



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN
ARREGLO DE COLECTORES DE CANAL
PARABÓLICO PARA GENERACIÓN DE CALOR
DE PROCESO**

TESIS

PRESENTADA POR:

ING. AARÓN MAURICIO VÁZQUEZ CAAMAL

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2018

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiere sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

Agradecimientos

Dedicado a familia que en todo momento me apoyo y me dio la motivación necesaria para poder llegar a esa meta.

Al CONACYT por haberme otorgado una beca para poder apoyar mi sustento económico y el de mi familia.

Al Dr. Ali Bassam por haberme aceptado en su proyecto PRODEP 2015 103.5/15/10486, proveerme de las herramientas necesarias para así lograr realizar mi trabajo de tesis.

Resumen

El objetivo general de este trabajo es: “Evaluar un arreglo de Colectores de Canal Parabólico (CCP), y obtener la ganancia de energía útil, así como su eficiencia térmica bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Mérida, Yucatán, con un sistema de seguimiento solar y una inclinación igual la latitud de dicha Ciudad”.

El trabajo tiene como sustento teórico el cálculo de la ganancia de energía útil, tomando en consideración todas las pérdidas por los fenómenos de transferencia de calor que se tienen en un Concentrador de Canal Parabólico.

La metodología para evaluar el arreglo de Colectores de Canal Parabólico se basó en la medición de variables ambientales y operacionales que contribuyen al cálculo de la energía útil para cada una de las configuraciones planteadas del arreglo. De igual manera se usó para obtener la eficiencia térmica y concluir cuál de las configuraciones es la mejor para generar calor de proceso. Se presenta una propuesta de aplicación para confirmar que es factible y rentable económicamente usar esta tecnología en la industria Yucateca, todo en base a los resultados obtenidos de este trabajo.

Como conclusiones principales, el arreglo de Colectores de Canal Parabólico en serie fue el que arrojó mejores resultados ya que la ganancia de energía útil era acumulada al pasar el fluido de trabajo por cada Colector. La variable ambiental que más afecta de manera proporcional a la energía útil, como era de esperarse, es la irradiancia; mientras la que más afecta de manera inversamente proporcional es la velocidad del viento.

Abstract

The general objective of this work is: "To evaluate an arrangement of Parabolic Trough Collectors (PTC), and obtain the useful energy gain, as well as its thermal efficiency under the climatic conditions of the city of Merida, Yucatan, with a system of solar tracking and an inclination equal the latitude of said City ".

The work has as a theoretical basis the calculation of the useful energy gain, taking into account all the losses due to the heat transfer phenomena that are in a Parabolic Trough Collector.

The methodology to evaluate the arrangement of Parabolic Trough Collectors was based on the measurement of environmental and operational variables that contribute to the calculation of the useful energy for each of the proposed configurations of the array. In the same way, it was used to obtain the thermal efficiency and to conclude which of the configurations is the best to generate heat process. An application proposal is presented to confirm that it is economically feasible and profitable to use this technology in the industry of Yucatan, all based on the results obtained from this work.

As main conclusions, the arrangement of Parabolic Trough Collectors connected in series was the one that gave the best results since the useful energy gain was accumulated when the working fluid passed through each collector. The environmental variable that most affects proportionally to useful energy, as expected, is irradiance; while the one that most affects inversely proportional is the wind speed.

Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	I
Nomenclatura	IV
Introducción.....	VII
Justificación.....	VIII
Objetivo general.....	XI
Objetivos específicos.....	XI
Hipótesis.....	XII
Contenido del trabajo.....	XII
Capítulo 1. Colectores de Canal Parabólico.....	1
1.1. Introducción a los concentradores de punto y línea focal.....	1
1.2. Los primeros colectores de canal parabólico.....	1
1.3. Panorama mundial.....	3
1.3.1. Colectores Luz.....	3
1.3.2. Colector EuroTrough.....	5
1.3.3. Colector SGX.....	8
1.3.4. Colector SENERTROUGH.....	8
1.4. Panorama nacional.....	9
1.4.1 Colector del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).....	9
1.4.2. Colector de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR).....	10
1.4.3. Colectores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).....	11
1.5. Panorama en el Estado de Yucatán.....	12
1.5.1. Colector de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY).....	13
1.6. Aplicaciones.....	13
Capítulo 2. Análisis teórico del Colector de Canal Parabólico.....	15
2.1. Análisis óptico.....	15
2.1.1. Proporción de concentración.....	15
2.1.2. Eficiencia óptica.....	17
2.2. Análisis térmico.....	21
2.2.1. Coeficiente de pérdidas para un CCP con tubo receptor sin cubierta.....	21
2.2.2 Eficiencia térmica instantánea.....	22

Capítulo 3. Construcción del arreglo de CCP.....	25
3.1. Descripción del CCP.....	25
3.1.1. Descripción de la costilla.....	25
3.1.2. Descripción final del CCP.....	26
3.2. Propuesta de diseño para la estructura del CCP.....	28
3.3. Circuito hidráulico.....	28
3.3.1. Propuestas de flujo.....	29
3.4. Construcción del arreglo de CCP.....	32
3.5. Sistema de seguimiento.....	34
3.6. Tanques de almacenamiento y sistema de adquisición de datos.....	35
 Capítulo 4. Evaluación experimental del arreglo de CCP.....	 38
4.1 Consideraciones durante la evaluación.....	38
4.2 Resultados basados en la ganancia de energía útil.....	39
4.2.1. Efecto de la irradiancia sobre la ganancia de energía útil.....	39
4.2.2. Efecto de la temperatura ambiente sobre la ganancia de energía útil.....	40
4.2.3. Efecto de la velocidad del viento sobre la ganancia de energía útil.....	42
4.2.4. Efecto de la diferencia de temperatura entrada y la temperatura de salida del fluido sobre la ganancia de energía útil.....	43
4.2.5. Efecto de la temperatura de entrada del fluido sobre la ganancia de energía útil.....	44
4.2.6. Efecto de la temperatura de salida del fluido en la ganancia de energía útil.....	45
4.3 Análisis de sensibilidad.....	46
4.4 Comparación de eficiencias térmicas.....	47
 Capítulo 5. Propuesta de aplicación en una industria textil.....	 51
5.1. Datos de la industria que fabrica prendas de vestir.....	51
5.1.1. Proceso Industrial en el cuál se propondrá la planta de colectores de canal parabólico.....	51
5.1.2. Gasto anual en combustible para el proceso industrial.....	52
5.2. Dimensionamiento de planta de colectores de canal parabólico.....	52
5.3. Factibilidad técnica del proyecto.....	54
5.4. Costos a considerar para el proyecto.....	54
5.4.1. Costo por metro lineal.....	54
5.4.2. Costo anual de operación y mantenimiento.....	55
5.5. Factibilidad económica del proyecto.....	55
5.5.1. Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR).....	56
5.5.2. Valor presente Neto (VPN).....	56
5.5.3. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	57
5.5.4. Rentabilidad del proyecto.....	57
5.5.5 Escenarios de incrementos en el precio del combustible.....	60

Conclusiones.....	65
Referencias	67
Bibliografía	69

Índice de tablas

Tabla 1. Rangos de temperatura para diferentes procesos industriales (Kalogirou, 2009).....	X
Tabla 2. Principales características de los primeros CCP's comerciales (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).	2
Tabla 3. Principales características de los colectores Luz (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).	3
Tabla 4. Tabla representativa para las pendientes que tienen las diferentes variables consideradas en la evaluación sobre la ganancia de energía útil.	46
Tabla 5. Resumen de valores obtenidos para cada configuración evaluada.	47
Tabla 6. Calculo de VPN para diferentes TMAR e inversiones iniciales.	58
Tabla 7. TIR obtenidas para cada valor de inversión inicial, considerando un incremento anual de 5% en el precio del combustible.	62
Tabla 8. TIR obtenidas para cada valor de inversión inicial, considerando un incremento anual de 10% en el precio del combustible.	63
Tabla 9. TIR obtenidas para cada valor de inversión inicial, considerando un incremento anual de 15% en el precio del combustible.	64

Índice de Figuras

Figura 1. Imagen de un colector de canal parabólico.....	VIII
Figura 2. Mapa de irradiación global horizontal de la República Mexicana (SENER, 2018).....	IX
Figura 3. Mapa de irradiación global horizontal durante abril en la península de Yucatán (SENER, 2018).	IX
Figura 4. Parte frontal (izquierda) y posterior (derecha) del colector LS-3 (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).	4
Figura 5. Modelo computacional del colector EuroTrough (Geyer y otros, 2002).....	6

Figura 6. Eficiencia térmica obtenida en el Eurotrough ET-150, usando agua como fluido de trabajo a diferentes caudales (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).....	7
Figura 7. Eficiencia térmica obtenida en el Eurotrough ET-150, usando sal derretida como fluido de trabajo a diferentes caudales (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).....	7
Figura 8. Eficiencia térmica obtenida en el Eurotrough ET-150, usando sodio líquido como fluido de trabajo a diferentes caudales (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).....	8
Figura 9. Vista posterior del colector SENRTROUG (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).	9
Figura 10. En la figura a) se observa el CCP de la IIE, en la figura b) el CCP instalado en una lavandería industrial en Torreón, Coahuila y en la figura c) el CCP instalado en la planta NISSAN de Cuernavaca, Morelos para el calentamiento de agua sanitaria (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014).....	10
Figura 11. a) Estructura del CCP y b) simulación por medio de un Análisis de Elementos Finitos (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014).....	11
Figura 12. Arreglo de colectores, del lado izquierdo se aprecian los CCP-45 y del lado derecho los CCP-90 (Venegas, 2013).....	12
Figura 13. Análisis de elementos finitos aplicado a cada colector (Venegas, 2013). .	12
Figura 14. Esquema del colector a una distancia R del Sol (Kalogirou, 2009).....	16
Figura 15. Representación del efecto de borde y el bloqueo en un colector de canal parabólico (Kalogirou, 2009).	19
Figura 16. Proceso de dimensionamiento para el diseño de la costilla.	25
Figura 17. Diseño final de la costilla.....	26
Figura 18. Componentes del CCP.....	27
Figura 19. Diseño final del CCP.	27
Figura 20. Diseño final de la estructura de soporte con los CCP.	28
Figura 21. Vista de una de las salidas para el circuito hidráulico.	29
Figura 22. Flujo en paralelo.....	30
Figura 23. Flujo en serie.....	31

Figura 24. Flujo en un CCP.....	32
Figura 25. Construcción de un colector de canal parabólico, sin la superficie reflectante.	33
Figura 26. Arreglo de Colectores de Canal Parabólico, sin la superficie reflectante, tubos receptores, sensores y sistema de seguimiento.....	33
Figura 27. Arreglo de CCP	34
Figura 28. Sistema de seguimiento para el arreglo de colectores de canal parabólico.....	35
Figura 29. Tanques de almacenamiento con gabinete para sistema de adquisición de datos.	36
Figura 30. Diagrama en Labview para monitoreo de la temperatura del fluido de trabajo.	36
Figura 31. Diagrama en Labview para monitoreo del medidor de flujo.	37
Figura 32. Efecto de la irradiancia en la ganancia de energía útil.	40
Figura 33. Efecto de la temperatura ambiente en la ganancia de energía útil.	41
Figura 34. Efecto de la velocidad del viento en la ganancia de energía útil.	42
Figura 35. Efecto de la diferencia de temperatura entrada y la temperatura de salida del fluido en la ganancia de energía útil.	43
Figura 36. Efecto de la temperatura de entrada del fluido en la ganancia de energía útil.	44
Figura 37. Efecto de la temperatura de salida del fluido en la ganancia de energía útil.	45
Figura 38. Comportamiento del factor de flujo de acuerdo al valor de la capacitancia térmica (Duffie & Beckman, 2006).	49
Figura 39. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, de acuerdo a una TMAR indicada.....	60
Figura 40. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, con una TMAR indicada, considerando un incremento anual de 5% en el precio del combustible.....	61

Figura 41. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, con una TMAR indicada, considerando un incremento anual de 10% en el precio del combustible.....	62
Figura 42. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, con una TMAR indicada, considerando un incremento anual de 15% en el precio del combustible.....	63

Nomenclatura

θ :	Ángulo de incidencia
θ_m :	Medio ángulo de aceptación.
σ :	Constante de Stefan-Boltzmann.
σ_a :	Errores aleatorios.
$\sigma_{lámina}^2$:	Errores de dispersión asociados con la superficie reflectante.
$\sigma_{pendiente}^2$:	Efectos de dispersión debido a errores aleatorios de pendiente.
σ_{sol}^2 :	Errores aleatorios debido al cambio aparente en el tamaño del Sol.
δ :	Ángulo de dispersión.
ρ :	Reflectancia de la lámina
τ :	Transmitancia de la cubierta de vidrio
ε_r :	Emisividad del receptor.
α :	Absortancia del receptor
β :	Error angular de desalineación.
γ :	Factor de intercepción
φ :	Ángulo que se forma entre el eje del colector y el radio de la parábola.
φ_r :	Ángulo de borde.
η :	Eficiencia térmica instantánea.
η_o :	Eficiencia óptica.
A_a :	Área de apertura.
A_b :	Área de apertura perdida por el marco metálico.
A_e :	Área de apertura perdida por obstrucciones, sombreado y pérdidas de radiación reflejada fuera del tubo receptor.

A_f :	Factor geométrico de pérdida de área de apertura.
A_l :	Área de apertura perdida.
A_r :	Área de receptor.
C :	Proporción de concentración.
$C_{m\acute{a}x}$:	Proporción de concentración máxima para un CCP.
$C_{m\acute{a}x,2D}$:	Proporción de concentración máxima para un colector bidimensional.
$C_{m\acute{a}x,3D}$:	Proporción de concentración máxima para un colector tridimensional.
C_p :	Calor específico del fluido.
D :	Diámetro del tubo receptor.
D_{ext} :	Diámetro exterior del tubo receptor.
D_{int} :	Diámetro interno del tubo receptor.
f :	Longitud focal.
F' :	Factor de eficiencia del colector.
F_R :	Factor de remoción de calor.
F_{r-s} :	Fracción de la radiación emitida por el receptor e interceptada por el Sol.
F_{s-r} :	Fracción de la radiación solar interceptada por el receptor.
G_B :	Radiación directa incidente.
h_{fluido} :	Coefficiente de transferencia de calor convectivo dentro del tubo receptor.
h_p :	Altura de la parábola.
h_r :	Coefficiente de pérdidas térmicas por radiación.
h_v :	Coefficiente de pérdidas térmicas por convección.
k_{aire} :	Conductividad térmica del aire.
k_{fluido} :	Conductividad térmica del fluido.
L :	Longitud de la curva.
\dot{m} :	Flujo másico dentro del tubo receptor.
Nu :	Número de Nusselt.
Pr :	Número de Prandtl.
q'_u :	Ganancia de energía útil expresada en términos de la unidad de longitud del colector.
Q_{r-s} :	Energía radiada por el colector y recibida por el Sol.
Q_{s-r} :	Energía radiada por el Sol y recibida por el colector.

Q_u :	Ganancia de energía útil.
r :	Radio de la parábola.
r_r :	Radio de borde.
Re :	Número de Reynolds.
T_a :	Temperatura del ambiente.
T_{ent} :	Temperatura de entrada del fluido al tubo receptor.
T_r :	Temperatura del receptor.
T_s :	Temperatura del sol.
U_L :	Coefficiente de pérdidas.
W_a :	Apertura de la parábola.

Introducción.

En la actualidad, encontrar una solución alternativa a la generación de energía, es el reto de diferentes instituciones privadas y públicas, como son: las empresas, las industrias y universidades; con el objetivo de disminuir el consumo de hidrocarburos en la vida diaria del planeta. Las energías renovables son una solución alternativa a esta problemática, debido al avance tecnológico en esta área, el aprovechamiento de este tipo de fuentes se ha vuelto factible ya que, en muchos casos, resulta ser más redituable en comparación con el empleo de los hidrocarburos. En la presente tesis, se plantea una opción a procesos industriales que empleen los hidrocarburos como combustible, para lograr temperaturas entre los 50 °C y los 260 °C.

La energía solar, es una de las energías renovables más usadas en la actualidad, puesto que este recurso es abundante en la superficie terrestre; no obstante, la distribución varía en regiones y en zonas. La península de Yucatán puede ser una opción en la generación energética. Este tipo de energía renovable se divide en dos grandes ramas: la fotovoltaica y la fototérmica. Sin embargo, como se mencionó, este trabajo se enfocará en presentar una opción en la generación de energía fototérmica, por lo que a continuación se discutirá las características de este tipo de energía.

En la energía solar Fototérmica, la radiación solar es transformada en calor para su aprovechamiento a través de un fluido de trabajo. Existen varios dispositivos capaces de realizar esta captación y conversión de energía como son los colectores solares planos y de concentración. Entre los colectores solares de concentración se encuentra el Colector de Canal Parabólico (CCP), mostrado en la **Figura 1**. Éste posee una superficie reflejante que redirige toda la radiación incidente a un tubo que se encuentra sobre la línea focal.



Figura 1. Imagen de un colector de canal parabólico.

Con estos sistemas fototérmicos se pueden alcanzar temperaturas para procesos industriales o en su defecto, ser parte de un proceso anterior; de tal forma que permita disminuir el uso de algún combustible fósil y la de emisiones de gases de efecto invernadero.

Lo más importante para el mundo moderno, es la reducción de los insumos para este proceso, pues la energía que obtenemos del sol es gratis y prácticamente infinita.

Justificación.

El desarrollo de este proyecto permitirá la promoción de las aplicaciones de las energías renovables en el sureste mexicano, así como validar el desempeño de un CCP; con la finalidad de disminuir el uso de combustibles fósiles y promocionar su reemplazo por tecnologías de energías renovables. De igual forma, la implementación de este prototipo contribuirá al desarrollo de la infraestructura para el apoyo de la docencia e investigación de los Laboratorios de Energías Renovables de La Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Nuestro país cuenta con un promedio anual aproximado de 6500 kWh/m^2 al día, como se aprecia en la **Figura 2**. Yucatán es uno de los estados de la república con mayor potencial, ya que recibe un promedio anual diario de 5550 kWh/m^2 (SENER, 2018).



Figura 2. Mapa de irradiación global horizontal de la República Mexicana (SENER, 2018).

Durante el mes de abril es cuando se registra la mayor irradiación en nuestra zona, la península recibe la cantidad de 7000 Kwh/m² al día (SENER, 2018), **Figura 3.**



Figura 3. Mapa de irradiación global horizontal durante abril en la península de Yucatán (SENER, 2018).

Según datos de la Secretaría de Fomento Económico del estado, en el 2013, el sector industrial fue el segundo con más participación en el PIB estatal con un 15.11% (SEFOE, 2015). El sector industrial manufacturero aportó, en el 2009, el 60.83% de la producción bruta total para el sector industrial (COMEY, 2009). Estos datos son indicadores de que las actividades en el estado de Yucatán, se orientan principalmente a la industria alimentaria, las bebidas y el tabaco, seguidas por la industria del plástico y el hule, la fabricación de productos a base de minerales no metálicos y la fabricación de prendas de vestir. Estas actividades tienen un interés común para este proyecto,

debido a que en las etapas de producción involucran temperaturas entre los 50 °C y 250 °C (Kalogirou, 2009). En la **Tabla 1** se presentan las temperaturas típicas requeridas para algunos de estos procesos (Kalogirou, 2009).

Tabla 1. Rangos de temperatura para diferentes procesos industriales (Kalogirou, 2009).

Industria	Proceso	Temperatura [°C]
Lechera	Pasteurización	60-80
	Esterilización	100-120
	Secado	120-180
	Concentrados	60-80
	Agua de alimentación de caldera	60-80
Comida enlatada	Esterilización	110-120
	Pasteurización	60-80
	Cocimiento	60-90
	Blanqueo	60-90
Textil	Blanqueo, teñido	60-90
	Secado, desengrasado	100-130
	Teñido	70-90
	Fijación	160-180
	Estampado	80-100
Papel	Cocción, secado	60-80
	Agua de alimentación de caldera	60-90
	Blanqueo	130-150
Química	Jabones	200-260
	Hule sintético	150-200
	Tratamiento térmico	120-180
	Pre calentamiento de agua	60-90

Carne	Lavado, esterilización	60-90
	Cocción	90-100
Bebidas	Lavado, esterilización	60-80
	Pasteurización	60-70
Harinas y subproductos	Esterilización	60-80
Subproductos de la madera	Termoformado de vigas	80-100
	Secado	60-100
	Pre calentado de agua	60-90
	Preparación de pulpa	120-170
Ladrillos y bloques	Curado	60-140
Plásticos	Preparación	120-140
	Destilación	140-150
	Separación	200-220
	Extensión	140-160
	Secado	180-200
	Mezclado	120-140

Objetivo general.

Evaluar un arreglo de Colectores de Canal Parabólico (CCP), y obtener la ganancia de energía útil, así como su eficiencia térmica bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Mérida, Yucatán, con un sistema de seguimiento solar y una inclinación igual la latitud de dicha Ciudad.

Objetivos específicos.

1. Obtener la ganancia de energía útil para el arreglo de Colectores de Canal Parabólico en sus diferentes configuraciones.
2. Comparar las diferentes configuraciones evaluadas del arreglo de Colectores de Canal Parabólico, de acuerdo a las principales variables ambientales y operacionales que intervienen en el sistema.
3. Encontrar la variable, ambiental y operacional, que afecta en mayor medida a la ganancia de energía útil.

