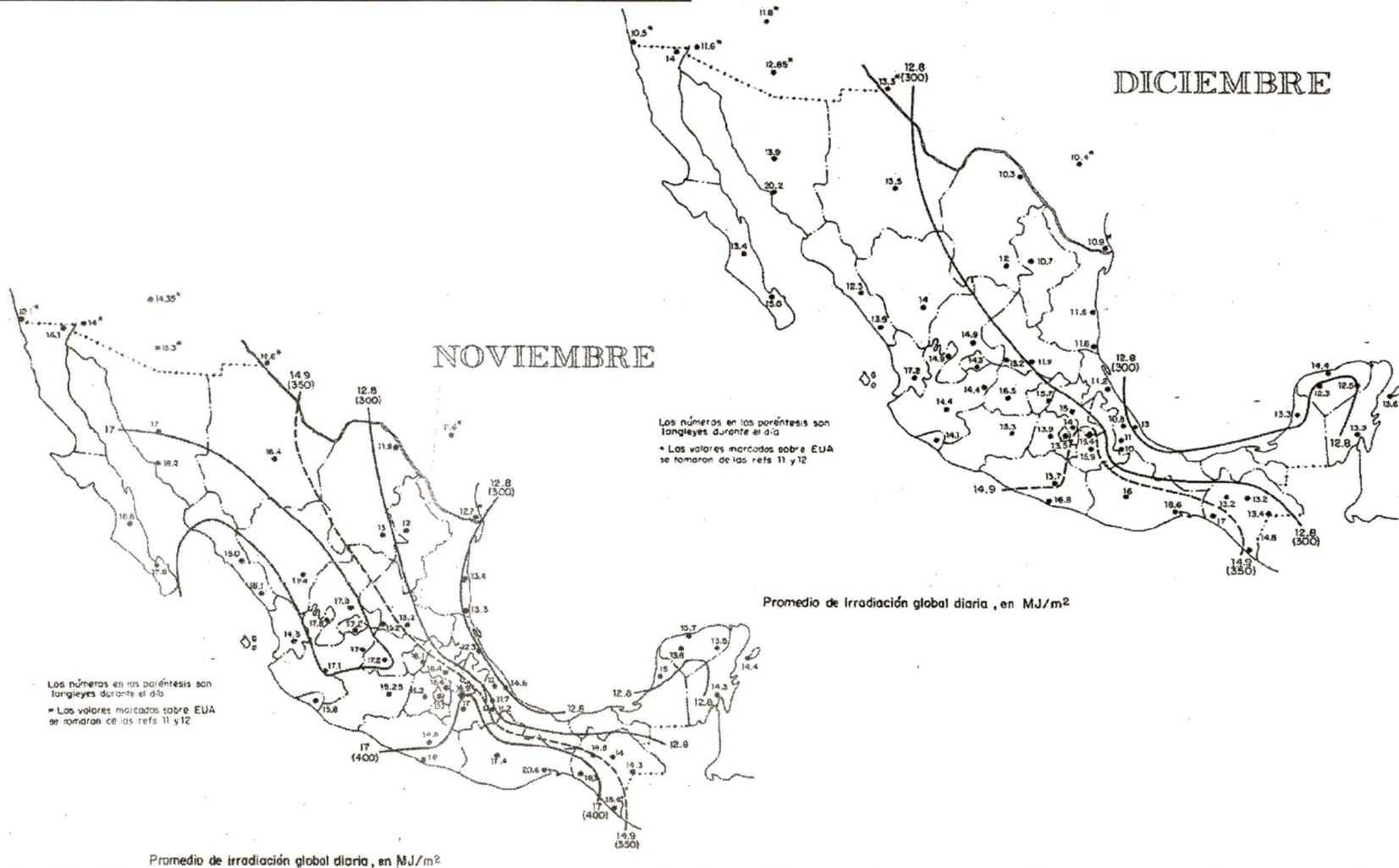
Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana



Anexo 3

Mapas de radiación solar de la República Mexicana

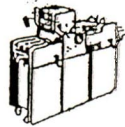


Coordinación de Certificación y Registro

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada Humano me es ajeno



Tesis
IMPRESA
TERE

PONE A SUS ORDENES SU SERVICIO
DE ELABORACIÓN DE TESIS Y EMPASTADOS
EN 24 HORAS
PALMA NORTE No. 518 DESP. 210 COL. CENTRO
ENTRE BELISARIO DOMINGUEZ Y REP. DE CUBA
TEL. 55-18-07-19
www.imprentatere.com.mx