4. Obtener los valores de capacitancia y eficiencia térmica para cada configuración evaluada del arreglo de Colectores de Canal Parabólico.
5. Analizar la factibilidad económica de la aplicación de un arreglo de Colectores de Canal Parabólico para la generación de calor de proceso en una industria de Yucatán.

Hipótesis.

El diseño de este arreglo de colectores con una inclinación de 21° y seguimiento solar de 4 horas, en comparación con un sistema estático, permitirá mayor aprovechamiento de la irradiancia y evaluaciones para diferentes configuraciones del arreglo, en las condiciones de la ciudad de Mérida, Yucatán, México.

Contenido del trabajo.

A continuación, se describen brevemente los capítulos contenidos en este trabajo.

En el capítulo 1, se presenta información acerca del desarrollo, parámetros técnicos de diseño y operación de los colectores de canal parabólico bajo un panorama mundial, nacional y estatal. En el presente capítulo se realiza una descripción de trabajos reportados en la literatura científica, enfocándose principalmente en el aspecto de diseño y evaluación; también se presentan algunas aplicaciones reportadas, incluyendo la generación de calor de proceso industrial.

En el capítulo 2, se desarrolla el análisis teórico para este CCP. En este capítulo se describe la metodología para calcular la eficiencia óptica del concentrador; de igual forma se presenta la metodología para calcular la eficiencia del CCP.

En el capítulo 3, se explica el dimensionamiento del colector. Se muestra la construcción del arreglo de colectores de canal parabólico, considerando características esenciales para su evaluación, de igual manera se presenta como se realizó desde un CCP, hasta la finalización de todo el arreglo.

En el capítulo 4, se presenta la evaluación realizada para todas las configuraciones posibles del arreglo, con la comparación de realizarlo de manera estática y con el sistema de seguimiento. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos en unidades

de la ganancia de energía útil, las variables que más afectación tienen en el sistema y la eficiencia del arreglo.

En el capítulo 5, se propone una aplicación del arreglo de CCP en una industria textil de Yucatán. Se hará el dimensionamiento de los CCP necesarios para conformar un arreglo que satisfaga una necesidad térmica de la industria. Con base a esto se desarrolla un análisis de factibilidad económica.

Capítulo 1. Colectores de Canal Parabólico.

1.1. Introducción a los concentradores de punto y línea focal.

La radiación solar es convertida en energía térmica en el foco de un sistema de concentración solar. Estos sistemas son clasificados de acuerdo a la geometría de su foco: concentradores de punto focal (sistemas con receptor central y discos parabólicos) y concentradores de línea focal (Colectores de Canal Parabólico y Colectores Fresnel) (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010). Sin embargo, este trabajo se centra en los concentradores de línea focal, específicamente en los sistemas CCP.

Las aplicaciones de los sistemas CCP se pueden dividir en dos grandes grupos. El primer grupo son los implementados en las plantas concentradoras, cuya función es la producción de electricidad, desalinización, fotocátalisis, etc; poseen una apertura de aproximadamente 6 metros, longitudes que van desde los 100 metros hasta los 150 metros, proporciones de concentración¹ entre los 20 y 30, y temperaturas entre los 300 °C y los 400 °C. El segundo grupo, se centra en la generación de calor de proceso industrial², en la **Tabla 1** se muestran estos procesos; estos sistemas poseen una apertura entre 1 y 3 metros, longitudes desde los 2 hasta los 10 metros, proporciones de concentración con valores entre los 15 y 20, y temperaturas que van de 100 °C a 250 °C (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).

1.2. Los primeros colectores de canal parabólico.

En el año 1870 un inmigrante sueco en los Estados Unidos, John Ericsson, un ingeniero exitoso, diseñó y construyó un colector con 3.25 m² de apertura para la producción de vapor dentro del mismo CCP. De 1872 a 1875 construyó 7 dispositivos similares, pero usando aire como fluido de trabajo. En 1883, Ericsson construyó un “motor solar” que tenía 3.35 metros de largo, 4.88 metros de apertura y dirigía la

¹ Es la proporción entre el área de apertura y el área del receptor para un CCP (Duffie y Beckman, 2006).

² Aumento de temperatura en un fluido de trabajo por medio de la quema de un combustible, calor residual o energía solar para agregarlo a algún proceso industrial.

irradiación hacia un tubo receptor de 15.88 cm de diámetro. Lo fabricó con costillas de acero, usando palos de madera rectos para unirlos; usó espejos planos para reflejar la radiación solar (Ericsson, 1884).

En 1912, con la experiencia ganada en pruebas anteriores, Frank Shuman diseñó e instaló una planta de bombeo para riego en una villa agricultora llamada Meadi, localizada al sur de El Cairo, Egipto; siendo uno de los primeros en usar un tubo receptor (8.9 cm de diámetro) con una cubierta de vidrio. Esta planta generaba vapor saturado y tenía las siguientes características: 62.17 metros de largo y 4.1 metros de apertura, lo que le daba un área de captación aproximada de 1250 m², poseía una proporción de concentración igual a 4.6 y una eficiencia igual a 40.7% (Kreider y Kreith, 1981).

En los años 80 se introdujeron los primeros sistemas CCP al mercado de los Estados Unidos de Norteamérica, algunas compañías que los desarrollaron son Acurex solar Corp., Solar Kinetics Inc., y Suntec Systems Corp., General Electric Co., Honeywell Inc. y Jacobs Del. Corp.; la **Tabla 2** muestra las características de algunos modelos desarrollados, comparadas con las de un modelo de origen Israelí (Kutscher, Davenport, Dougherty, Gee, Masterson y May, 1982)

Tabla 2. Principales características de los primeros CCP's comerciales (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).

Compañía o Institución	Acurex Corp.		Solar Kinetics Inc.		Suntec Systems Inc.	Solel Solar Systems
Modelo	3001	3011	T-700	T-800	IV	IND-300
País	EUA	EUA	EUA	EUA	EUA	Israel
Temp. de operación máx. [°C]	320	320	350	320	320	300
Área de apertura [m²]	72.29	78.09	77.96	85.95	108.52	7.8
Ancho de apertura [m]	1.83	2.13	2.13	2.36	3.05	1.3
Longitud [m]	39.5	36.66	36.6	36.42	35.58	6
Longitud focal [m]	0.457	0.533	0.559	0.483	0.838	0.272
Diámetro de tubo receptor [mm]	31.8	31.8	41.3	41.3	38.1	0.022
Diámetro de la cubierta del receptor [mm]	50.8	54	63.5	60	76	N/A
Ángulo de borde [°]	90	90	90	90	90	100
Ángulo de aceptación [°]	1.99	1.71	2.22	1.97	1.43	1.962
Proporción de concentración	18.32	21.32	16.42	18.19	25.48	18.64

Mayor eficiencia óptica	0.708	0.827	0.736	0.737	0.743	0.733
Reflectancia	0.94	0.94	0.84	0.87	0.91	N/A
Transmitancia	0.91	0.95	0.95	0.95	0.95	0.965
Absortancia	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.96
Emitancia (a temp. [°C])	0.20 (300)	0.20 (300)	0.20 (300)	0.20 (300)	0.20 (300)	0.07 (200)

1.3. Panorama mundial.

En este apartado se presenta la tecnología usada y características de las plantas Concentradoras de Energía Solar (CSP plants, por sus siglas en inglés). Este tipo de plantas tienen diferentes aplicaciones dependiendo de la temperatura a la que operen, que a su vez depende de las especificaciones de diseño. Los colectores que se mencionan, se presentan en un orden cronológico.

1.3.1. Colectores Luz.

La compañía Americana-Israelí Luz International Ltd., perteneciente actualmente a la compañía Solel Solar Systems Ltd., diseñó tres generaciones de sistemas CCP llamados: LS-1, LS-2 y LS-3, los cuales fueron instalados en plantas con Sistemas Solares de Generación de Electricidad (*SEGS plants*, por sus siglas en inglés). En la **Tabla 3** se muestran las características de estos colectores.

Tabla 3. Principales características de los colectores Luz (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).

Compañía o Institución	LS-1	LS-2	LS-3
Año	1984	1985	1989
Temp. de operación máx. [°C]	307	349	390
Área de apertura [m²]	128	235.5	570.2
Ancho de apertura [m]	2.55	5	5.76
Longitud [m]	50.2	47.1	99
Longitud focal [m]	0.68	1.4	1.71
Diámetro de tubo receptor [mm]	40	70	70
Ángulo de borde [°]	85	80	80
Ángulo de aceptación [°]	1.918	1.59	1.37
Proporción de concentración	18.95	22.74	26.2
Mayor eficiencia óptica	0.734	0.74	0.77
Reflectancia	0.94	0.94	0.94
Factor de intercepción	0.87	0.89	0.93

Transmitancia	0.94	0.95	0.96
Absortancia	0.94	0.94	0.96
Emitancia (a temp. [°C])	0.30 (300)	0.24 (300)	0.15 (350)

Las primeras dos generaciones tienen diseños similares, montados en una estructura del mismo largo, pero el ancho de la apertura del LS-2 era el doble que el de LS-1. La estructura estaba asentada sobre un tubo rígido que fungía como soporte estructural llamado tubo de torque, el cual soportaba las costillas que daban la forma parabólica a los concentradores; éstos fueron fabricados por la empresa Flabeg Solar Int., tenían un bajo contenido en hierro, una cubierta plateada de 4 mm de espesor con cinco capas (1 de cobre y 4 de barniz) (Dudley y otros, 1994). En el caso del colector LS-3 (**Figura 4**), el tubo de torque es reemplazado por un marco metálico, el ancho de apertura es un 14% más amplio, tiene el doble de longitud y son posicionados por un sistema de control hidráulico en vez de un sistema de engranes con cadena, como en el caso del colector LS-2 (Price y otros, 2002). El Elemento Colector de Calor (HCE, por sus siglas en inglés) o Tubo Receptor usado en los colectores Luz (manufacturados por Flabeg Solar Int.) son unos tubos de acero inoxidable con un revestimiento selectivo y encerrados en un tubo de vidrio al vacío (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).



Figura 4. Parte frontal (izquierda) y posterior (derecha) del colector LS-3 (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).

1.3.2. Colector EuroTrough.

En 1998, un consorcio de compañías europeas y laboratorios de investigación fue creado para desarrollar una nueva generación de CCP para plantas Concentradoras de Energía Solar, debido a que el modelo LS-3 ya no era competitivo (Geyer y otros, 2002).

Éste colector fue el resultado del análisis de diferentes estructuras para colectores, **Figura 5**, con características geométricas similares al LS-3, pero con la diferencia de que combinaban el sistema de torque del LS-2 y el LS-3 (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010). La primera versión de estos sistemas fue el ET-100, el cual tenía 8 módulos (**Figura 5**) por cada 100 metros de longitud del colector y un área de apertura aproximada de 545 m². La combinación de los sistemas de torque mencionados permitió que la longitud original pudiera ser extendida, dando como resultado la segunda versión, ET-150. La longitud aumentó a 150 metros, en los cuales había 12 módulos con un área de apertura aproximada de 820 m² y los concentradores usados en estos modelos eran los mismos que en el LS-3 (Geyer y otros, 2002).

Por otro lado, el modelo de tubo receptor usado fue el UVAC 2003, que corresponde a la tercera generación de los tubos de vacío desarrollados por la empresa Solel Solar Systems Ltd. Este receptor, mejora la eficiencia anual de un 12% a un 20%, particularmente en el invierno (el 20% al 30%) (Price, Forristall, Wendelin, Lewandowski, Moss y Gummo, 2006). Este tipo de colector usaba un Fluido sintético de Transferencia de Calor (HTF por sus siglas en inglés) que le permitían operar a temperaturas cercanas a los 400 °C (Geyer y otros, 2002).

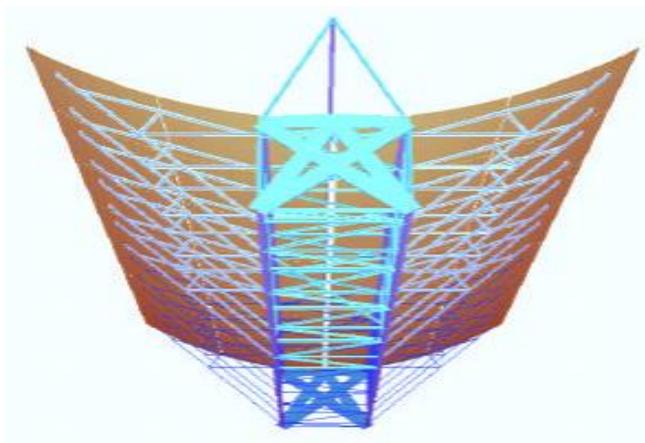


Figura 5. Modelo computacional del colector EuroTrough (Geyer y otros, 2002).

El colector EuroTrough tiene las siguientes ventajas en comparación con los CCP antecesores (Price y otros, 2002) (Geyer y otros, 2002):

1. Menor deformación en la estructura del colector bajo cargas gravitacionales y de viento, por lo que se reduce la torsión y flexión durante la operación del colector, lo que conlleva al mejoramiento del desempeño óptico.
2. Al extender la longitud de 100 metros (ET-100) a 150 metros (ET-150), se redujeron las unidades de control de los colectores, así como las tuberías de conexión, lo cual redujo las pérdidas térmicas y el costo total del sistema.
3. Se tienen menos efectos de sombreado debido a la mejora en la estructura de soporte para el tubo receptor.
4. La estructura de soporte del colector es 14% más ligera que la del LS-3.
5. Al tener menos componentes, se incrementa la capacidad de producción a gran escala.
6. Menores requerimientos de operación y mantenimiento.
7. Manufacturación simple, lo cual reduce los costos de armarlo en el sitio de operación.
8. Una reducción del 10% del costo total.

Los CCP como el EuroTrough han sido modelados matemáticamente, debido a su forma predeterminada y características que han sido similares desde los colectores Luz. Un reconocido investigador en la Energía Solar Fototérmica, Soteris Kalogirou

ha hecho este tipo de modelaciones, como por ejemplo en (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).

En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se muestran los resultados obtenidos para simulaciones de diferentes fluidos de trabajo usados en el Eurotrough ET-150, los cuales servirán para tomar la decisión acerca de que fluido usar en dichos colectores. Se hicieron simulaciones a diferentes caudales para mostrar el comportamiento de la curva de eficiencia y así estimar el comportamiento del CCP a varios flujos máscicos (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).

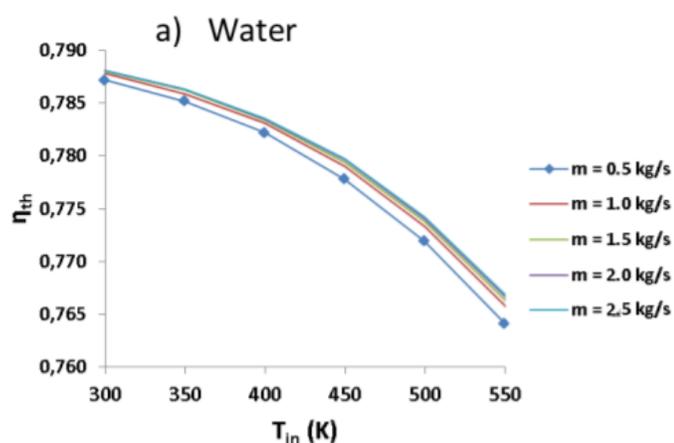


Figura 6. Eficiencia térmica obtenida en el Eurotrough ET-150, usando agua como fluido de trabajo a diferentes caudales (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).

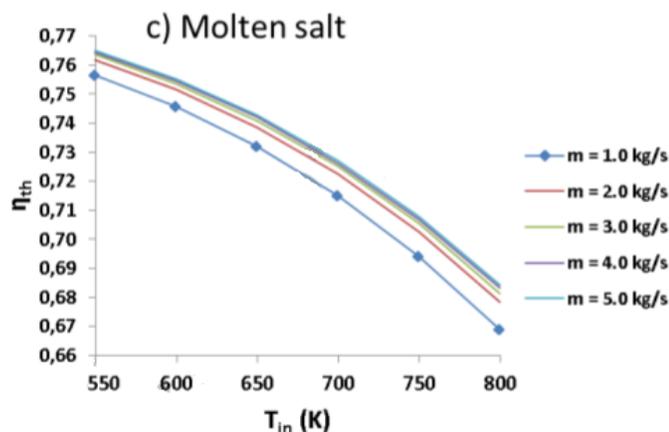


Figura 7. Eficiencia térmica obtenida en el Eurotrough ET-150, usando sal derretida como fluido de trabajo a diferentes caudales (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).

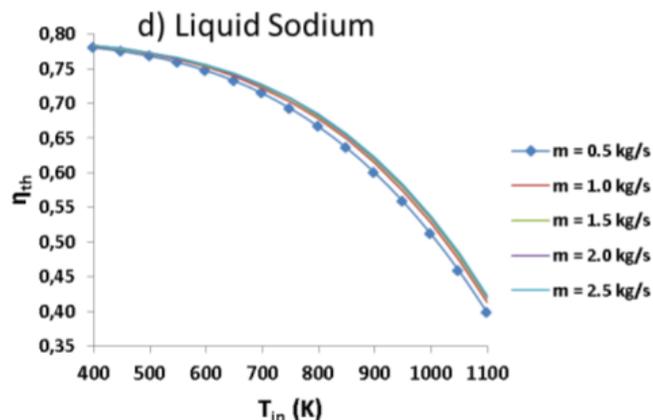


Figura 8. Eficiencia térmica obtenida en el Eurotrough ET-150, usando sodio líquido como fluido de trabajo a diferentes caudales (Bellos, Tzivanidis, & Antonopoulos, 2017).

1.3.3. Colector SGX.

La compañía americana Solargenix Energy, fundada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, desarrolló dos CCP (SGX1 y SGX2) en un intento por mejorar la eficiencia y reducir costos, en comparación con los CCP ya mencionados. El SGX1 sigue el mismo modelo que el LS-2, pero con el doble de largo (94 metros) (Price y otros, 2002).

La principal contribución a este diseño fue una estructura más ligera, por lo cual se hizo completamente de aluminio, lo que aporta una mayor sencillez en su manufactura, facilidad en el armado y mayor resistencia a la corrosión en la intemperie; también implementó nuevos y mejorados subsistemas como por ejemplo, el control del seguimiento solar, pilares de apoyo y unidades de control. Todo esto incrementó su desempeño en un 10% y disminuyó el costo en un 20 %. El SGX2 tuvo un proceso similar al de su antecesor, siendo la principal mejora, la reducción del tiempo de fabricación (Price y otros, 2002) (Gee y Hale, 2005).

1.3.4. Colector SENERTROUGH.

La compañía española, SENER, desarrolló el colector SENERTROUGH-I (**Figura 9**), el cual tiene el mismo tamaño que el LS-3. Sin embargo, la estructura del tubo de torque retoma el diseño que tenía el LS-2. Este tubo con gran torque está hecho de

acero y varía en espesor dependiendo de la carga de viento. Las costillas de acero están conectadas al tubo de torque (**Figura 9**) lo que reduce los costos de fabricación y el peso en un 30% (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).



Figura 9. Vista posterior del colector SENRTRoug (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010).

1.4. Panorama nacional.

En la república mexicana, la energía solar fototérmica es un tema de investigación de una gran diversidad de instituciones y centros de investigación, debido a esto, se ha generado un gran avance en su desarrollo. Existen una gran cantidad de proyectos desarrollados y en desarrollo, con aplicaciones hacia la investigación e industriales. A continuación, se presentarán algunos proyectos de colectores solares que se han fabricado por diversas instituciones de nuestro país.

1.4.1 Colector del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

El IIE desarrolló un prototipo de CCP para la producción de calor de proceso en el 2001 (**Figura 10**). El soporte estructural era un tubo de acero, el concentrador tenía una superficie reflectante de aluminio anodizado con un espesor de 5 mm y el elemento receptor era un tubo metálico pintado de negro, rodeado por un tubo de vidrio sin vacío.

Un segundo prototipo, fue desarrollado con una estructura mucho más ligera (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014); contaba con un sistema de seguimiento solar de un eje y un subsistema que ayudaba a balancear la tensión en el colector. Respecto al tubo

receptor, su soporte fue cambiado por un material más ligero y resistente, el teflón. Este prototipo fue instalado en una Lavandería Industrial en Torreón, Coahuila en el año de 2003. Para finales del año 2004 la empresa automovilística Nissan, con sede en Cuernavaca, Morelos, solicitó al Instituto de Investigaciones Eléctricas la construcción e instalación de dos Colectores de Canal Parabólico, para el calentamiento de agua sanitaria (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014).

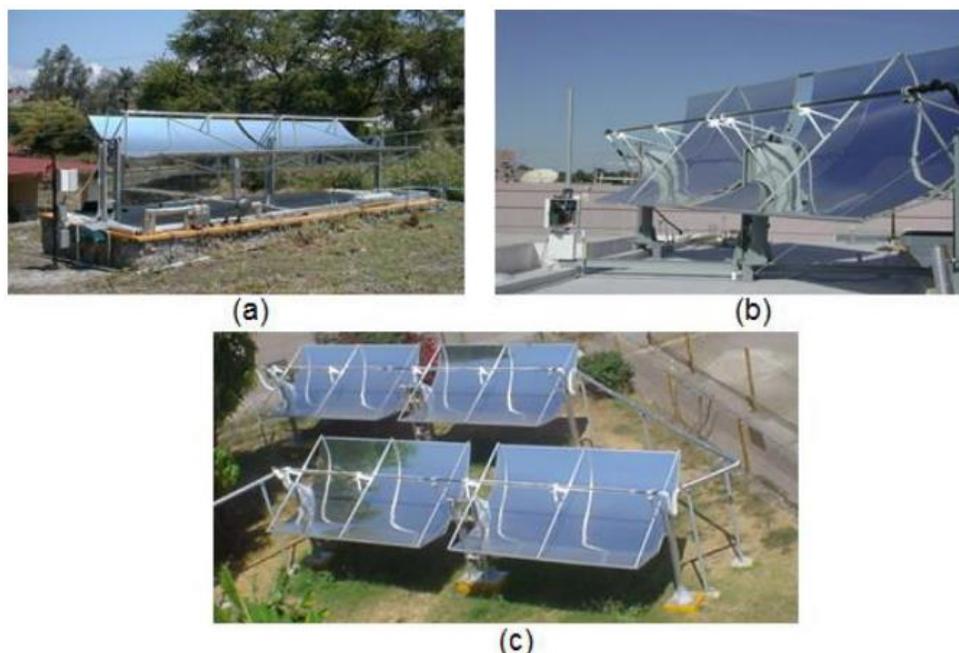


Figura 10. En la figura a) se observa el CCP de la IIE, en la figura b) el CCP instalado en una lavandería industrial en Torreón, Coahuila y en la figura c) el CCP instalado en la planta NISSAN de Cuernavaca, Morelos para el calentamiento de agua sanitaria (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014).

1.4.2. Colector de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR).

En este diseño se implementó un sistema de seguimiento solar y la superficie reflectante consistía de una lámina de aluminio anodizado. Durante su diseño se presentaron dudas de su resistencia a las cargas de viento, por lo que se realizaron simulaciones para evaluar este comportamiento, obteniéndose una deformación mínima en el centro de la estructura, **Figura 11**. Se empleó un tubo de acero pintado y cubierto de un tubo de vidrio como receptor (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014).

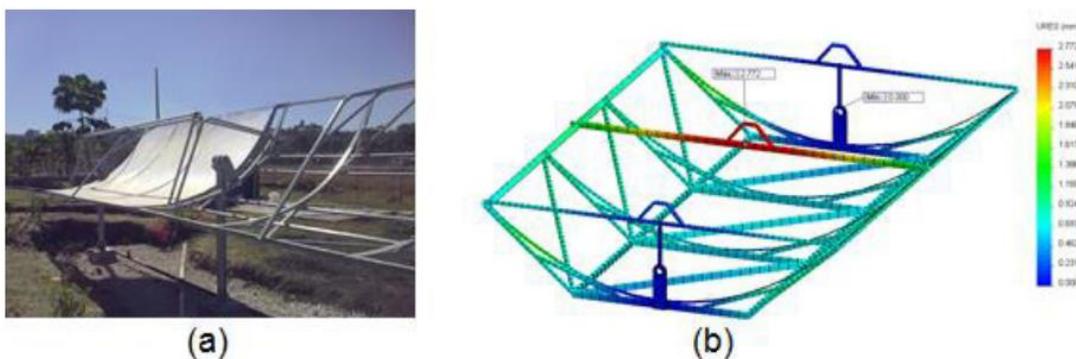


Figura 11. a) Estructura del CCP y b) simulación por medio de un Análisis de Elementos Finitos (Ramos, Beltran y Ramirez, 2014).

1.4.3. Colectores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En el 2013, se reportó un trabajo donde se realizó el diseño, construcción y evaluación experimental de dos tipos de CCP para conformar una planta de generación de vapor de baja entalpía. El primero, tiene un ángulo de borde de 90° (CCP-90), se construyeron 3. El segundo, tiene un ángulo de borde de 45° (CCP-45), se construyeron 2; sin embargo, este último presentó un bajo desempeño óptico por lo que fue necesario reconstruirlo haciéndolo más largo, para que presentara una mayor eficiencia que su antecesor. Los colectores (**Figura 12**) estaban hechos en parte de aluminio, las costillas y los tubos de unión, mientras que los Perfiles Tubulares Rectangulares (PTR) y la estructura de soporte para el colector eran de acero. Estos colectores también fueron evaluados por un análisis de elementos finitos (**Figura 13**) para evaluar los efectos de las cargas de viento. El sistema de seguimiento estaba constituido por un servomotor de corriente directa acoplado a la flecha del colector mediante un sistema de banda y poleas (Venegas, 2013).



Figura 12. Arreglo de colectores, del lado izquierdo se aprecian los CCP-45 y del lado derecho los CCP-90 (Venegas, 2013).

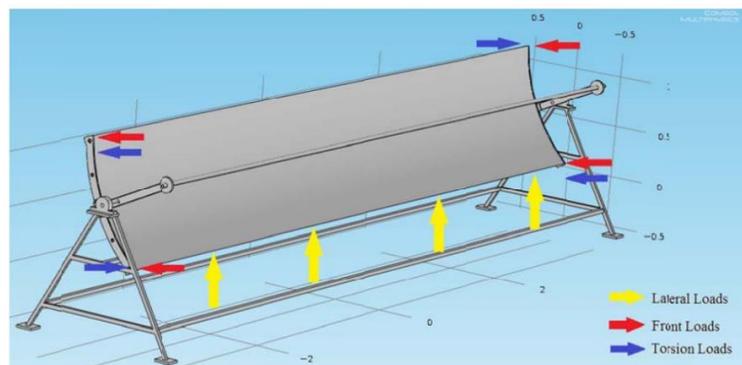


Figura 13. Análisis de elementos finitos aplicado a cada colector (Venegas, 2013).

El trabajo reporta que para el CCP-90 se tuvo un valor máximo de eficiencia de 66% y en el CCP-45 de 35%; esta diferencia fue debido a la baja eficiencia óptica del CCP-45, ya que parte de la radiación no era interceptada por el receptor para ángulos de incidencia alejados de la normal del CCP. Para el arreglo mixto de estos colectores se registró una eficiencia máxima de 55% para un flujo de 4 litros por minuto (Venegas, 2013).

1.5. Panorama en el Estado de Yucatán.

El Estado de Yucatán, cuenta con el recurso solar suficiente (promedio anual de 5500 Wh/m²) para que la energía solar fototérmica pueda ser aprovechada

(SENER, 2018). Una de las principales formas de aprovechamiento sería la generación de calor de proceso, ya que existen diferentes industrias instaladas en la región.

1.5.1. Colector de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY).

En la Facultad de Ingeniería de la UADY se construyó un CCP en el año 2010. El concentrador era una lámina de acero inoxidable con acabado pulido, con 3 soportes de acero inoxidable, dos en los extremos y uno en el centro para sostener al tubo receptor. El colector tenía un ángulo de borde igual a 65.56° y un tubo receptor de cobre de $\frac{3}{4}$ " , al cual se le aplicó una pintura negra especial para altas temperaturas. Contaba con una longitud de 2.40 metros y una apertura de 2.325 metros. A este colector se decidió darle una orientación Norte-Sur para el seguimiento solar. La eficiencia del colector, a un flujo másico de 0.022 kg/s y una temperatura cercana al ambiente, fue de 5.43 % (Rosado, 2010).

1.6. Aplicaciones.

Los CCP tienen muchas aplicaciones que dependen principalmente de la temperatura a la que operan. A continuación se presentan algunas descripciones de estas aplicaciones (Fernández-García, Zarza, Valenzuela y Pérez, 2010):

1. *Plantas Concentradoras de Energía Solar.* Estas plantas normalmente se localizan en zonas parcialmente áridas donde el recurso solar es muy alto, entre 1700 kWh/m² año y 2000 kWh/m² año. Las áreas con mayor potencial en el mundo son el desierto de África del Norte, la península Arábiga, India, centro y este de Australia, noreste de Brasil, norte de México, sur de Estados Unidos, sur de España y las islas Mediterráneas. Estas plantas se instalan con una orientación norte-sur, maximizando la cantidad de energía producida a lo largo del año. Sus temperaturas de operación oscilan entre los 250 °C y los 400 °C. Su principal uso es para la producción de electricidad.
2. *Calor de Proceso Industrial.* De la energía total demandada por las industrias, entre el 45 y el 65% es usado directamente para la aplicación de calor de proceso en la producción y tratamiento de los diversos productos. Las temperaturas típicas de estos procesos oscilan entre los 60 °C y los 400 °C;

siendo las industrias de alimentos y bebidas las que caen en esta clasificación, pero también se tiene un gran potencial en el área de la industria textil, metal, tratamiento de plásticos, químicos, limpieza, secado, evaporación y destilación, blanqueo, pasteurización, esterilización y pinturas.

3. *Calentamiento de agua y espacios domésticos.* Para estas aplicaciones las temperaturas requeridas son menores a 100 °C, principalmente para la cocina, baños, lavandería e inclusive se pudiera usar para calentar el agua de piscinas.
4. *Refrigeración y aire acondicionado.* Esta tecnología sigue desarrollándose debido a la gran competencia que hay con los sistemas de refrigeración convencionales; sin embargo, se pueden usar los CCP para estos procesos. Las temperaturas requeridas oscilan entre los 140 °C y los 160 °C.

Otras aplicaciones, pueden aplicar en el uso en el bombeo y riego, desalinización y química solar; sin embargo, solo la segunda de estas ha presentado buenos resultados.

Capítulo 2. Análisis teórico del Colector de Canal Parabólico.

Los colectores de concentración tienen, como su nombre lo indica, una superficie que permite concentrar toda la irradiancia incidente sobre un tubo receptor; dicha superficie posee propiedades ópticas que mejoran la concentración. Por lo tanto, para los CCP, tanto el análisis óptico como el análisis térmico son esenciales.

2.1. Análisis óptico.

Para entender cómo operan los colectores de concentración, es necesario describir las propiedades ópticas de los concentradores, de acuerdo a su geometría, y las imágenes (la distribución de radiación solar en el foco) formadas por éstos.

2.1.1. Proporción de concentración.

La proporción de concentración (C) es definida como la razón entre el área de apertura (A_a) y el área del receptor (A_r), esto es (Duffie y Beckman, 2006):

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Esta proporción de concentración tiene un límite para los colectores de concentración, los cuales pueden ser tridimensionales (un colector paraboloide) o bidimensionales (un CCP), donde éstos últimos también son llamados lineales (Duffie y Beckman, 2006). Consideremos un colector tridimensional con un área de apertura A_a y un área de receptor A_r localizado a una distancia R del centro del Sol, como se muestra en la **Figura 14**. Visto desde la tierra, el Sol es una esfera con radio r y el ángulo que se forma entre el receptor del colector y la superficie del sol se conoce como medio ángulo de aceptación (θ_m). Si tanto el sol y el receptor se consideran como cuerpos negros a temperaturas T_s y T_r , la cantidad de radiación emitida por el Sol está dada por la siguiente ecuación, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann (Kalogirou, 2009):

$$Q_s = (4\pi r^2)\sigma T_s^4 \quad \text{Ec. 2.2}$$

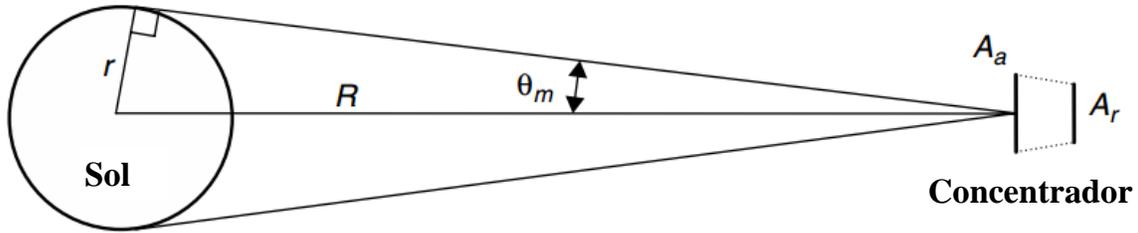


Figura 14. Esquema del colector a una distancia R del Sol (Kalogirou, 2009).

Una fracción de esta radiación interceptada por el colector, es expresada de la siguiente forma:

$$F_{s-r} = \frac{A_a}{4\pi R^2} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Por lo tanto, la energía radiada por el Sol y recibida por el colector está dada por:

$$Q_{s-r} = F_{s-r}(4\pi r^2)\sigma T_s^4 = A_a \frac{4\pi r^2}{4\pi R^2} \sigma T_s^4 = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad \text{Ec. 2.4}$$

El receptor, al suponer que también es un cuerpo negro, irradia una energía igual a $A_r \sigma T_r^4$; y si una fracción de esto llega al sol, entonces:

$$Q_{r-s} = F_{r-s} A_r \sigma T_r^4 \quad \text{Ec. 2.5}$$

Con estas condiciones, la temperatura máxima del receptor sería igual a la del Sol. De acuerdo a la segunda Ley de la termodinámica, esto sería real solo cuando $Q_{s-r} = Q_{r-s}$. Por lo tanto, de las **Ec. 2.4** y **Ec. 2.5**, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} F_{r-s} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Dado que F_{r-s} es una fracción, el máximo valor de $\frac{A_a}{A_r}$ sería cuando dicha fracción sea igual a la unidad. La razón $\frac{R}{r}$, de acuerdo a la **Figura 14**, es igual a $\sin(\theta_m)$. Con estas consideraciones, la proporción de concentración máxima para un colector tridimensional es:

$$C_{m\acute{a}x,3D} = \frac{1}{\sin^2(\theta_m)} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Para concentradores bidimensionales, la proporción de concentración máxima es:

$$C_{m\acute{a}x,2D} = \frac{1}{\sin(\theta_m)} \quad \text{Ec. 2.8}$$

El medio ángulo de aceptación (θ_m) es igual a 0.27° ($16'$) y representa la apertura del cono de cada haz de irradiancia incidente (Duffie y Beckman, 2006). Con el valor de θ_m , se puede encontrar el valor máximo de proporción de concentración para un colector bidimensional $C_{m\acute{a}x,2D}$:

$$C_{m\acute{a}x,2D} = \frac{1}{\sin(\theta_m)} = \frac{1}{\sin(0.27)} = 214.86$$

Sin embargo, este es el caso ideal, pues contempla que el elemento receptor es el mínimo posible. Por lo tanto, para un colector con receptor tubular, la proporción de concentración está dada por la siguiente expresión (Kalogirou, 2009):

$$C = \frac{W_a}{\pi D} \quad \text{Ec. 2.9}$$

donde W_a es el lado recto de la parábola y D es el diámetro ideal del tubo receptor. Reemplazando las **Ec. 2.4** y **Ec. 2.6** en la **Ec. 2.9**, obtenemos lo siguiente:

$$C = \frac{\sin(\varphi_r)}{\pi \sin(\theta_m)} \quad \text{Ec. 2.10}$$

La máxima proporción de concentración ocurrirá cuando φ_r sea igual a 90° , es decir, $\sin(\varphi_r) = 1$. Por lo tanto, la **Ec. 2.10** queda de la siguiente forma:

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\pi \sin(\theta_m)} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Ahora, el nuevo valor máximo de C para un CCP es:

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\pi \sin(0.27)} = 67.54$$

2.1.2. Eficiencia óptica.

La eficiencia óptica (η_o) es definida como la razón entre la energía absorbida por el receptor y la energía incidente en la apertura del colector. Este valor depende de las propiedades ópticas de los materiales usados, la geometría del colector y de las

imperfecciones que surgen durante su construcción. Su ecuación está dada por (Kalogirou, 2009):

$$\eta_o = \rho\tau\alpha\gamma[(1 - A_f \tan(\theta))\cos(\theta)] \quad \text{Ec. 2.12}$$

donde: ρ = Reflectancia de la lámina, τ = Transmitancia de la cubierta de vidrio, α = Absortancia del receptor, γ = Factor de intercepción, A_f = Factor geométrico y θ = Ángulo de incidencia.

El factor A_f , como su nombre lo indica, depende de la geometría del colector. Este factor es una medida de la reducción efectiva del área de apertura debido a los efectos de incidencia anormal como lo son obstrucciones, sombreado y pérdidas de radiación reflejada fuera del tubo receptor. El área de apertura perdida se muestra en la **Figura 15**; una fracción de dicha área está dada por la siguiente expresión:

$$A_e = fW_a \tan(\theta) \left[1 + \frac{w_a^2}{48f^2} \right] \quad \text{Ec. 2.13}$$

El colector propuesto tiene un marco que entra 5 mm en la apertura, esto resulta en el sombreado de una parte del concentrador, por lo que se reduce más el área de apertura. Esto se representa en la **Figura 15** y su expresión es:

$$A_b = \frac{2}{3} W_a h_p \tan(\theta) \quad \text{Ec. 2.14}$$

donde h_p es la altura de la parábola; para este caso, $h_p = f$ debido a que el ángulo de borde es igual a 90° .

Para encontrar la pérdida total del área de apertura, A_e y A_b son sumadas, lo que da como resultado la siguiente expresión:

$$A_l = \tan(\theta) \left(\frac{2}{3} W_a h_p + f w_a \left[1 + \frac{w_a^2}{48f^2} \right] \right) \quad \text{Ec. 2.15}$$

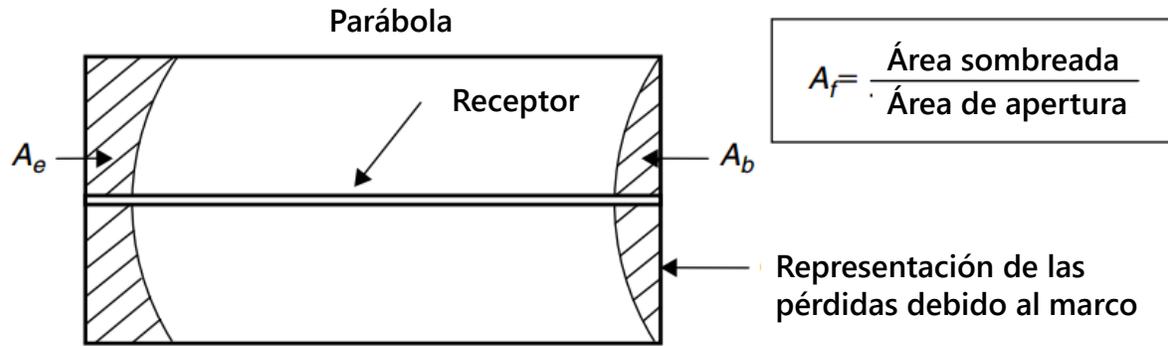


Figura 15. Representación del efecto de borde y el bloqueo en un colector de canal parabólico (Kalogirou, 2009).

De acuerdo a lo anterior, el factor geométrico es la razón entre el área de apertura perdida y el área de apertura total, esto se puede expresar como:

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Para determinar la eficiencia óptica del CCP, el parámetro más complejo por determinar es el factor de intercepción (γ). Este factor se define como la razón entre la energía interceptada por el receptor y la energía reflejada por el dispositivo concentrador. Su valor depende del tamaño del receptor, las imperfecciones del concentrador parabólico y de la radiación solar directa incidente (Duffie y Beckman, 2006).

Los errores asociados con la superficie del concentrador parabólico son de dos tipos (Kalogirou, 2009):

1. Errores aleatorios (σ_a). Se definen como aquellos errores que son aleatorios por naturaleza y por lo tanto, pueden ser representados como una distribución normal probabilística. Estos errores pueden ser el cambio aparente en el tamaño del Sol (σ_{sol}^2), efectos de dispersión debido a errores aleatorios de pendiente ($\sigma_{pendiente}^2$) (por ejemplo, la distorsión de la parábola debido a cargas por viento) y errores de dispersión asociados con la superficie reflectante ($\sigma_{lámina}^2$).

2. Errores no aleatorios. Surgen en el armado o en la operación del colector. Pueden ser debido a las imperfecciones del concentrador, errores de alineación y la desviación del receptor respecto a su posición ideal.

Los errores aleatorios son modelados estadísticamente determinando la desviación estándar de la energía total reflejada; lo anterior está representado por la siguiente expresión (Guyen y Bannerot, 1986):

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{sol}^2 + 4\sigma_{pendiente}^2 + \sigma_{lámina}^2} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Ambos errores, aleatorios y no, pueden ser combinados con los parámetros geométricos del colector, la proporción de concentración (C) y el diámetro del tubo receptor (D) (Guyen y Bannerot, 1986). Estos son llamados parámetros de error universal debido a que se pueden usar para cualquier tipo de colector, ya que dependen de su geometría. Usando los parámetros de error universal, la ecuación que representa el factor de intercepción, γ , está dado por la siguiente expresión (Kalogirou, 2009):

$$\gamma = \frac{1 + \cos(\varphi_r)}{2\sin(\varphi_r)} \int_0^{\varphi_r} Erf \left\{ \frac{\sin(\varphi_r) [1 + \cos(\varphi)] [1 - 2d^* \sin(\varphi)] - \pi\beta^* [1 + \cos(\varphi_r)]}{\sqrt{2}\pi\sigma^* [1 + \cos(\varphi)]} \right\} - Erf \left\{ -\frac{\sin(\varphi_r) [1 + \cos(\varphi)] [1 + 2d^* \sin(\varphi)] + \pi\beta^* [1 + \cos(\varphi_r)]}{\sqrt{2}\pi\sigma^* [1 + \cos(\varphi)]} \right\} \frac{d\varphi}{[1 + \cos(\varphi)]} \quad \text{Ec. 2.18}$$

donde:

d^* = Parámetro de error universal no aleatorio debido a la desviación en la colocación del receptor y a los errores de perfil en la lámina; $d^* = \frac{d_r}{D}$.

β^* = Parámetro de error universal no aleatorio debido a los errores angulares; $\beta^* = \beta C$.

σ^* = Parámetro de error universal aleatorio; $\sigma^* = \sigma_a C$.

C = Proporción de concentración del colector.

D = Diámetro exterior del receptor [m].

d_r = Desplazamiento del receptor del foco [m].

β = Error angular de desalineación [grados].

2.2. Análisis térmico.

Para realizar el análisis térmico de un colector de concentración solar es necesario obtener las expresiones adecuadas para calcular el factor de eficiencia del colector (F'), el coeficiente de pérdidas (U_L) y el factor de remoción de calor (F_R).

2.2.1. Coeficiente de pérdidas para un CCP con tubo receptor sin cubierta.

Para un tubo receptor liso, y asumiendo que no hay gradientes de temperatura a lo largo del receptor, U_L contempla los coeficientes de pérdidas térmicas por convección (h_v) y por radiación (h_r) en la superficie del receptor. No se tomarán en cuenta las pérdidas térmicas por conducción debido a que se colocará un aislamiento en donde el tubo receptor tenga contacto con la estructura. De acuerdo con la anterior la expresión del coeficiente de pérdidas es (Duffie y Beckman, 2006):

$$U_L = h_v + h_r \quad \text{Ec. 2.19}$$

El coeficiente de pérdidas por radiación puede ser estimado de la siguiente expresión:

$$h_r = 4\sigma\epsilon_r T_r^3 \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ_r y T_r son la emisividad y temperatura en la superficie del tubo receptor, respectivamente. Un solo valor de h_r no es suficiente para describir el proceso térmico cuando existe una gran variación de temperatura a lo largo del receptor en dirección del flujo; en este caso el colector es dividido en segmentos, donde cada uno tiene su propio valor de h_r (Kalogirou, 2009).

Para hallar el coeficiente de pérdidas por convección, se puede usar el número de Nusselt, calculado por la siguiente expresión (Duffie y Beckman, 2006):

Para $0.1 < Re < 1,000$:

$$Nu = 0.4 + 0.54(Re)^{0.52} \quad \text{Ec. 2.21a}$$

Para $1,000 < Re < 50,000$:

$$Nu = 0.3(Re)^{0.6} \quad \text{Ec. 2.21b}$$

donde Re es una medida del tipo flujo interno, conocido como número de Reynolds. Una vez que se tiene el número de Nusselt, se procede a encontrar h_v usando la expresión:

$$Nu = \frac{h_v D_{ext}}{k_{aire}} \Rightarrow h_v = Nu \frac{k_{aire}}{D_{ext}} \quad \text{Ec. 2.22}$$

donde D_{ext} es el diámetro exterior del tubo receptor y k_{aire} es la conductividad térmica del aire.

2.2.2 Eficiencia térmica instantánea.

La eficiencia térmica instantánea de los colectores de concentración puede ser calculada a partir de un balance de energía en su receptor. La ganancia de energía útil liberada del concentrador se muestra en el siguiente balance energético (Kalogirou, 2009):

$$Q_u = G_B \eta_o A_a - A_r U_L (T_r - T_a) \quad \text{Ec. 2.23}$$

donde: Q_u = Ganancia de energía útil, G_B = Radiación directa incidente, η_o = Eficiencia óptica, A_a = Área de apertura, A_r = Área del receptor, U_L = Coeficiente de pérdidas, T_r = Temperatura del receptor y T_a = Temperatura del ambiente.

La ganancia de energía útil también puede ser expresada en términos de la unidad de longitud del colector:

$$q'_u = \frac{Q_u}{L} = \frac{G_B \eta_o A_a}{L} - \frac{A_r U_L}{L} (T_r - T_a) \quad \text{Ec. 2.24}$$

o en términos de la energía transferida al fluido a una temperatura local del sitio T_f (Kalogirou, 2009):

$$q'_u = \frac{\frac{A_r}{L} (T_r - T_f)}{\frac{D_{ext}}{h_{fluido} D_{int}} + \left(\frac{D_{ext}}{2k_{fluido}} \ln \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right)} \quad \text{Ec. 2.25}$$

donde: D_{ext} = Diámetro externo del tubo receptor, D_{int} = Diámetro interno del tubo receptor, k_{fluido} = Conductividad térmica del fluido y h_{fluido} = Coeficiente de transferencia de calor convectivo dentro del tubo receptor.

El coeficiente de transferencia de calor convectivo, h_{fluido} , puede ser obtenido de la ecuación estándar para el flujo en una tubería (Kalogirou, 2009):

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \quad \text{Ec. 2.26}$$

donde: Re = Número de Reynolds ($\rho_{fluido}V_{fluido}D_{int}/\mu_{fluido}$) y Pr = Número de Prandtl ($v/\alpha_{térmica}$).

Cabe aclarar que la **Ec. 2.26** es para flujos turbulentos ($Re > 2300$); para flujos laminares, $Nu = 4.364$. Una vez hallado el número de Nusselt, y modificando la **Ec. 2.22**, se puede encontrar el coeficiente de transferencia de calor convectivo con la siguiente expresión:

$$h_{fluido} = Nu \frac{k_{fluido}}{D_{int}} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Ya que se tiene h_{fluido} , para eliminar el término T_r , se igualan las **Ec. 2.24** y **Ec. 2.25** obteniendo la siguiente ecuación:

$$q'_u = F' \frac{A_a}{L} \left[\eta_o G_B - \frac{U_L}{C} (T_f - T_a) \right] \quad \text{Ec. 2.28}$$

Donde F' es el factor de eficiencia del colector, expresado de la siguiente forma:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ext}}{h_{fluido}D_{int}} + \left(\frac{D_{ext}}{2k_{fluido}} \ln \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right)} = \frac{U_o}{U_L} \quad \text{Ec. 2.29}$$

Donde U_o es el coeficiente de transferencia de calor general y está dado por:

$$U_o = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ext}}{h_{fluido}D_{int}} + \left(\frac{D_{ext}}{2k_{fluido}} \ln \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right) \right]^{-1} \quad \text{Ec. 2.30}$$

En la **Ec. 2.22** el término T_r puede ser reemplazado por T_{ent} , la temperatura de entrada del fluido al tubo receptor, adhiriendo el factor de remoción de calor del colector, expresado como:

$$Q_u = F_R [G_B \eta_O A_a - A_r U_L (T_{ent} - T_a)] \quad \text{Ec. 2.31}$$

En la ecuación anterior F_R está definido como la razón entre la transferencia actual de calor y la máxima transferencia de calor posible (Duffie y Beckman, 2006):

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_r U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad \text{Ec. 2.32}$$

En donde \dot{m} es el flujo másico dentro del tubo receptor y C_p es el calor específico del fluido.

De acuerdo a este análisis, la eficiencia térmica instantánea η , es definida como la ganancia de energía útil que entrega el concentrador entre la energía que incide en la abertura del mismo; para el CCP propuesto con un receptor tubular sin cubierta, la expresión está dada por (Venegas, 2013):

$$\eta = \frac{Q_u}{G_B A_a} \quad \text{Ec. 2.33}$$

Sustituyendo la **Ec. 2.31** en la **Ec. 2.33** obtenemos:

$$\eta = F_R \left[\eta_O - \frac{U_L T_{ent} - T_a}{C G_B} \right] \quad \text{Ec. 2.34}$$

A esta eficiencia también se le conoce como la eficiencia por la Primera Ley de la Termodinámica.

Capítulo 3. Construcción del arreglo de CCP.

En este capítulo se describe la construcción del arreglo CCP. Los aspectos importantes del colector son la longitud de la curvatura, que está definida por el ancho de la lámina, y el tubo receptor adecuado para garantizar la intercepción de la radiación reflejada por el concentrador.

3.1. Descripción del CCP.

A continuación, se presenta el diseño final para el colector; con el cual se realiza la propuesta de la estructura que los soportará.

3.1.1. Descripción de la costilla.

El cálculo teórico de la longitud focal resulta en una longitud de curvatura mayor a las dimensiones de la lámina comercial.

Con base a esto, se modificó dicha medida empíricamente en AutoCAD para conseguir el ajuste a la longitud requerida. En la **Figura 16** se aprecia dicha modificación para obtener el diseño final de la costilla, la cual tiene una curvatura de 1.25 metros.

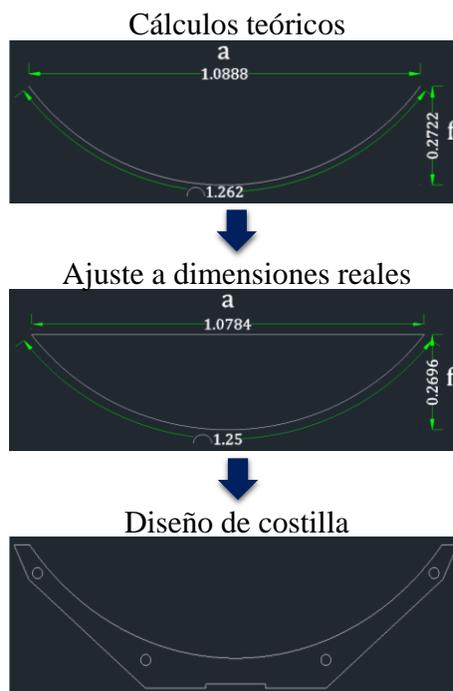


Figura 16. Proceso de dimensionamiento para el diseño de la costilla.

En la **Figura 17** se aprecia el diseño final de la costilla, con las dimensiones especificadas para cada región de ésta. Esta fue el resultado de diversos prototipos, en los cuales se analizaba la cantidad de material necesario para crearla y las dimensiones de los materiales que serán usados para armar el colector.

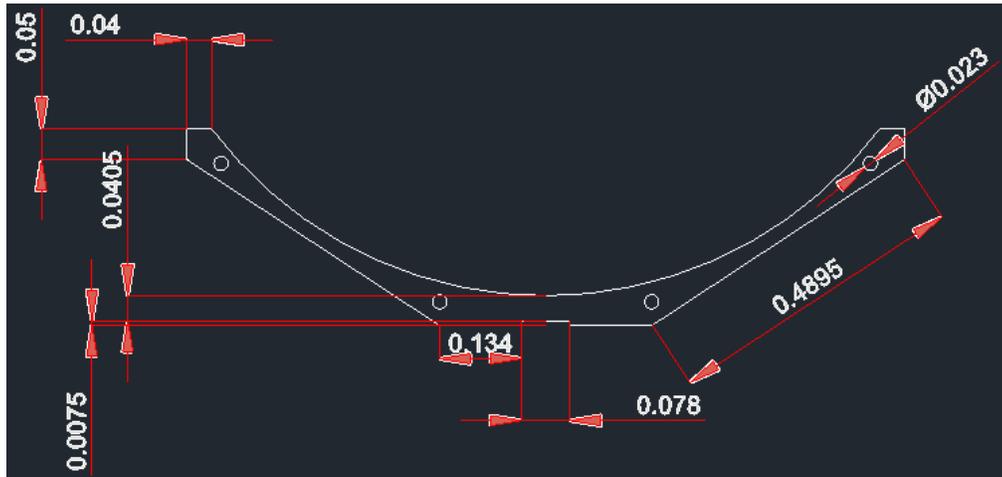


Figura 17. Diseño final de la costilla.

3.1.2. Descripción final del CCP.

En la **Figura 18** se aprecian los componentes del colector, los cuales son de aluminio, para reducir el peso total del CCP y alargar su vida útil. A continuación, se enlista cada uno de los componentes:

1. PTR de 3" x 1 3/4" Calibre 16.
2. Tubería de unión cédula 40 de 1/2".
3. Costilla.
4. Marco de soporte para tubo receptor hecho de solera de 2" x 3/16".
5. Lámina con reflectividad del 95%.
6. Uniones tipo "L" de 1 1/2" x 1/8".
7. Eje para movimiento, compuesto de tubos cédula 4 de 1/2" y 3/4" con chumacera de 3/4".

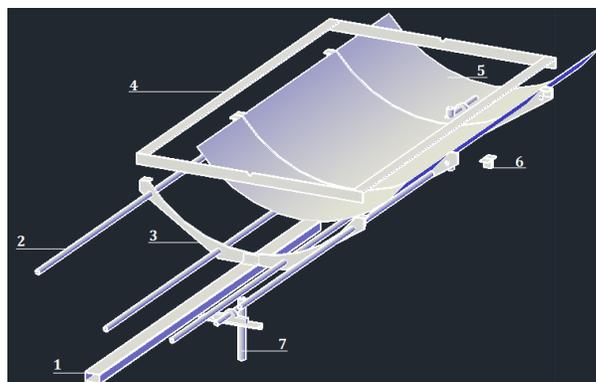


Figura 18. Componentes del CCP.

El colector tiene una longitud de 2.3 metros lineales, tomando como referencia los extremos del PTR. La separación de las costillas y la posición del marco para soporte del tubo receptor están diseñadas de manera que las distancias sean equitativas para balancear su peso.

En la **Figura 19**, se muestra la vista isométrica del diseño final del CCP, para el cual ya se contemplan todas las uniones de costillas al PTR, marco y tuberías de unión; dichas uniones se realizan con remaches. El marco de soporte entra 5 mm tanto del lado izquierdo como del derecho del área de apertura para funcionar también como tope para la lámina y así evitar que se mueva y sufra algún daño posterior.

Los ejes de movimiento contemplan la colocación de una base para sujetarse a la estructura que se mostrará a continuación. Dicha base le provee la inclinación necesaria a cada colector. Cada colector pesará un aproximado de 25 kilogramos.

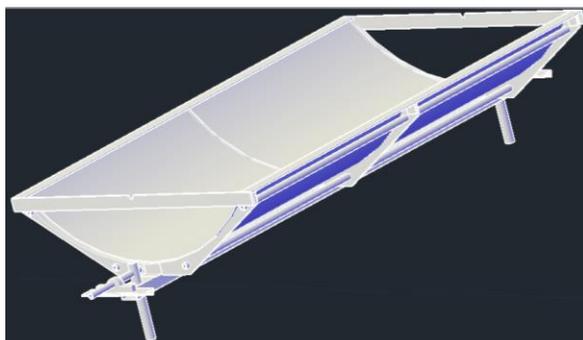


Figura 19. Diseño final del CCP.

3.2. Propuesta de diseño para la estructura del CCP.

En la **Figura 20**, se muestra la estructura de soporte para el arreglo de CCP. La ventaja de tener este diseño es que se propone la inclinación a la latitud de Mérida, 21° , con lo cual se pretende optimizar la captación de la componente de radiación solar directa y con esto, una mayor concentración.

La estructura tiene un largo de 6.70 metros, un ancho de 2.21 metros, la altura menor es de 0.68 metros y la mayor de 1.53 metros; con estas medidas se conseguiría tener la inclinación de 21° . La separación entre cada colector es de 56 cm, con lo cual se garantiza que no se sombrearán entre ellos.

Toda la estructura se propone que sea de PTR de 2" x 2" calibre 14, para que sea lo suficientemente robusta para soportar el peso del arreglo de colectores. Debido a las características el material se fabricará la estructura con soldadura a base de electrodo revestido.

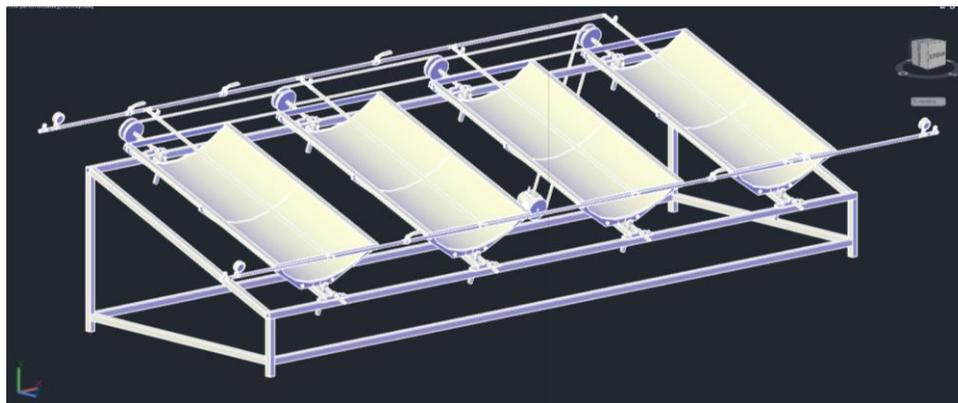


Figura 20. Diseño final de la estructura de soporte con los CCP.

3.3. Circuito hidráulico.

Como se aprecia en la **Figura 20**, ya se propone un circuito hidráulico, en el cual se contemplan los tubos receptores, por lo que siguen conservando su posición óptima y su dimensionamiento previo.

Lo que se plantea con este circuito, es tener establecido una serie de tubos interconectados entre sí y con un sistema de evaluación, para facilitar su validación y

reducir las pérdidas térmicas causadas por un mal aislamiento en las conexiones realizadas.

En todo el circuito se tiene 6 válvulas de esfera para controlar el flujo, 3 manómetros y 7 sensores de temperatura. Los manómetros se colocarán en las entradas y salidas, la misma cantidad de sensores de temperatura se colocarán en esos puntos. Estas de temperatura restantes se colocarán a cada colector con el objetivo de garantizar que haya un correcto flujo y no haya un estancamiento del fluido en alguna tubería.

En la **Figura 21**, se muestra una de las salidas del circuito, en la cual se aprecian válvulas de esfera para abrir o cerrar el flujo de agua, un manómetro y sensores de temperatura.

Este circuito esta hecho de tubería de cobre y será cubierto con un material aislante para evitar pérdidas térmicas.



Figura 21. Vista de una de las salidas para el circuito hidráulico.

3.3.1. Propuestas de flujo.

Para una evaluación se proponen 3 tipos de circuitos para el flujo del agua, con lo cual se pueden probar todos los colectores o si se quiere, uno solo. El objetivo de hacer esto sería obtener datos que puedan dar un claro panorama de bajo qué condiciones y flujo se obtiene una mayor ganancia de energía útil.

En la **Figura 22**, se muestra la configuración en paralelo planteada para el arreglo de colectores. Se aprecia que solo una válvula se debería cerrar para permitir el flujo en toda la tubería restante.

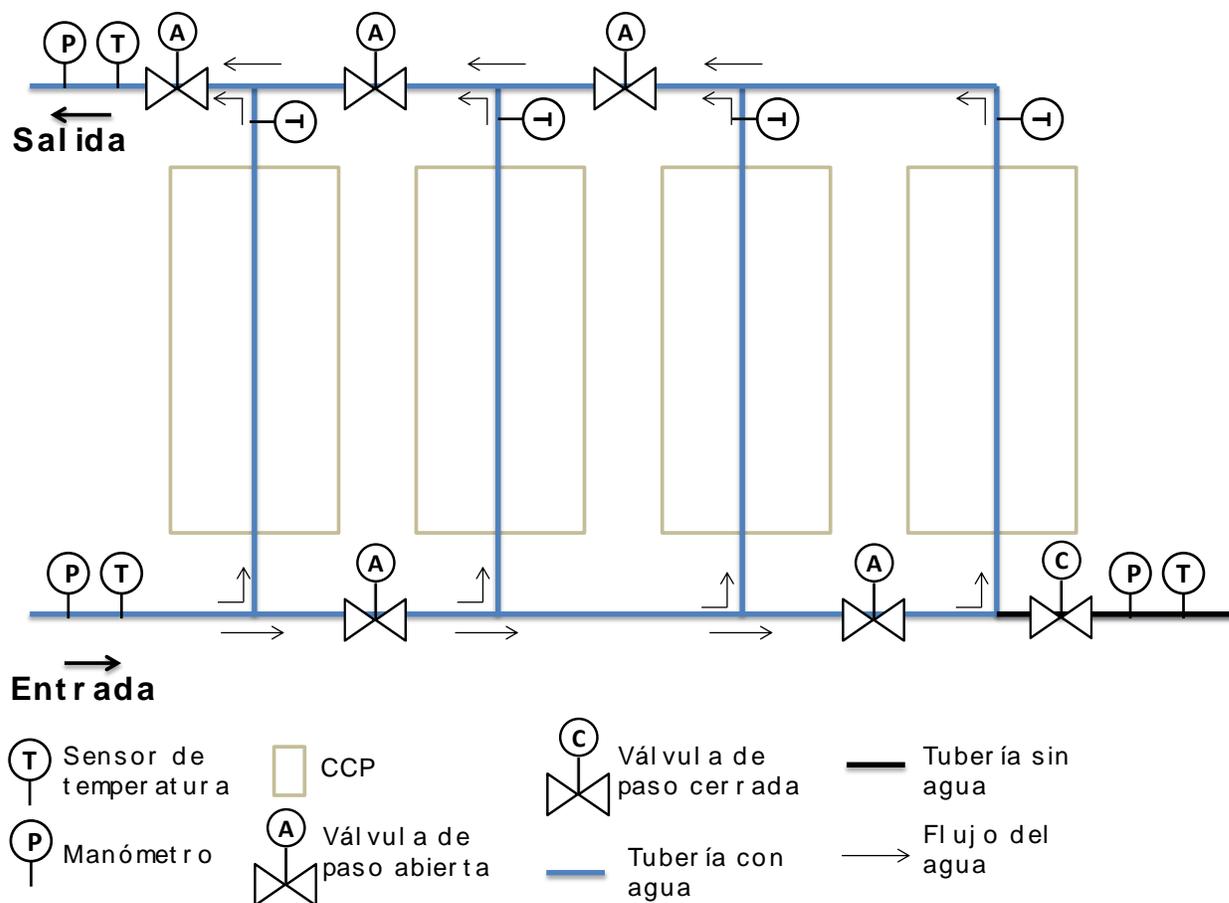


Figura 22. Flujo en paralelo.

En la **Figura 23**, se cierran cuatro de las válvulas para procurar que el flujo, sea de tal manera que el agua pase por cada uno de los tubos receptores y se aumente su temperatura.

Con estas dos configuraciones en serie y en paralelo, se puede dar una comparación de los resultados obtenidos para concluir en cual se tuvo una ganancia de energía mayor, si la diferencia de temperatura es muy grande, etcétera.

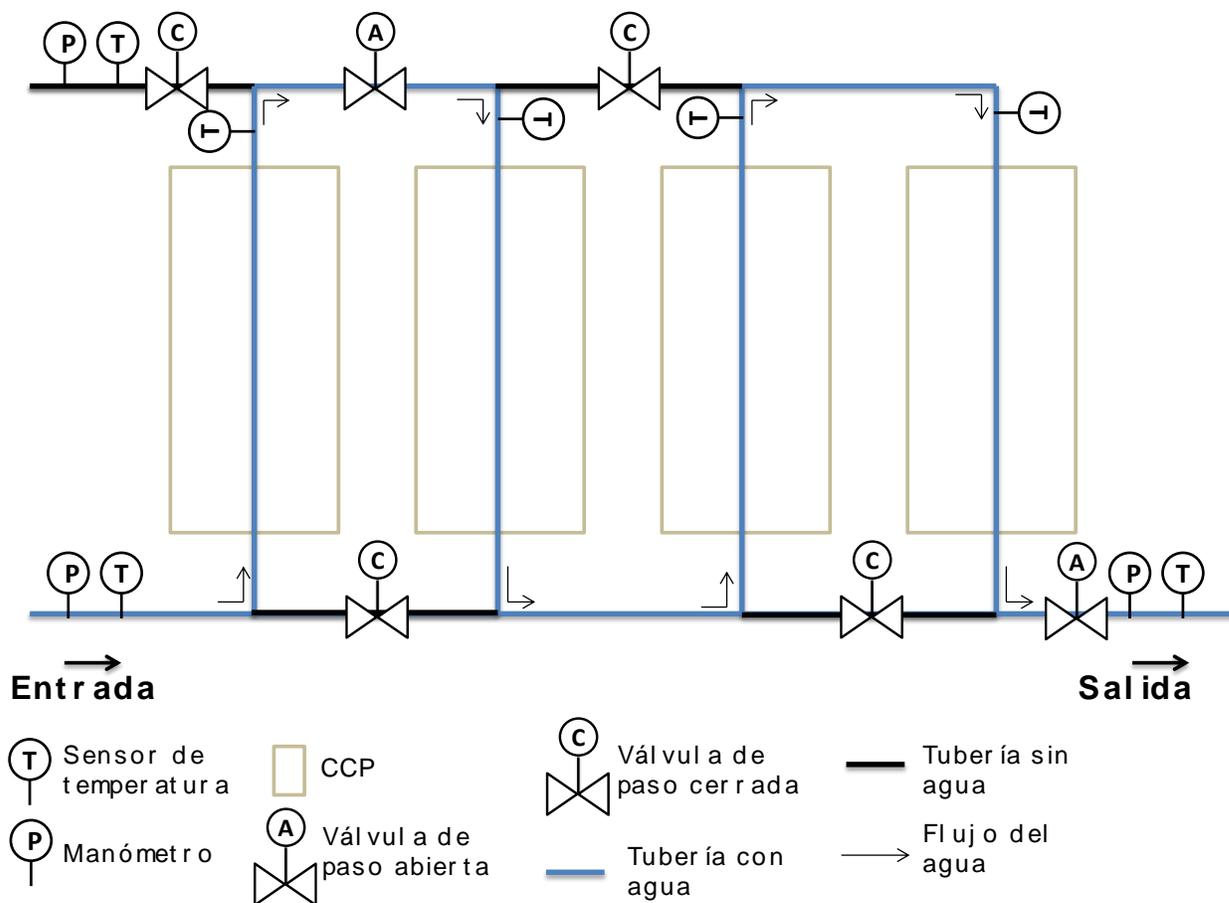


Figura 23. Flujo en serie.

Por último en la **Figura 24**, se tiene la opción de evaluar solo un concentrador del arreglo y hacer comparaciones entre los resultados obtenidos de las dos configuraciones previas y ésta. De esta manera se podría comprobar si la ganancia de energía para el arreglo es proporcional a la ganancia de energía para un solo CCP.

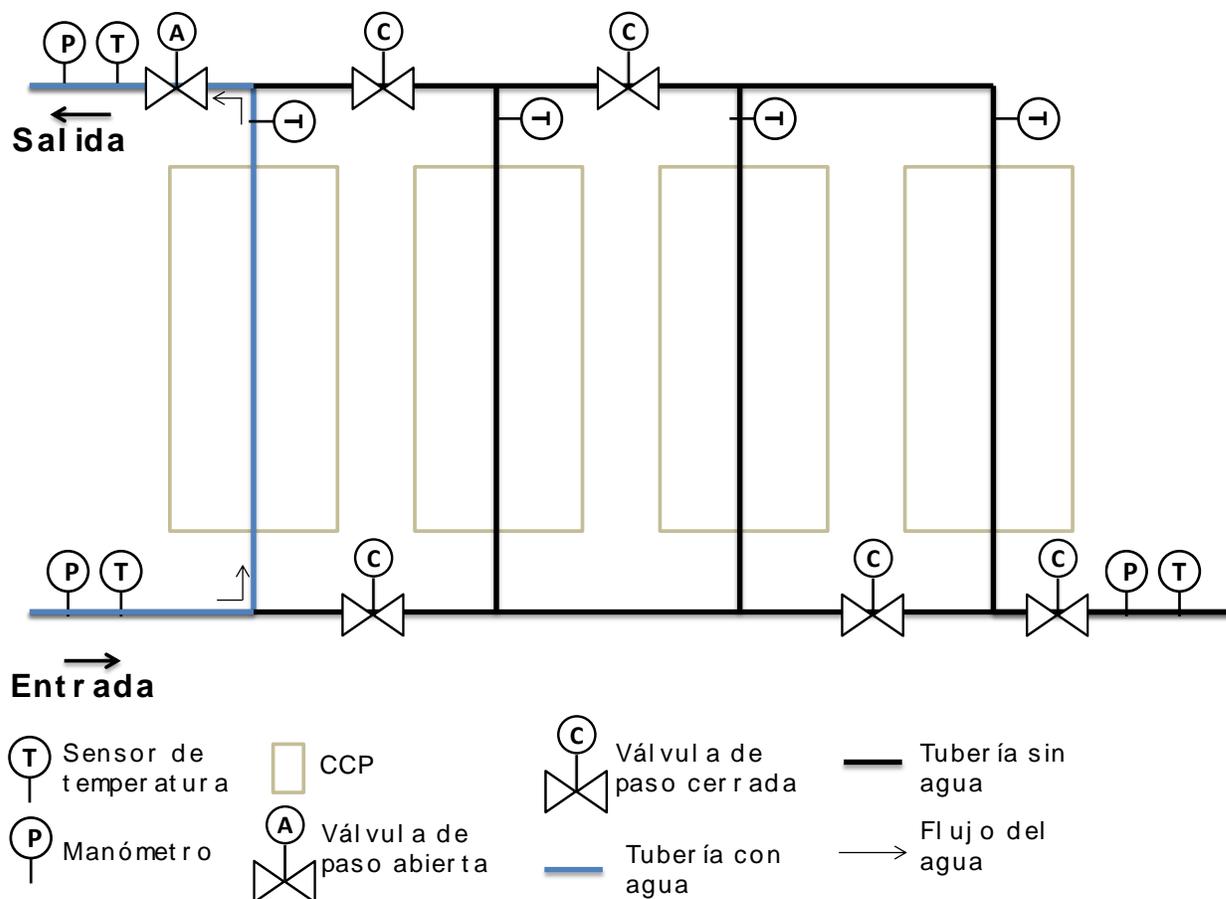


Figura 24. Flujo en un CCP.

3.4. Construcción del arreglo de CCP.

Con el diseño completado, se procedió a la construcción de los cuatro CCP, así como la estructura que los soportará, la cual como se mencionó previamente en este capítulo, tendrá la inclinación igual a la latitud de la ciudad de Mérida.

En la **Figura 25**, se muestra la construcción de un CCP de acuerdo al diseño previo; todo el material es de aluminio para garantizar una vida útil mayor, así como la reducción del peso, lo que facilita al sistema de seguimiento.



Figura 25. Construcción de un colector de canal parabólico, sin la superficie reflectante.

La estructura fabricada, tuvo un ángulo de inclinación de 20.8° , muy cercano a la latitud de Mérida, que es de 21° . Fue hecha con perfiles tubulares rectangulares de 2 pulgadas x 2 pulgadas, se le agregaron 4 ruedas para facilitar su movimiento en el área de trabajo. En la **Figura 26** se aprecia los cuatro CCP colocados en la estructura.



Figura 26. Arreglo de Colectores de Canal Parabólico, sin la superficie reflectante, tubos receptores, sensores y sistema de seguimiento.

Las láminas de aluminio, de la marca Alanod Solar, que se usaron como concentrador, tienen una reflectancia de 90%. Para instalarlas en cada CCP se tuvo que usar cinta doble cara y silicón blanco, ambos para metales, para asegurar que tengan una correcta sujeción a las costillas y formen la parábola que se dimensionó. Si se cometía un error grave en la colocación de las láminas, se podría aumentar el valor del error no aleatorio, lo que afectaría a la eficiencia óptica del sistema. Un punto del concentrador que no esté correctamente sujetado a la costilla, podría ocasionar que

los errores aleatorios por pendiente ($\sigma_{pendiente}^2$) y de lámina ($\sigma_{lámina}^2$) se eleven, lo que aumentaría el error aleatorio (σ_a), mostrado en la **Ec. 2.17**, disminuyendo también la eficiencia óptica de cada CCP y por consiguiente la ganancia de energía útil. Como se aprecia en la **Figura 27** las láminas no presentan ninguna deformación que pueda provocar una afectación significativa a la evaluación del arreglo.



Figura 27. Arreglo de CCP

En esa misma figura se observa que ya se colocaron las mangueras que unen los colectores entre sí. Las usadas tienen un recubrimiento de caucho para uso automotriz, lo que reduce las pérdidas por fenómeno de convección en hasta un 75 %³ de acuerdo con la ficha técnica de la manguera.

Los sensores de temperatura usados para el arreglo fueron unos termopares tipo k; se eligieron debido a la familiarización que se tiene con dichos sensores y principalmente por la tarjeta de adquisición de datos que se tenía disponible para el proyecto, la cual aceptaba, en su mayoría, equipos de medición que tengan salida analógica.

3.5. Sistema de seguimiento.

El sistema de seguimiento empleado para este arreglo se compone de un motor trifásico de 220 Volts acoplado a un mecanismo de reducción de revoluciones por minuto o caja reductora.

³ Este dato fue calculado a partir del tipo de material usado.

Para que los cuatro CCP se muevan al mismo tiempo, la misma inclinación, se mandaron a fabricar cuatro cajas reductoras que se unirán a cada CCP para garantizar dicho movimiento. La primera se unía a la caja reductora principal que iba acoplada al motor trifásico. La unión entre las cuatro cajas de cada CCP se dio mediante un tubo laminado en frío (cold rolled) de acero inoxidable que se ensamblaban a cada caja y a cada colector mediante una unión flexible. En la **Figura 28** se puede ver el acoplamiento al primer CCP con los equipos mencionados



Figura 28. Sistema de seguimiento para el arreglo de colectores de canal parabólico.

3.6. Tanques de almacenamiento y sistema de adquisición de datos.

Acoplado al arreglo de Colectores de Canal Parabólico se tenían 2 tanques con capacidad de 300 Litros cada uno, 2 bombas centrífugas de 1 HP con propela de acero inoxidable para que resista temperaturas arriba de los 40 °C, así como la tubería de cobre para agua que componía el circuito hidráulico. Los tanques cuentan con un revestimiento interno de poliuretano para crear un sistema adiabático, cuentan con una serie de acoplamientos para introducir los sensores de temperatura a usar, además de las conexiones para colocar la tubería para llenado y vaciado de los tanques. Esto se muestra en la **Figura 29**. En la misma figura, en la parte central se aprecia el gabinete que contiene todo el tablero de control para los equipos que se tienen en el sistema, así como la tarjeta de adquisición de datos que contiene la entrada de todos los

sensores colocados en el arreglo de colectores y los tanques. De igual manera, se aprecia el flujómetro usado para medir el caudal que pasa hacia los colectores. A este gabinete se le puede conectar una computadora para monitorear los datos en tiempo real.



Figura 29. Tanques de almacenamiento con gabinete para sistema de adquisición de datos.

En la **Figura 30** se observa el esquema de trabajo que se creó en el software Labview para los sensores de temperatura tipo k.

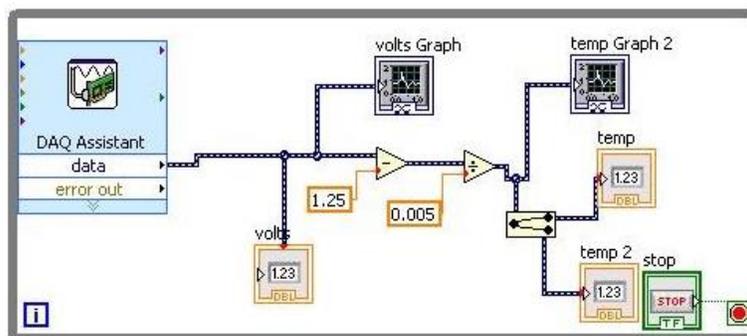


Figura 30. Diagrama en Labview para monitoreo de la temperatura del fluido de trabajo.

Lo que se aprecia en la **Figura 31**, es el esquema de trabajo que se creó en el software Labview para el medidor de caudal acoplado al sistema. Esto con la finalidad de poder garantizar el caudal deseado para las pruebas a realizar.

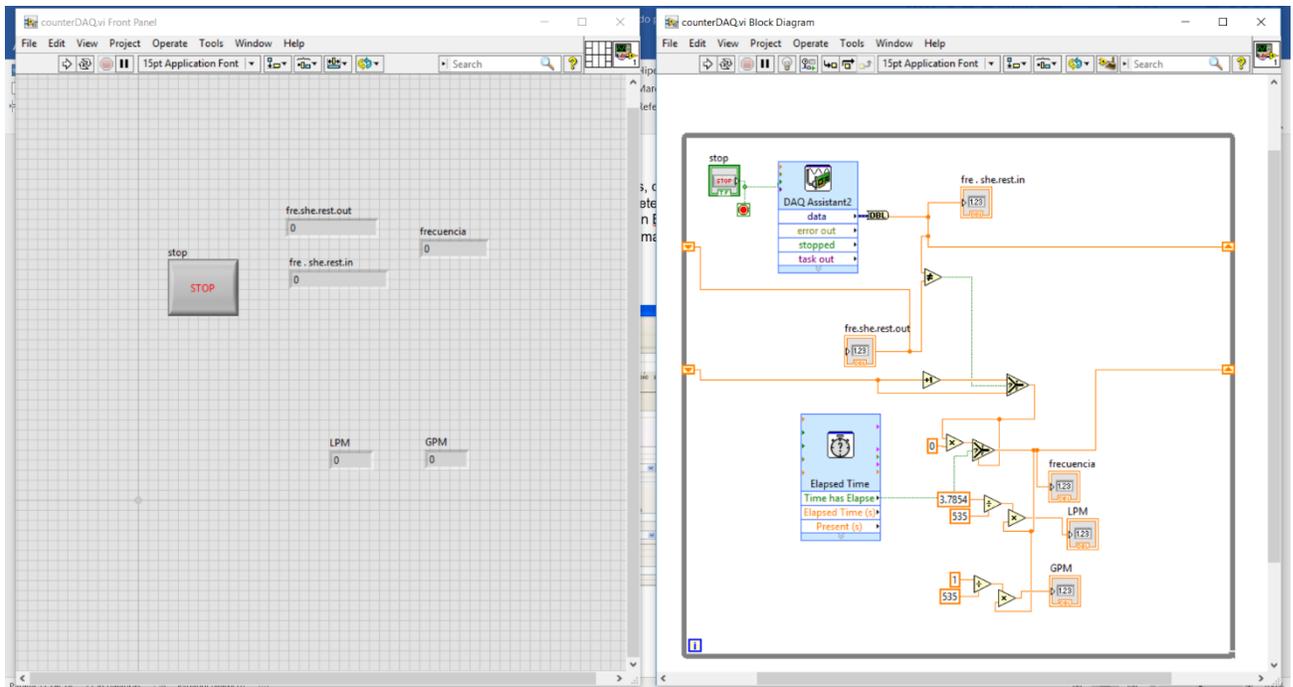


Figura 31. Diagrama en Labview para monitoreo del medidor de flujo.

Capítulo 4. Evaluación experimental del arreglo de CCP.

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de la evaluación experimental realizada al arreglo de Colectores de Canal Parabólico (CCP) construidos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Para comprender de manera más sencilla el desempeño de un CCP y del arreglo de CCP, los resultados se representan en términos de la ganancia de energía útil (Q_u). De esta manera se puede observar y entender la cantidad de energía que él y los concentradores están aprovechando en forma de energía térmica.

4.1 Consideraciones durante la evaluación.

Para realizar la evaluación, se necesitaba tener una serie de puntos a considerar para proceder con el trabajo y garantizar que los resultados sean los adecuados. A continuación, se presenta una descripción de estos puntos.

- Se trabajó con un caudal igual a 2.5 L/min, tal y como lo marca la norma “Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors” (ANSI/ASHRAE, 1991).
- El sistema contenía un aproximado de 150 litros para la evaluación.
- El sistema de seguimiento fue dimensionado para 4 horas, por lo que la evaluación se realizó a las 10 a.m. a 2 p.m. en la ciudad de Mérida durante los días de marzo y abril, debido a que estos eran los meses en que se tiene mayor irradiación en el año.
- El arreglo de Colectores de Canal Parabólico (CCP) contaba con una inclinación igual a la latitud de la ciudad de Mérida (21°), en donde se encuentra la Facultad de ingeniería de la UADY (FIUADY); con esto se garantiza una incidencia de los fotones más cercana a la normal con respecto al área de apertura de los CCP, por lo que la irradiancia directa tendría mayor participación.

4.2 Resultados basados en la ganancia de energía útil.

En esta sección se presentan los resultados para las evaluaciones realizadas en la FIUADY para el arreglo de CCP. Normalmente se presentan los resultados en función de la eficiencia térmica (η); en este trabajo de tesis, la ganancia de energía útil (Q_u) será el eje central para interpretar los resultados que se obtuvieron.

La ganancia de energía útil es la energía que el CCP agregará al fluido de trabajo a manera de temperatura para usar esa energía térmica en forma de calor para un posible proceso industrial. De la **Ec. 2.33** se puede confirmar que usar Q_u aporta la misma información que basarlo en la eficiencia.

El área de apertura que tiene cada CCP es de 2.02 m², por lo tanto, para que los resultados a presentar estén bajo un mismo criterio, la ganancia de energía útil para el arreglo de cuatro CCP se presenta para una unidad de área de apertura, es decir, 2.02 m². Este proceso de normalización también se realizó para que el resultado gráfico fuera con menos separación entre la evaluación de un solo CCP y el arreglo de cuatro CCP.

Se presentarán los resultados de acuerdo a 6 variables a considerar en cualquier colector solar: Irradiancia (G_b), Temperatura ambiente (T_a), Velocidad del viento (V_v), Diferencia de temperatura de entrada y de salida del fluido (ΔT), Temperatura de entrada del fluido (T_{ent}) y Temperatura de salida del fluido (T_{sal}). Al realizarlo de esta manera se puede dar más y mejores conclusiones para determinar que variable puede maximizar o perjudicar el desempeño térmico de uno o el arreglo de CCP.

4.2.1. Efecto de la irradiancia sobre la ganancia de energía útil.

En la **Figura 32**, se muestra el comportamiento del efecto que la irradiancia presentó en la ganancia de energía útil para cada configuración evaluada. La primera división marcada que se tiene para esta gráfica se da en que, las tres curvas superiores son relacionadas con las configuraciones que usaron el sistema de seguimiento propuesto, mientras que las tres curvas inferiores son las que se evaluaron de manera estática. De la **Ec. 2.31** podemos entender la razón por la cual las curvas mostradas son líneas rectas, el término de irradiancia directa es directamente proporcional a la

ganancia de energía útil y teniendo en cuenta que todas las variables en esa ecuación son lineales, el comportamiento tendría que ser de esa manera. A los $1,000 \text{ W/m}^2$ el valor obtenido de Q_u para un CCP evaluado de manera estática alcanza los 500 W aproximadamente, mientras que, para esa misma irradiancia, el mismo CCP con sistema de seguimiento llega a las 675 W , es decir 25.9% mayor energía aprovechada. En el caso de la evaluación del arreglo en paralelo con el sistema de seguimiento, tuvo 22.8% más de energía ganada en comparación con la misma configuración estática. Para la configuración en serie con sistema de seguimiento, la ganancia de energía útil fue 27% mayor es comparación con el arreglo en serie estático.

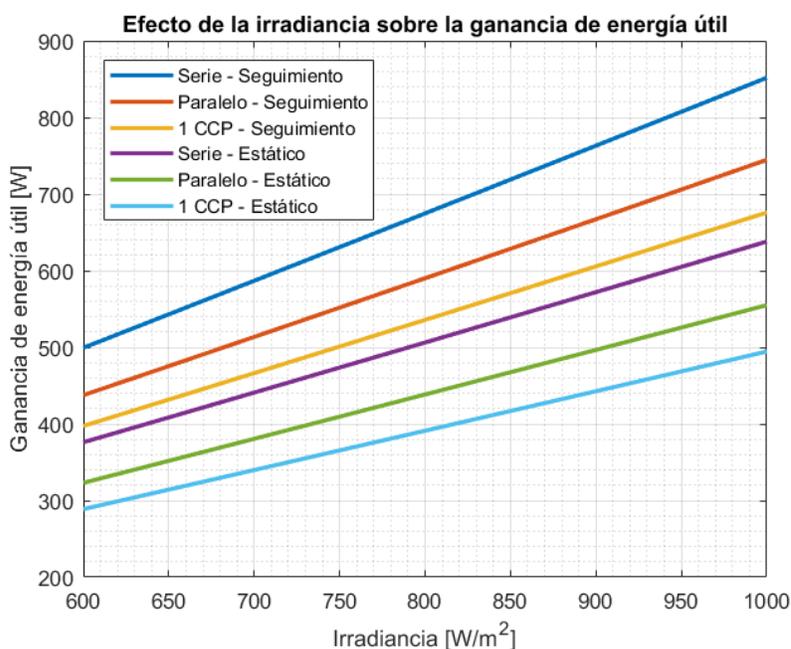


Figura 32. Efecto de la irradiancia en la ganancia de energía útil.

4.2.2. Efecto de la temperatura ambiente sobre la ganancia de energía útil.

En la **Figura 33**, se muestran las curvas obtenidas de las 6 configuraciones evaluadas en este trabajo con base en la temperatura ambiente que se tuvo durante cada evaluación; de igual manera el orden se mantuvo, las tres curvas superiores son las que usaron sistema de seguimiento, contrario a las tres curvas inferiores. La temperatura ambiente tiene participación en la **Ec. 2.31** directamente con la ganancia

de energía útil, por lo que, al igual que la irradiancia, el comportamiento es lineal. Sin embargo, a comparación de la variable anterior, para cada evaluación se presentaron rangos de temperatura ambiente similares, más no iguales. Esto no imposibilita su comparación, pues los valores de las temperaturas presentadas no son dispersas.

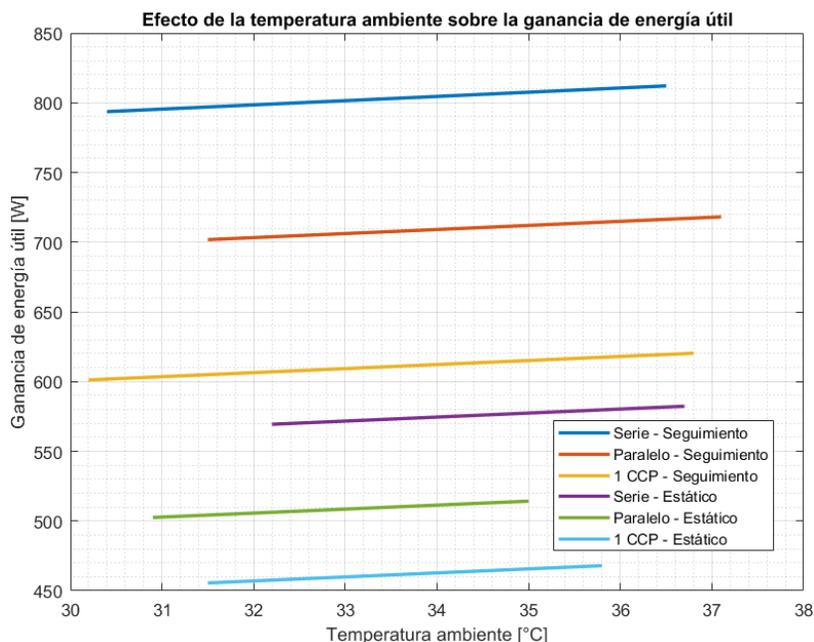


Figura 33. Efecto de la temperatura ambiente en la ganancia de energía útil.

Al ser mayor la temperatura ambiente, se reduce el valor de diferencia entre la temperatura de entrada y la ambiente de la **Ec. 2.31**, y como este término está contemplado para las pérdidas, a menor valor de diferencia, mayor será la ganancia de energía útil. Esto explica porque la pendiente es positiva para todas las curvas presentadas. Como se aprecia en la figura, para la evaluación estática la separación entre cada curva es menor en comparación con la evaluación que incluye el sistema de seguimiento. Esto se debe a que no solo se toma en cuenta el valor de la temperatura ambiente, debido a que hay una correlación alta entre la irradiancia y dicha variable, al contemplar los valores de irradiancia presentados anteriormente es lógico que los valores de ganancia de energía útil para las configuraciones que usaron sistema de seguimiento aumente, pues la irradiancia directa tiene mayor participación en comparación de un sistema estático.

4.2.3. Efecto de la velocidad del viento sobre la ganancia de energía útil.

Para la **Figura 34** se muestra el efecto que tiene la velocidad del viento en la ganancia de energía útil. Aquí el comportamiento ya no es lineal y se debe a que a partir de la **Ec. 2.19** a la **Ec. 2.22** se contempla la velocidad del viento para calcular el valor del coeficiente de pérdidas para transferencia de calor por convección. En estas ecuaciones se tiene el número de Reynolds, que es en donde participa la velocidad del viento, elevado a una potencia de acuerdo al tipo de flujo que presente, laminar o turbulento.

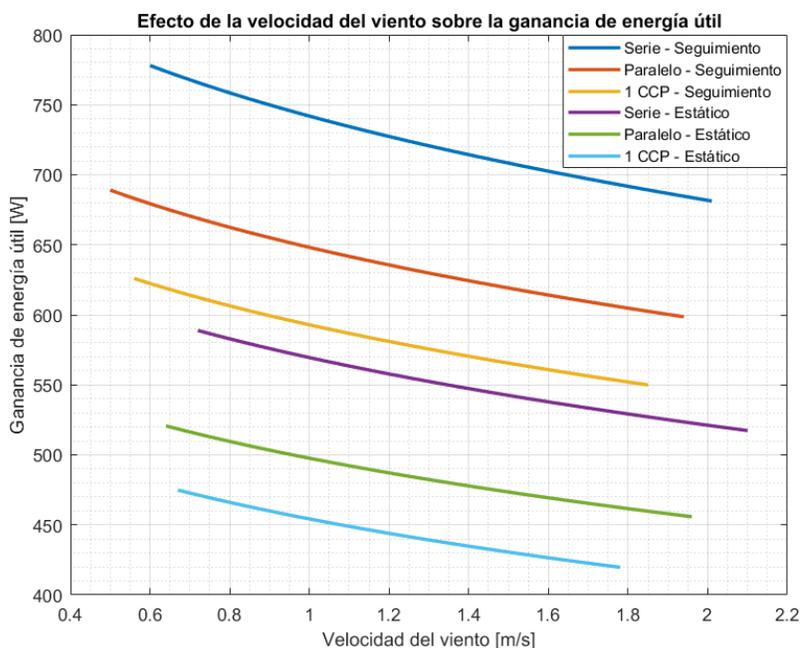


Figura 34. Efecto de la velocidad del viento en la ganancia de energía útil.

Se puede observar que la pendiente es negativa, por lo tanto, a mayor velocidad del viento, mayor será la merma en los vatios de energía útil que se agregan al fluido de trabajo. Como se puede apreciar, la separación entre las curvas con y sin seguimiento son muy parecidas; esto se debe a que la afectación negativa del viento perjudica directamente al coeficiente global de pérdidas que se muestra en la **Ec. 2.19** y que está presente en la **Ec. 2.31**, de la ganancia de energía útil. El efecto que tiene la

velocidad del viento toma mayor sentido al recordar que el tubo receptor se encuentra desnudo, por lo que las pérdidas son mayores.

4.2.4. Efecto de la diferencia de temperatura entrada y la temperatura de salida del fluido sobre la ganancia de energía útil.

Para entender cómo afecta esta diferencia de temperatura del fluido de trabajo, entrada menos salida, tenemos que tener en cuenta que el valor de la Q_u de la **Ec. 2.31** se puede usar para la representación de ganancia de energía útil:

$$Q_u = mC_p\Delta T$$

Ec. 4.1

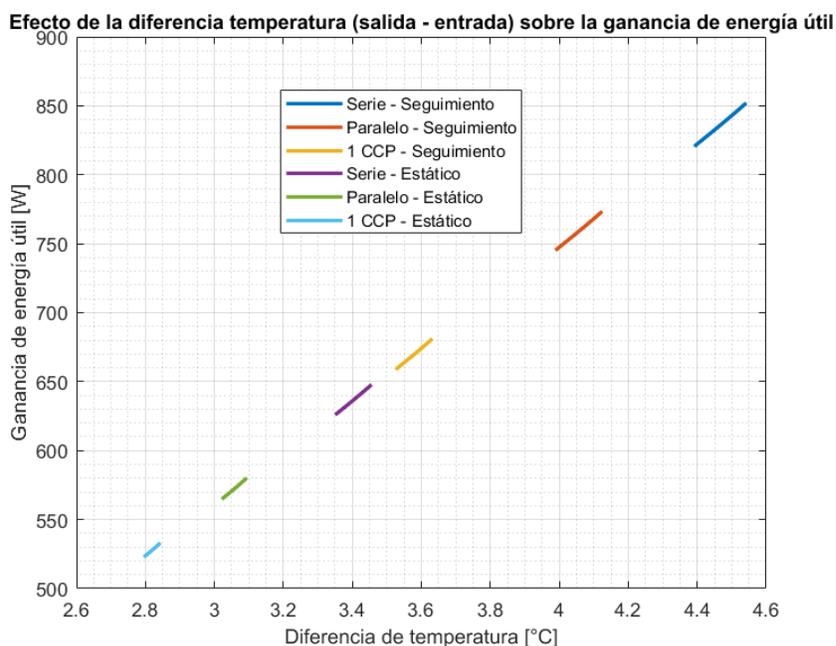


Figura 35. Efecto de la diferencia de temperatura entrada y la temperatura de salida del fluido en la ganancia de energía útil.

De la ecuación anterior podemos ver que a mayor sea la ΔT , mayor será el valor de Q_u y al ser directamente proporcional, el comportamiento es lineal.

Aquí se aprecia claramente el efecto que se tienen para las diferentes configuraciones, y si se contempla el sistema de seguimiento, se nota el efecto positivo que este causa. Para un CCP estático, el rango de la diferencia de temperatura es $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ menor en comparación con el que cuenta con seguimiento.

Para apreciar el efecto que causa el arreglo de CCP, al comparar el arreglo en serie con seguimiento contra el estático, se puede observar que el rango de ΔT que se tiene es casi 1 °C mayor. Puede parecer poco, pero al entender que se le esta agregando al menos 1 grado centígrado más a un volumen de 150 litros de agua solo por agregar el sistema de seguimiento a un arreglo de cuatro colectores, la energía es bastante considerable. La ventaja de usar el arreglo en serie, se da en que cada CCP agrega su ganancia de energía útil al pasar al siguiente CCP y así sucesivamente hasta completar el circuito hidráulico, en comparación con el arreglo en paralelo.

4.2.5. Efecto de la temperatura de entrada del fluido sobre la ganancia de energía útil.

En la **Figura 36**, se muestran las curvas obtenidas de las 6 configuraciones evaluadas en este trabajo con base en la temperatura de entrada que se tuvo durante cada evaluación; de igual manera el orden anterior se mantuvo, las tres curvas superiores son las que contaban con el sistema de seguimiento, caso contrario a las tres curvas inferiores que son resultado de las evaluaciones en posición estática.

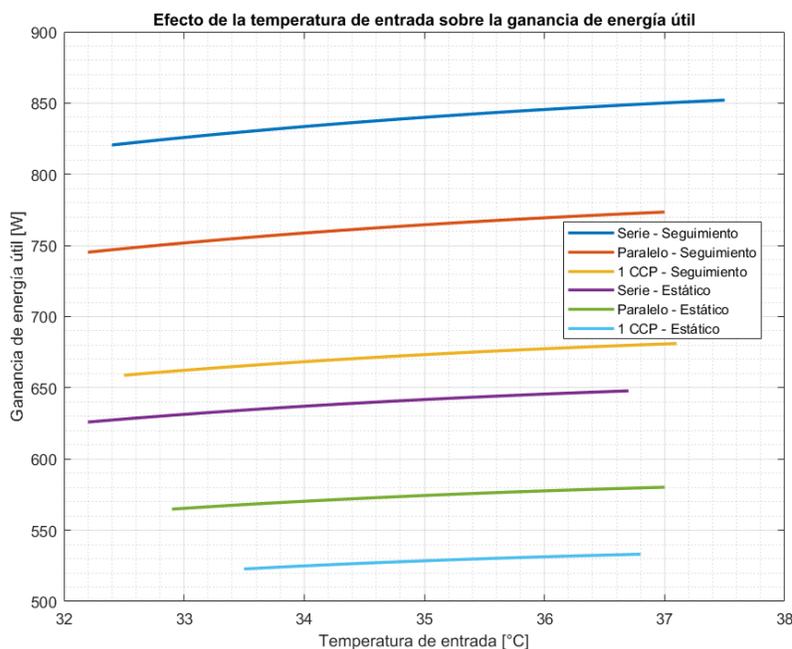


Figura 36. Efecto de la temperatura de entrada del fluido en la ganancia de energía útil.

Al ser mayor la temperatura de entrada, se reduce el valor de diferencia entre la temperatura de entrada y la ambiente de la **Ec. 2.31**, y como este término está contemplado para las pérdidas por transferencia de calor, a menor valor de diferencia, mayor será la ganancia de energía útil. Esto explica porque la pendiente es positiva para todas las curvas presentadas. Claro que al igual que para la temperatura ambiente, se contempla el valor de la irradiancia que se midió para cada evaluación.

Aquí la separación entre cada curva no es igual para las que tienen seguimiento y las que no. Esto se debe a que en comparación con la temperatura ambiente, el rango de temperatura de entrada es más amplio para cada configuración.

4.2.6. Efecto de la temperatura de salida del fluido en la ganancia de energía útil.

Para la temperatura de salida se debe tener en cuenta la **Ec. 4.2**, pues en esta es la que se presenta dicha variable del arreglo. Como era de esperarse, a mayor valor de temperatura de salida, la ganancia de energía útil aumenta. El comportamiento que se muestra en la **Figura 37** es similar al que se tiene para la temperatura de entrada debido a que la evaluación se realizó, para cada configuración, con condiciones operacionales y ambientales similares a las otras.

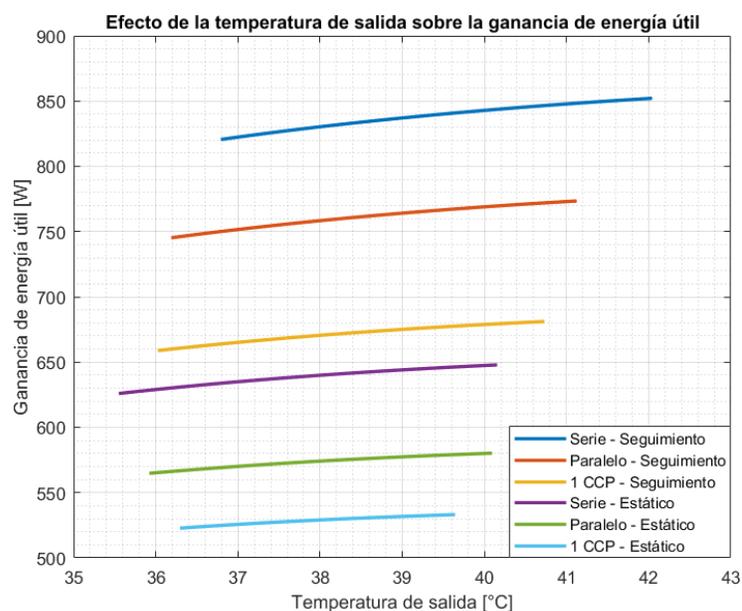


Figura 37. Efecto de la temperatura de salida del fluido en la ganancia de energía útil.

De esta gráfica se puede apreciar que el arreglo en serie con seguimiento alcanza una temperatura de 42 °C, lo que representa un 4.2% más que dicha configuración estática. En paralelo con seguimiento es un 2.5 % que el estático, mientras que un solo CCP con seguimiento es un 2.7% mayor al estático.

4.3 Análisis de sensibilidad.

En este apartado se tratarán los valores de las pendientes de las curvas presentadas en las gráficas anteriores con el objetivo de poder identificar las variables que tengan una mayor afectación, ya sea positiva o negativa, sobre la ganancia de energía útil.

Tabla 4. Tabla representativa para las pendientes que tienen las diferentes variables consideradas en la evaluación sobre la ganancia de energía útil.

Variables		Pendiente de la ganancia de energía útil respecto a variables					
		Estático			Con seguimiento		
		1 CCP	Paralelo	Serie	1 CCP	Paralelo	Serie
Ambientales	Irradiancia	50.26	56.54	63.72	67.69	74.49	86.31
	Temperatura ambiente	2.89	2.85	2.87	2.89	2.92	3.03
	Velocidad del viento	-48.91	-48.11	-50.79	-57.59	-61.07	-67.03
Operacionales	$\Delta T(T_{sal} - T_{ent})$	21.55	21.23	20.83	20.97	20.80	20.92
	Temperatura de entrada	3.11	3.72	4.82	4.79	5.82	6.11
	Temperatura de salida	3.06	3.66	4.71	4.69	5.66	5.94

En la **Tabla 4** se muestran los valores que se obtuvieron de las pendientes de cada curva para las variables en cuestión; con esto, se puede entender que variable tiene una mayor afectación sobre la ganancia de energía útil.

Como era de esperarse, la irradiancia es la variable ambiental que tiene mayor impacto en la Q_u , pues sin ésta no podría haber conversión a energía térmica. En comparación con las demás configuraciones, el arreglo en serie con sistema de seguimiento presenta una mayor pendiente y el motivo se debe a la energía que provee cada CCP.

Al tener el receptor descubierto, la velocidad del viento causa un impacto negativo significativo en comparación con las otras 5 variables, pues el fenómeno de transferencia de calor por convección se magnifica y hace que el coeficiente global de pérdidas crezca. De manera similar al de todas las variables en cuestión, el arreglo en serie es el que tiene la pendiente con mayor valor, en este caso negativo.

La temperatura ambiente es la que menor impacto tiene pues está relacionada con la irradiancia que se tenga en la zona.

En el caso de las variables operacionales, la ΔT es la que presenta un aumento mayor positivo sobre la ganancia de energía útil. Esto tiene que ver con que la diferencia de temperatura es lo que provoca en sí la Q_u , pues al alcanzar una mayor temperatura de salida con una menor temperatura de entrada, representa que el sistema es capaz de concentrar de manera más eficiente la irradiancia directa en el receptor y por consecuencia su capacidad de extraer calor del fluido se incrementa.

Las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo tienen una participación similar en la ganancia de energía útil, pues numéricamente, en las ecuaciones su participación es igual. Para entender de mejor manera como puede participar en la Q_u es mejor su representación a manera de su diferencia, salida menos entrada.

4.4 Comparación de eficiencias térmicas.

A continuación, se presenta las eficiencias térmicas que se obtuvieron para las 6 configuraciones evaluadas en este trabajo

Tabla 5. Resumen de valores obtenidos para cada configuración evaluada.

		Configuraciones del arreglo de CCP					
		Estático			Con seguimiento		
		1 CCP	Paralelo	Serie	1 CCP	Paralelo	Serie
Temperatura ambiente	Menor [°C]	31.51	30.87	32.22	30.19	31.48	30.41
	Mayor [°C]	35.79	35.04	36.68	36.81	37.13	36.52
	Promedio [°C]	33.65	32.96	34.45	33.50	34.31	33.47

Temperatura de entrada	Menor [°C]	33.51	32.90	32.17	32.48	32.22	32.39
	Mayor [°C]	36.79	37.02	36.70	37.12	37.03	37.51
	Promedio [°C]	35.15	34.96	34.44	34.80	34.63	34.95
Temperatura de salida	Menor [°C]	36.29	35.92	35.55	36.02	36.18	36.79
	Mayor [°C]	39.64	40.09	40.12	40.73	41.12	42.03
	Promedio [°C]	37.97	38.01	37.84	38.38	38.65	39.41
ΔT	Menor [°C]	2.79	3.02	3.35	3.52	3.86	4.38
	Mayor [°C]	2.84	3.09	3.45	3.63	4.15	4.55
	Promedio [°C]	2.82	3.06	3.40	3.58	4.01	4.47
Capacidad térmica	Menor	63.57	63.21	62.82	62.55	62.14	59.46
	Mayor	65.36	65.12	64.88	64.69	64.42	61.17
	Promedio	64.46	64.15	63.83	63.60	63.27	60.31
Eficiencia térmica	Menor [%]	24.67%	26.83%	30.15%	32.09%	35.02%	39.45%
	Mayor [%]	25.15%	27.56%	31.21%	33.18%	36.35%	40.97%
	Promedio [%]	24.91%	27.20%	30.68%	32.64%	35.69%	40.21%

El valor que más puede interesar de la **Tabla 5**, es la temperatura máxima de salida para cada configuración, y en especial la del arreglo en serie con sistema de seguimiento.

Este valor es de 42 °C teniendo una temperatura de entrada mínima de hasta 32.9 °C lo que puede dar una diferencia de hasta 9.1 °C. Sin embargo, el valor que debe tomarse en cuenta es el de la ΔT promedio que es 4.47 °C.

El factor de flujo del colector se calcula con las **Ec. 2.29** y **Ec. 2.32**, lo cual representa lo que se le puede extraer al fluido de trabajo dependiendo de las pérdidas que se tengan en todo el receptor, contemplando las del propio fluido, representado en forma de ecuación:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad \text{Ec. 4.2}$$

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, el factor de flujo está en función de un término adimensional en específico que se conoce como la capacitancia térmica del colector, en este caso, un CCP. Este término se refiere a la capacidad que tiene el fluido de retener la energía térmica que se ganó en el CCP.

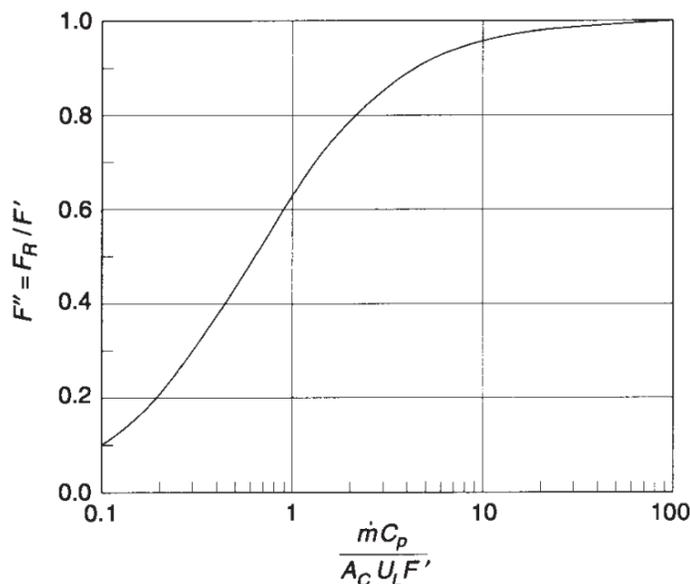


Figura 38. Comportamiento del factor de flujo de acuerdo al valor de la capacitancia térmica (Duffie & Beckman, 2006).

Como se aprecia en la **Tabla 5**, la capacitancia térmica que se tiene en promedio es de 63.27. Dado este valor, en la **Figura 38**, **Figura 38**. Comportamiento del factor de flujo de acuerdo al valor de la capacitancia térmica .se aprecia que el valor que debe presentarse a esa capacitancia térmica es cercano a 100 y de acuerdo a la evaluación experimental, el valor obtenido fue de 99.31.

En la eficiencia obtenida para cada configuración se tiene el mayor resultado para el arreglo en serie con sistema de seguimiento, como era de esperarse, con un valor promedio de 40.21%. Para comprender este valor, si lo comparamos con las otras configuraciones se tiene lo siguiente: en comparación con el arreglo en paralelo con seguimiento es 11.25% mayor; en comparación con el CCP que cuenta con

seguimiento es 18.84% mayor; en comparación con el arreglo en serie evaluado de manera estática es 23.7% mayor; en comparación con el arreglo en paralelo estático es 32.37% mayor; en comparación con el CCP evaluado estáticamente es 38.05% mayor.

Capítulo 5. Propuesta de aplicación en una industria textil.

Según datos de la Secretaría de Fomento Económico del Estado, en el 2013, el sector industrial fue el segundo con mayor participación en el Producto Interno Bruto estatal con un 15.11%. El sector industrial manufacturero aportó, en el 2013, el 60.83% de la producción bruta, del cual, la industria dedicada a la fabricación de prendas de vestir representó el 6.93%, ocupando el segundo lugar detrás de la industria alimenticia (SEFOE, 2015).

Debido a estos datos, se investigaron los parámetros operativos de una industria que fabrique prendas de vestir en el Estado de Yucatán.

5.1. Datos de la industria que fabrica prendas de vestir.

La industria propuesta para realizar colocar una planta de Colectores de Canal Parabólico (CCP) se ubica en el interior del Estado de Yucatán y se dedica a fabricar una gran variedad de prendas de vestir. Entre esas, se encuentran los pantalones de mezclilla, que será específicamente cuyo proceso industrial de fabricación que se querrá proponer trabajar con los CCP.

5.1.1. Proceso Industrial en el cual se propondrá la planta de colectores de canal parabólico.

Para la fabricación de dicha prenda, se requiere calentar un volumen de 1,200 litros de agua a una temperatura de 75 °C para incluir ese calor al proceso industrial conocido como blanqueo o teñido de la tela; este proceso se encuentra en la **Tabla 1**, con un rango de temperatura que va de los 60 a los 90 °C. Para alcanzar esta temperatura en el fluido de trabajo, se requiere una caldera en la que se caliente el agua a dicha temperatura mediante el uso de un combustible derivado de hidrocarburos.⁴

⁴ Estos datos fueron obtenidos mediante la entrevista con uno de los socios de dicha la e41 ¿mpresa que fabrica las prendas, por eso la razón en que no se tienen especificaciones con mayor detalle.

5.1.2. Gasto anual en combustible para el proceso industrial.

Para calentar dicho volumen de agua a la temperatura indicada se necesitan aproximadamente 400,000 litros de gas licuado a presión (LP)⁵. Para estimar el costo anual que se tendría en este combustible fósil, se tendría que convertir a unidad de kilogramos, ya que de esa manera se realiza la compra del gas LP.

Cada kilogramo de dicho gas representa 1.92 litros del mismo, bajo esta relación, el total de kilogramos necesitados al año es:

$$\text{Consumo de gas LP anual en kg} = \frac{400,000 \text{ litros}}{1.92 \frac{\text{litros}}{\text{kg}}} = 208,333.33 \text{ kg}$$

Para este año, el gas LP estuvo por arriba de los \$17.00/kg; sin embargo, se considerará este precio para el análisis posterior. Considerando esto, se tiene un escenario más desfavorable, ya que, a un menor precio del combustible fósil, mayor sería el tiempo de retorno de inversión.

5.2. Dimensionamiento de planta de colectores de canal parabólico.

El tamaño de una matriz de colectores depende del costo, del porcentaje de la carga térmica que debe cubrir el sistema solar y del área de techo o suelo disponible. El último parámetro puede determinarse fácilmente debido a que depende del dimensionamiento. El primero; sin embargo, necesita cálculos detallados, que tengan en cuenta la radiación disponible, las características de rendimiento de los colectores elegidos y otros parámetros menos importantes (Kalogirou, 2009).

Para el caso de este trabajo, los cálculos para obtener el rendimiento y desempeño del arreglo de CCP se presentaron en el capítulo anterior. En específico, el desempeño se refiere a la ganancia de energía útil que se tienen para el arreglo evaluado.

⁵ Estos datos fueron obtenidos mediante la entrevista con uno de los socios de dicha la empresa que fabrica las prendas, por eso la razón en que no se tienen especificaciones con mayor detalle.

El aspecto del costo se tratará en un apartado más adelante, en cuanto al área disponible para instalación, al no tener planos de la empresa para la cual se propondrá la planta de CCP, se obviarán que cuentan con dicha superficie.

Para empezar el dimensionamiento, se debe tener en cuenta que se usaron los resultados obtenidos para el arreglo de CCP en serie con sistema de seguimiento, debido a que fue el que presentó una mayor ganancia de energía útil por área de colector.

De la **Ec. 4.1** se basó la cantidad de CCP que se usó para el proceso industrial en cuestión. La Q_u que se obtuvo para el arreglo en serie fue de 833.95 W. De la ecuación mencionada tenemos la variable de masa, que para efecto de cuantificar la ganancia de energía útil que se obtuvo de manera puntual, en este caso por segundo, se tomará el flujo másico:

$$\dot{m} = 2.5 \frac{L}{min} \frac{1 min}{60 s} = \frac{1 L}{24 s}$$

Para efecto de la evaluación se consideró $\frac{1}{24}$ L. El caudal de 2.5 L/min fue dado para 150 litros, lo requerido fue 1,200 litros a la temperatura de 75 °C. Por lo tanto, se garantizó que la participación de los colectores representa el 1/8 de la necesidad térmica que se tuvo para dicha industria.

De la **Tabla 5** podemos tomar el dato de la temperatura de entrada que se tuvo en la evaluación. Este dato sirvió para calcular la diferencia de temperatura de entrada y la temperatura de salida requerida por el proceso industrial, por lo tanto:

$$\Delta T_{requerida} = T_{requerida} - T_{entrada} = 348.15 K - 305.15 K = 43 K$$

Con este dato, podemos calcular la ganancia útil de energía que se necesita para el blanqueo/teñido de los pantalones de mezclilla:

$$Q_{u_{requerida}} = \dot{m} C_{p_{agua}} \Delta T_{requerida} = \frac{1}{24} L \times 4,186 \frac{J}{kg K} \times 43 K = 7,499.91 W$$

En comparación con Q_u de la evaluación, se tiene la siguiente relación:

$$\text{Relación} = \frac{Q_{u\text{requerida}}}{Q_u} = \frac{7,499.91 \text{ W}}{833.95 \text{ W}} = 8.9932 \approx 9$$

Para que se conserve esta relación, se tuvo que instalar un arreglo de CCP similar al que se evaluó, es decir, que se tenga la misma área de apertura, área de receptor con las mismas características y, por lo tanto, las pérdidas globales. El arreglo evaluado contenía 4 CCP, entonces, con la relación calculada, el número de CCP requeridos para abarcar 1/8 de la necesidad térmica de la industria sería:

$$\text{Número de CCP requeridos} = \text{Número de CCP evaluados} \times \text{Relación}$$

$$\text{Número de CCP requeridos} = 4 \text{ CCP} \times 9 = 36 \text{ CCP}$$

5.3. Factibilidad técnica del proyecto.

El tamaño adecuado de los componentes de un sistema de energía solar es un problema complejo, que incluye componentes predecibles (colector y otras características de rendimiento de los componentes) e impredecibles (datos meteorológicos) (Duffie & Beckman, 2006) (Kalogirou, 2009).

Para esta propuesta, ya se tienen todo dimensionado en cuánto a la capacidad de equipos que se necesitan para la operación del arreglo de CCP, además se da por hecho que en la empresa que fabrica las prendas textiles ya se cuenta con la tecnología y equipos a los que se puede acoplar el arreglo de CCP propuestos.

5.4. Costos a considerar para el proyecto.

Saber si el proyecto será aceptado por la parte económica es lo que puede marcar la pauta para que se pudiera llevar a cabo o no. A continuación, se presenta una pequeña evaluación de esta índole para saber qué tan rentable podría ser esta propuesta.

5.4.1. Costo por metro lineal.

El costo por metro lineal que tiene este arreglo de colectores es de \$23,750.00 y cuenta con 8 metros lineales, por lo que el total es de \$190,000.00. Este costo ya incluye todos los equipos necesarios para su operación como lo son las bombas

centrífugas de acero inoxidable, flujómetro, sensores de temperatura, tanques de almacenamiento, tubería de cobre, aislamiento térmico, mangueras con aislamiento térmico, válvulas, etcétera. No obstante, al incrementar el número de colectores, el costo disminuye al adquirir los materiales en mayor cantidad; sin embargo, también se comprarán de mejor calidad, por lo cual se tomará el costo por metro lineal constante. Con base en la relación obtenida con la ganancia de energía útil requerida, se tiene lo siguiente:

$$\text{Inversión inicial} = \text{Costo arreglo} \times \text{Relación} = \$190,000.00 \times 9$$

$$\text{Inversión inicial} = \$1,710,000.00$$

5.4.2. Costo anual de operación y mantenimiento.

Los equipos que se usarían para este proyecto en específico propuesto, no requieren una programación de mantenimiento preventivo frecuente. Como buenas prácticas en la industria, se lleva una bitácora de operación para cada equipo con el cual se trabaja, independientemente de su uso.

Las bombas centrífugas son las que se requieren para el mantenimiento de manera más continua debido a que su operación va de la mano con la presencia de la irradiancia; no obstante, al ser motores eléctricos acoplados a la bomba, la tecnología por más nueva que sea ya cuenta con la capacidad de repararse de forma prácticamente inmediata.

Por esto, los costos de operación y mantenimiento que se tiene para una planta CCP como la dimensionada e inclusive a escalas mayores, representarían el 1% del costo de inversión inicial (Sharma, Sharma, Mullick, & Kandpal, 2018).

5.5. Factibilidad económica del proyecto.

Antes de tomar cualquier decisión, todo inversionista, ya sea persona física, empresa, gobierno, o cualquier otro, tiene el objetivo de obtener un beneficio por el desembolso que va a realizar. Por esta razón, se dará un panorama acerca de la factibilidad económica que podría tener el proyecto.

5.5.1. Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR).

Se ha partido del hecho de que todo inversionista deberá tener una tasa de referencia sobre la cual basarse para hacer sus inversiones. La tasa de referencia es la base de la comparación y el cálculo en las evaluaciones económicas que haga. Si no se obtiene cuando menos esa tasa de rendimiento, se rechazará la inversión.

Esta tasa de referencia se conoce como Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) y se define como (Baca Urbina, 2007):

$$TMAR = \text{tasa de inflación} + \text{premio al riesgo} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Como en todos los países hay inflación. aunque su valor sea pequeño, crecer en términos reales significa ganar un rendimiento superior a la inflación, ya que si se gana un rendimiento igual a la inflación el dinero no crece, sino que mantiene su poder adquisitivo. El premio al riesgo significa el verdadero crecimiento del dinero, y se le llama así porque el inversionista siempre arriesga su dinero y por arriesgarlo merece una ganancia adicional sobre la inflación. Como el premio es por arriesgar, significa que a mayor riesgo se merece una mayor ganancia.

La inflación en México es de aproximadamente el 5 % (Banxico, 2018). El premio por riesgo que se manejará para esta propuesta de proyecto será del 10 %, lo que conformaría una TMAR de 15% según la **Ec. 5.1**.

5.5.2. Valor presente Neto (VPN).

El valor presente simplemente significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente. En términos formales de evaluación económica, cuando se trasladan cantidades del presente al futuro se dice que se utiliza una tasa de interés, pero cuando se trasladan cantidades del futuro al presente, como en el cálculo del VPN, se dice que se utiliza una tasa de descuento, para este caso la TMAR; por ello, a los flujos de efectivo ya trasladados al presente se les llama flujos descontados. Se calcula de la siguiente manera (Baca Urbina, 2007):

$$VPN = -A + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad \text{Ec. 5.2}$$

donde:

FC : Flujo de caja para el año n .

A : Inversión inicial en el año cero.

i : Tasa de referencia que corresponde a la TMAR.

- Si $VPN > 0$, es conveniente aceptar la inversión, ya que se estaría ganando más del rendimiento solicitado.
- Si $VPN < 0$, se debe rechazar la inversión porque no se estaría ganando el rendimiento mínimo solicitado.

5.5.3. Tasa Interna de Retorno (TIR).

Se le llama tasa interna de retorno porque supone que el dinero que se gana año con año se reinvierte en su totalidad. Es decir, se trata de la tasa de rendimiento generada en su totalidad en el interior de la empresa por medio de reinversión. TIR es la tasa de descuento que hace el $VPN = 0$:

$$VPN = 0 = -A + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Al igualar el VPN a cero, la única incógnita que queda es la i . Esta tasa se obtiene por iteración o de manera gráfica. Cuando el $VPN = 0$ en realidad no significa que se gane o que se pierda, ocurre todo lo contrario. Cuando el $VPN = 0$ se está teniendo una ganancia equivalente a la inversión inicial.

- Si $TIR > TMAR (i)$ = El proyecto es factible.
- Si $TIR < TMAR (i)$ = El proyecto no es factible.

5.5.4. Rentabilidad del proyecto.

Para evaluar si el proyecto puede ser o no rentable, se hará el análisis con base en TMAR propuesta, el cálculo del VPN y de la TIR.

El valor presente neto depende del número de años que se maneje el proyecto, la inversión inicial a realizar, los costos de operación y mantenimiento previstos, los cuáles considerarán un crecimiento anual, y los beneficios que se esperan obtener. Por supuesto que también la TMAR tiene una participación importante, pues con esta calcularemos el valor presente para cada año.

En la **Tabla 6**, se muestran los VPN obtenidos a partir de una TMAR, Inversión inicial, Operación y Mantenimiento (O&M) con incremento anual de 5 % y un ahorro de combustible dado por el porcentaje cubierto del consumo anual, de acuerdo a la inversión inicial.

Las inversiones iniciales propuestas fueron determinadas a manera que representarán un porcentaje de la demanda térmica inicial; se escogieron números cerrados para una mejor interpretación de resultados. En el dimensionamiento del arreglo de CCP, se mencionó que bajo las condiciones de flujo de 2.5 L/min, se alcanzarían 75°C para un volumen de agua de 150 litros, es decir, 1/8 del requerimiento de térmico total que son 1,200 litros. Para este dimensionamiento se requirió una inversión de \$1,710,000.00. Con esta relación, se eligieron 4 porcentajes para presentar sus resultados. El método para calcular cada porcentaje es una regla de tres, partiendo que \$1,710,000.00 equivale a 1/8 del requerimiento de térmico total, es decir, 12.5 %.

El ahorro anual de combustible está dado por el porcentaje cubierto de la demanda térmica que representa la inversión inicial. El gasto anual de combustible calculado anteriormente se multiplica por cada porcentaje de ahorro para obtener el ahorro anual de combustible, es decir, los beneficios anuales. Para el caso del dimensionamiento planteado, el ahorro representa un 12.5 %, que transformado a dinero serían \$442,707.63.

Tabla 6. Calculo de VPN para diferentes TMAR e inversiones iniciales.

Ahorro anual de combustible	\$1,165,020.07	\$906,126.72	\$647,233.37	\$442,707.63	\$258,893.35
Porcentaje cubierto	32.89%	25.58%	18.27%	12.50%	7.31%
Operación y Mantenimiento	-\$45,000.00	-\$35,000.00	-\$25,000.00	-\$17,100.00	-\$10,000.00
Incremento anual	5%				
Inversión inicial	-\$4,500,000.00	-\$3,500,000.00	-\$2,500,000.00	-\$1,710,000.00	-\$1,000,000.00
TMAR	VPN				
5%	\$9,161,582.26	\$7,125,675.09	\$5,089,767.92	\$3,481,401.26	\$2,035,907.17

6%	\$8,085,586.82	\$6,288,789.75	\$4,491,992.68	\$3,072,522.99	\$1,796,797.07
7%	\$7,134,979.90	\$5,549,428.81	\$3,963,877.72	\$2,711,292.36	\$1,585,551.09
8%	\$6,292,229.14	\$4,893,956.00	\$3,495,682.85	\$2,391,047.07	\$1,398,273.14
9%	\$5,542,547.93	\$4,310,870.61	\$3,079,193.29	\$2,106,168.21	\$1,231,677.32
10%	\$4,873,428.78	\$3,790,444.61	\$2,707,460.43	\$1,851,902.94	\$1,082,984.17
11%	\$4,274,261.21	\$3,324,425.38	\$2,374,589.56	\$1,624,219.26	\$949,835.82
12%	\$3,736,018.07	\$2,905,791.83	\$2,075,565.59	\$1,419,686.87	\$830,226.24
13%	\$3,250,997.38	\$2,528,553.52	\$1,806,109.66	\$1,235,379.00	\$722,443.86
14%	\$2,812,609.25	\$2,187,584.97	\$1,562,560.69	\$1,068,791.51	\$625,024.28
15%	\$2,415,199.52	\$1,878,488.51	\$1,341,777.51	\$917,775.82	\$536,711.00
16%	\$2,053,903.53	\$1,597,480.53	\$1,141,057.52	\$780,483.34	\$456,423.01
17%	\$1,724,524.45	\$1,341,296.79	\$958,069.14	\$655,319.29	\$383,227.66
18%	\$1,423,431.80	\$1,107,113.62	\$790,795.44	\$540,904.08	\$316,318.18
19%	\$1,147,476.68	\$892,481.87	\$637,487.05	\$436,041.14	\$254,994.82
20%	\$893,920.73	\$695,271.68	\$496,622.63	\$339,689.88	\$198,649.05
21%	\$660,376.36	\$513,626.06	\$366,875.76	\$250,943.02	\$146,750.30
22%	\$444,756.56	\$345,921.77	\$247,086.98	\$169,007.49	\$98,834.79
23%	\$245,232.42	\$190,736.32	\$136,240.23	\$93,188.32	\$54,496.09
24%	\$60,197.23	\$46,820.06	\$33,442.90	\$22,874.95	\$13,377.16
25%	-\$111,763.96	-\$86,927.52	-\$62,091.09	-\$42,470.30	-\$24,836.43
26%	-\$271,900.20	-\$211,477.93	-\$151,055.66	-\$103,322.07	-\$60,422.27
27%	-\$421,316.75	-\$327,690.80	-\$234,064.86	-\$160,100.36	-\$93,625.94
28%	-\$560,993.87	-\$436,328.57	-\$311,663.26	-\$213,177.67	-\$124,665.30

La O&M, como se mencionó en el apartado correspondiente, equivale al 1% de la inversión inicial y se considera un incremento anual del 5%.

Las TMAR propuestas sirven para ver el comportamiento que tendrá el VPN con valores constantes de las variables antes mencionadas. De esta manera, podremos identificar la TMAR que hace el VPN = 0, es decir, la TIR; recordemos que en este punto se está teniendo una ganancia igual a la inversión inicial, siempre y cuando se realice una reinversión de lo ganado.

Debido a que los valores para cada escenario de inversión inicial son proporcionales al calculado con base en el dimensionamiento, la TIR calculada fue igual a 24.34 % para las 5 propuestas. Esto se aprecia de mejor manera al graficar los valores de VPN contra las TMAR, tal y como se muestra en la **Figura 39**.

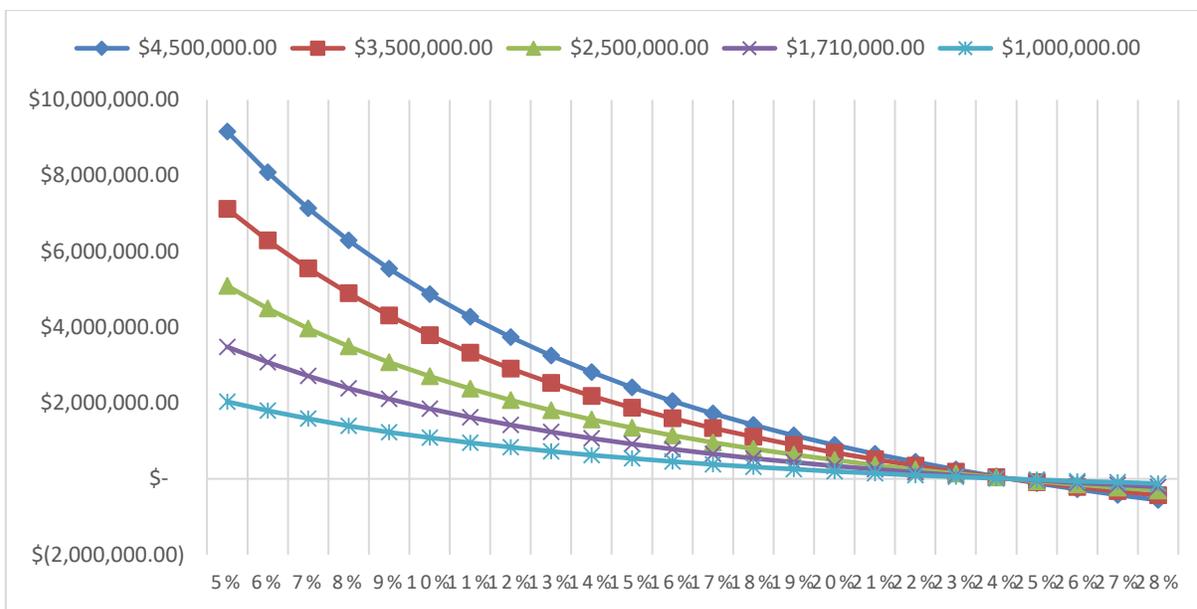


Figura 39. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, de acuerdo a una TMAR indicada.

De la gráfica anterior podemos observar que a menor es la TMAR, mayor serán los ingresos percibidos al momento de hacer la inversión, pero con una ganancia menor de manera anual. El punto en donde se da un equilibrio de ganancias e inversiones y el proyecto empieza a ser rentable, es en el valor de $TMAR \leq 24.34\%$.

Para el dimensionamiento realizado se propuso un valor de $TMAR = 15\%$ con una inversión inicial de \$1,710,000.00, lo que arrojó como resultado un $VPN = \$917,775.82$. Bajo los criterios planteados anteriormente:

- $VPN = \$917,775.82$, por lo tanto, $VPN > 0$.
- $TMAR = 15\%$, por lo tanto, $TIR > TMAR$.

Con estos resultados es conveniente aceptar la inversión, ya que se estaría ganando más del rendimiento solicitado, asegurando la factibilidad económica del proyecto.

5.5.5 Escenarios de incrementos en el precio del combustible.

En la actualidad el alza en los precios de los combustible se ha dado en este y otros países alrededor del mundo, las razones pueden ser muy variadas dependiendo de la zona, lo único certero es que el incremento ya se dio y muy probablemente continúe así.

En este apartado se mostrará como afecta un incremento proporcional anual en el combustible usado en el proceso industrial en cuestión. Como se mencionó anteriormente, se tiene una factibilidad económica del proyecto y esto hace que proyecto propuesto pueda ser rentable. Sin embargo, tomar en cuenta el alza del combustible hará aún más atractivo, desde el punto de vista económico, el implementar un arreglo de Colectores de Canal Parabólico para generar el calor en el proceso industrial descrito.

En la **Figura 40** se presenta el comportamiento del Valor Presente Neto obtenido para diferentes valores de inversión inicial y TMAR indicada, tomando en consideración un aumento anual del 5% en el costo del combustible usado en el proceso industrial.

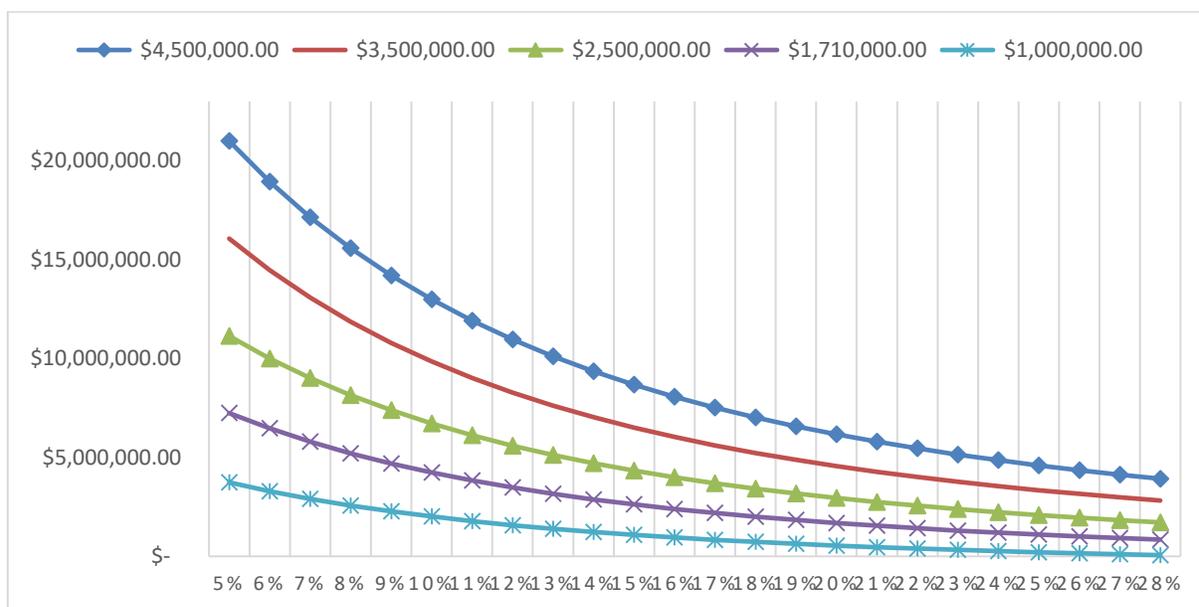


Figura 40. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, con una TMAR indicada, considerando un incremento anual de 5% en el precio del combustible.

Se observa que el VPN aumentó para cada inversión inicial en comparación con la gráfica **Figura 39**, ya que los beneficios del proyecto aumentan año con año, lo que resulta un retorno de inversión en menos tiempo; lo anterior se hace perceptible pues la TIR de cada curva es diferente, como se muestra en la **Tabla 7**, ya que a mayor inversión mayor será el combustible reemplazado por el arreglo de Colectores de

Canal Parabólico, lo que hará el retorno de inversión más rápido en comparación con una inversión menor.

Tabla 7. TIR obtenidas para cada valor de inversión inicial, considerando un incremento anual de 5% en el precio del combustible.

Inversión inicial	TIR obtenida
\$ 4,500,000.00	120.50%
\$ 3,500,000.00	94.61%
\$ 2,500,000.00	68.72%
\$ 1,710,000.00	48.23%
\$ 1,000,000.00	29.51%

Cuando se considera un aumento anual del 10% en combustible (**Figura 41**), los valores de VPN incrementan hasta en un 437.5% en comparación con la **Figura 39**. Esto se debe a que los beneficios por dejar de usar el combustible fósil se vuelven mayores.

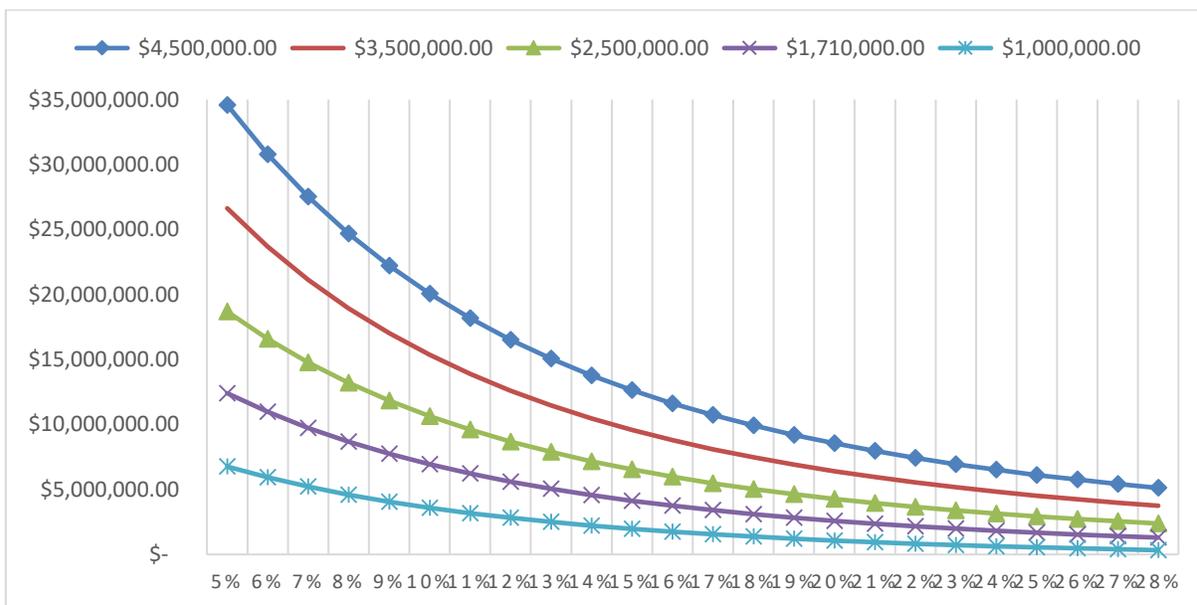


Figura 41. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, con una TMAR indicada, considerando un incremento anual de 10% en el precio del combustible.

Las TIR que se obtuvieron en este escenario se muestran en la **Tabla 8** y son 5% mayor, al igual que el incremento del precio del combustible del escenario anterior (de 5% a 10%).

Tabla 8. TIR obtenidas para cada valor de inversión inicial, considerando un incremento anual de 10% en el precio del combustible.

Inversión inicial	TIR obtenida
\$ 4,500,000.00	125.54%
\$ 3,500,000.00	99.66%
\$ 2,500,000.00	73.79%
\$ 1,710,000.00	53.32%
\$ 1,000,000.00	34.61%

Al considerar un incremento anual del 15% en el combustible, como se muestra en la **Figura 42** **Figura 41**, los valores de VPN incrementan hasta en un 737.5% en comparación con la **Figura 39**. Al igual que en el escenario anterior, esto se debe a que los beneficios por dejar de usar el combustible fósil se vuelven mayores.

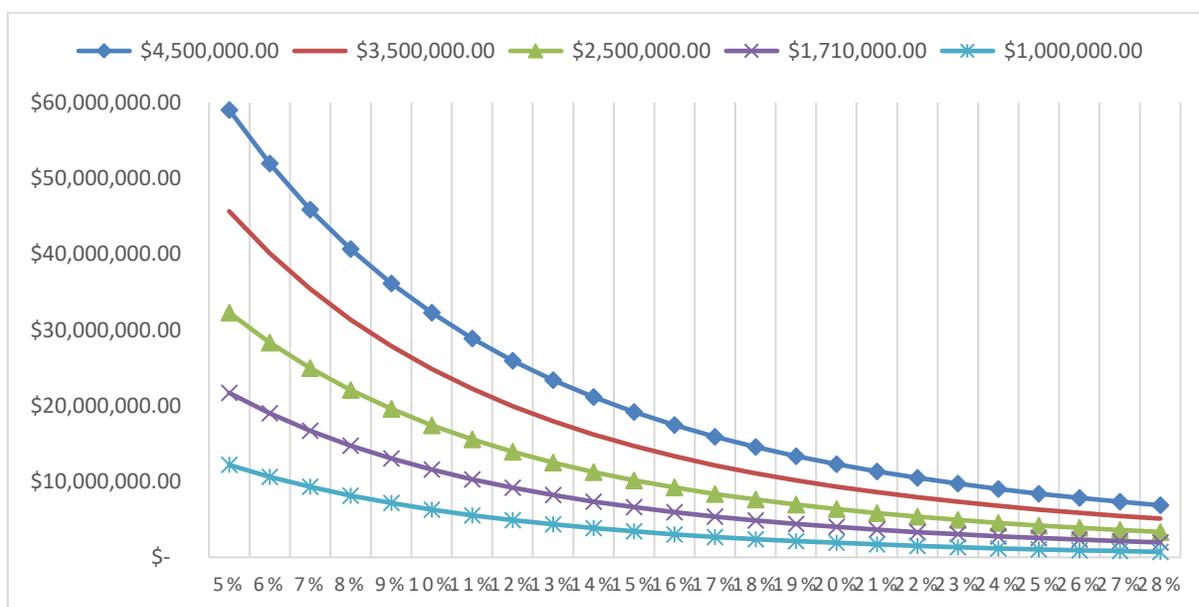


Figura 42. Valores de VPN para 5 escenarios de inversión inicial, con una TMAR indicada, considerando un incremento anual de 15% en el precio del combustible.

En la **Tabla 9** se muestran las TIR que obtuvieron en este caso, arrojando el incremento de un 5%, tal y como en el escenario anterior.

Tabla 9. TIR obtenidas para cada valor de inversión inicial, considerando un incremento anual de 15% en el precio del combustible.

Inversión inicial	TIR obtenida
\$ 4,500,000.00	130.58%
\$ 3,500,000.00	104.71%
\$ 2,500,000.00	78.85%
\$ 1,710,000.00	58.38%
\$ 1,000,000.00	39.65%

Esto arroja como conclusión que el hecho de considerar este aumento en el precio del gas LP ayuda a planificar de mejor manera el tiempo que tomará recuperar lo invertido en el proyecto, pues se dará más rápido. Sin embargo, se debe ser cauteloso de que porcentaje usar exactamente, pues uno elevado podría dar un escenario muy difícil de conseguir y llevaría a una mala planeación y acarrearía problemas subsecuentes como falta de capital.

Desde luego que para estos escenarios propuestos se cumplen con las dos premisas base:

- $VPN > 0$ para todos los casos.
- $TMAR$ propuesta = 15 %, por lo tanto, $TIR > TMAR$ para todos los casos.

Conclusiones

En los resultados mostrados se puede observar una diferencia significativa entre evaluar el arreglo de Colectores de Canal Parabólico de manera estática y evaluarlos con el sistema de seguimiento. Además, al tener la inclinación de todo el arreglo igual a la latitud de la ciudad de Mérida, se magnifica la captación de la componente directa de la Irradiancia, ya que de esta manera se tiene una incidencia más cercana a la normal.

De acuerdo a las evaluaciones realizadas para las diferentes configuraciones planteadas, el arreglo de Colectores de Canal Parabólico conectados en serie con sistema de seguimiento arrojó la ganancia de energía útil más alta. Esto se debe a que la ganancia de energía útil que cada CCP puede aportar se está acumulando al pasar hacia el siguiente concentrador.

Para este arreglo de CCP en serie con seguimiento, la temperatura máxima de salida del fluido registrada fue de 42.03 °C y una diferencia de temperatura máxima entre la entrada y salida del fluido fue de 4.55 °C. La ganancia útil obtenida para el arreglo comentado fue de 833.65 W, con una eficiencia promedio de 40.21%. Para comprender este valor, si lo comparamos con las otras configuraciones se tiene lo siguiente: en comparación con el arreglo en paralelo con seguimiento es 11.25% mayor; en comparación con el CCP que cuenta con seguimiento es 18.84% mayor; en comparación con el arreglo en serie evaluado de manera estática es 23.7% mayor; en comparación con el arreglo en paralelo estático es 32.37% mayor; en comparación con el CCP evaluado estáticamente es 38.05% mayor.

La irradiancia es la variable ambiental que tiene mayor impacto en la Q_u , pues sin ésta no podría haber conversión a energía térmica. Al tener el receptor descubierto, la velocidad del viento causa un impacto negativo significativo en comparación con las otras 5 variables, pues el fenómeno de transferencia de calor por convección se magnifica y hace que el coeficiente global de pérdidas crezca.

En el caso de las variables operacionales, la ΔT es la que presenta un aumento mayor positivo sobre la ganancia de energía útil. Esto tiene que ver con que la diferencia de

temperatura es lo que provoca en sí la Q_u , pues al alcanzar una mayor temperatura de salida con una menor temperatura de entrada, representa que el sistema es capaz de concentrar de manera más eficiente la irradiancia directa en el receptor y por consecuencia su capacidad de extraer calor del fluido se incrementa.

En cuanto a la propuesta de aplicación, para el dimensionamiento realizado se propuso un valor de $TMAR = 15\%$ con una inversión inicial de \$1,710,000.00, lo que arrojó como resultado un $VPN = \$917,775.82$. Bajo los criterios planteados anteriormente:

- $VPN = \$917,775.82$, por lo tanto, $VPN > 0$.
- $TMAR = 15\%$, por lo tanto, $TIR > TMAR$.

Con estos resultados es conveniente aceptar la inversión, ya que se estaría ganando más del rendimiento solicitado, asegurando la factibilidad económica del proyecto.

Referencias

- ANSI/ASHRAE. (1991). *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. Atlanta.
- Baca Urbina, G. (2007). *Fundamentos de Ingeniería Económica*. México: McGraw-Hill.
- Banxico. (2018). *Banco de México*. Retrieved from <http://www.banxico.org.mx/portal-inflacion/inflacion.html>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., & Antonopoulos, K. (2017). A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors. *Applied Thermal Engineering*, 374–386.
- Bendt, P., Rabl, A., Gaul, H. W., & Reed, K. A. (1979). *Optical analysis and optimization of line focus solar collectors*. Reporte técnico, Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
- COMEY. (2009). *COMEY*. Retrieved 10 27, 2015, from http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://comey.yucatan.gob.mx/marco_files/II.4_Perfil_Economico.pdf&gws_rd=cr&ei=8xlvVoTYA4y0efGohpAO
- Dudley, V., Kolb, G., Mahoney, A., Mancini, T., Matthews, C., Sloan, M., & Kearney, D. (1994). *Test results: SEGS LS-2 solar collector*. Reporte técnico, Sandia National Labs., Albuquerque, Nuevo Mexico, Estados Unidos.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Tercera ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Ericsson, J. (1884, Enero). The Sun Motor and the Sun's Temperature. *Nature*, 29, 217-219.
- Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., & Pérez, M. (2010, Marzo 5). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1695-1721.
- Gee, R., & Hale, M. (2005). *Solargenix Energy Advanced Parabolic Trough Development*. Acta de conferencia, National Renewable Energy Laboratory, Department of Energy, Denver, Colorado.
- Geyer, M., Lüpfert, E., Osuna, R., Esteban, A., Schie, W., Schweitzer, A., . . . Mandelberg, E. (2002). *EUROTROUGH - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation*. Resumen de simposio, 11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich.

- Guven, H. M., & Bannerot, R. B. (1986). Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries. *Solar Energy*, 36(6), 535-550.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems*. USA: Elsevier Inc.
- Kreider, J., & Kreith, F. (1981). *Solar energy handbook*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Kutscher, C., Davenport, R., Dougherty, D., Gee, R., Masterson, P., & May, E. (1982). *Design approaches for solar industrial process-heat systems: nontracking and line-focus collector technologies*. Reporte técnico, Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
- Leithold, L. (2009). *El cálculo* (Séptima ed.). México: OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- NREL. (2012). *NREL*. Retrieved Abril 6, 2016, from <http://www.nrel.gov/csp/soltrace/download.html>
- Price, H., Forristall, R., Wendelin, T., Lewandowski, A., Moss, T., & Gummo, C. (2006). Field Survey of Parabolic Trough Receiver Thermal Performance. *Solar 2006 Conference (ISEC'06)*, (pp. 1-11). Denver, Colorado.
- Price, H., Lüpfer, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R., & Mahoney, R. (2002, Abril 24). Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 109-125.
- Ramos, C., Beltran, J., & Ramirez, R. (2014). Advances on the Development of the Parabolic Trough Technology in Mexico. *Energy Procedia*, 57, 2090 – 2097.
- Rosado Hau, N. (2010). *Evaluación de un Concentrador de Canal Parabólico para la Construcción de un Sistema de Calentamiento de Agua*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Mérida, Yucatán, México.
- SEFOE. (2015). *Secretaría de Fomento Económico*. Retrieved 11 5, 2015, from <http://www.sefoe.yucatan.gob.mx/esp/yucatan/sectores-productivosAct.php>
- SENER. (2018). *Sistema de Información Energética*. Retrieved from <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE5C01>
- Sharma, A., Sharma, C., Mullick, S., & Kandpal, T. (2018). Financial viability of solar industrial process heating and cost of carbon mitigation: A case of dairy industry in India. *ustainable Energy Technologies and Assessments*, 1-8.
- SOLO. (2015). *Metronor*. Retrieved Abril 2016, from <http://www.metronor.com/industrial/products/solo/>
- Spencer, G., & Murty, M. (1962). General Ray-Tracing Procedure. *Journal of the Optical Society of America*, 52(6), 672-678.

Venegas Reyes, E. (2013). *Diseño, Construcción y Evaluación de un Arreglo de Concentradores de Canal Parabólico para Calor de Proceso*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Energía - Solar Fototérmica, Ciudad de México.

Wendelin, T., Dobos, A., & Lewandowski, A. (2013). *SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems*. Reporte técnico, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.

Bibliografía

Cengel, Y. y Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill.