



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
EN ELECTROQUIMICA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR FOTO-TÉRMICO
DOMÉSTICO CON PLACA DE ABSORCIÓN DE ACERO INOXIDABLE

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

*Maestro en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad en Electroquímica*

PRESENTA

Tundra Margarita Ramírez Jiménez



Santiago de Querétaro, Qro., México, Febrero del 2011

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

REALIZADO POR:
Ing. Tundra Margarita Ramírez Jiménez

DIRIGIDA POR
Dr. Yunny Meas Vong

SINODALES

Presidente Dr. Reynaldo Pless Elling

Firma

Secretario Dr. Gonzalo Ramos López

Firma

Vocal Dr. Yunny Meas Vong

Firma

Vocal Dr. Gerardo Arriaga Hurtado

Firma

Vocal Dr. Germán Orozco Gamboa

Firma

RESUMEN

En este escrito se describe un colector solar plano de placas paralelas. El material empleado como absorbedor es acero inoxidable 304 calibre 24, con un patrón de flujo troquelado. En la construcción se reduce el empleo de soldaduras, se maximiza el área de captación y el proceso de crecimiento de superficie selectiva es llevado a cabo en su totalidad. Acorde con la filosofía del cuidado energético se reutilizan, adaptan e implementan materiales, tecnologías y productos.

Se presenta el modelo matemático, la simulación computacional de los fenómenos de transporte implicados, los resultados de pruebas experimentales y el cálculo de la eficiencia del colector, así como del sistema empleado. Finalmente, se plantea el proceso de manufactura del colector solar en el que el costo de material, producción y mantenimiento, así como la vida útil de éste se encuentra en un favorable balance económico con la eficiencia térmica entregada. Esto posibilita la diversificación de proveedores de colectores solares en México y se favorece la adquisición por el público en general.

Los parámetros evaluados son: eficiencia térmica, temperatura del fluido a la entrada y a la salida del colector, irradiancia, presión, flujo másico y reflectancia en el rango visible (VIS).

ABSTRACT

This document describes the design process for a flat-plate solar collector. As absorption surface stainless steel 304, printed with a flow pattern, is used,. A performance analysis is carried out, including a mathematical model, simulation of transport phenomena, a simple cost study, and in situ test results.

The construction minimizes the use of welding, maximizes the heat transfer area, and the selective surface growing process is carried to completion. In accord with a philosophy of energy stewardship, materials, technologies and products are recycled, adapted and implemented. Finally, a manufacturing process is proposed where costs of materials, production, and maintenance, as well as the cycle life of the collector are in a sustainable balance. This should make for a diversification of solar collector suppliers in Mexico, and for greater consumer accessibility.

The tested parameters are: thermal efficiency, collector inlet and outlet temperatures, pressure, and reflectance in the visible range.



**Este trabajo fue realizado en el Centro de
Investigación y Desarrollo Tecnológico en
Electroquímica (CIDETEQ) dirigido por el
Dr. Yunny Meas Vong.**

AGRADECIMIENTOS

Rodolfo Mena

Dr. Yunny Meas

Fernando Correa, Pedro Torres (IMINOX)

Víctor Prieto, Mauricio Tello (CIDESI)

Jorge Rangel (ITQ)

Mario Cavazos (DAIBSA)

Enrique Barrera (UAMI)

David Pérez (CICATA)

Hugo Ruíz, Rocío Vidal, Georgina Zuñiga, Erika Espinoza (CIDETEQ)

Saúl Luyo, Guillermo Valencia (CENAM)

Deyli Galíndez y Alía Méndez

Contenido

1. Antecedentes en México	13
2. Introducción: Diseño de un colector solar de acero inoxidable	16
2.1 Justificación.....	17
2.2 Definición del problema.....	18
2.3 Objetivos	19
2.4 Hipótesis de trabajo	19
2.5 Metodología	19
2.6 Resultados y entregables esperados	20
2.7 Diagrama de Gantt	21
3. Marco teórico	22
3.1 Collectores solares foto-térmicos	22
3.1.1 Clasificación.....	22
3.2.1. Geometrías de la placa de absorción	25
3.3 Eficiencia teórica.....	27
3.3.1 El colector solar como sistema.....	27
3.3.2 Balance energético	31
3.3.3 Optimización de eficiencia, estado del arte.....	34
3.4 Comparativo de eficiencia.....	38
4. Dimensionamiento del colector prototipo. Caso Querétaro	39
4.1 Energía solar disponible y condiciones climáticas.....	39
4.1.1 Recurso disponible	39
4.1.3 Condiciones climáticas.....	45
4.2 Utilización	46
4.3 Condiciones de operación	48
4.3.1. Captador solar: área e inclinación	48
4.3.2 Tanque de almacenamiento	49
4.3.3 Elementos de interconexión	50
5. Propuesta de diseño de colector	51
5.1 Fluido de trabajo y Termosifón.....	51
5.1.1 Calidad del agua	52
5.2 Placa de absorción.....	54
5.2.1. Material	54
5.2.2 Corrosión.....	56

5.2.3. Patrón de flujo	59
5.3 Superficie selectiva	62
5.3.1 Acabado del absorbedor de acero inoxidable.....	63
5.3.2 Pintura negra mate de alta temperatura S1	64
5.3.3 Coloreado de acero inoxidable mediante baño electroquímico S2	64
5.3.4 Espectro electromagnético en el rango visible de la superficie aplicada	68
5.4 Cubierta transparente y aislante	70
5.5 Colector integrado	71
5.6 Sistema hidráulico	73
6. Modelo matemático.....	75
6.1 Definición del sistema.....	75
6.2 Ecuaciones de gobierno.....	77
6.3 Solución a través de simulación en COMSOL™.....	81
6.3.1 Variables del sistema.....	82
6.3.2 En el elemento de volumen	83
6.4 Validación del modelo	87
6.5 Resultados de la placa Tranter™	88
6.5.1 En el elemento de volumen	88
6.5.2 En la placa completa.....	92
7. Modelo experimental.....	94
7.1 Definición de Variables.....	94
7.2 Monitoreo de variables.....	96
8. Pruebas de operación.....	97
8.1 Ubicación	97
8.2 Visualización de flujo.....	99
8.3 Desempeño del sistema	99
8.3.1 Sistema cerrado C1 vidrio templado, S1 pintura negra mate	100
8.3.2 Sistema cerrado C1 vidrio templado, S2 coloreado de acero inoxidable.....	100
8.4 Desempeño del colector	102
8.4.1 C1 vidrio templado, S1 pintura negra mate y S2 coloreado electroquímico, varios F....	102
8.5 Flujo óptimo	103
8.6 Determinación de la Constante de tiempo.....	107
8.7 Eficiencia entregada	108
9. Diseño final propuesto	114
9.1 Análisis de costos	114
9.2 Proceso de manufactura	118

10. Conclusiones	122
Nomenclatura	125
Apéndice.....	128
A.1. Naturaleza de la radiación solar	128
A.1.1 Radiación electromagnética	128
A.1.2 Medición de la radiación	129
A.1.3 Ángulos solares	130
A.2. Otros tipos de colectores	131
A.2.1. Concentradores y no concentradores de energía	131
A.2.2. Colector solar de tubos al vacío	131
A.2.3 Concentradores compuestos parabólicos.....	133
A.3. Pérdidas por convección.....	135
A.4. Propiedades ópticas	135
A.4.1.Reflectancia	136
A.4.2 Transmitancia	137
A.5. Acero inoxidable	139
A.5.1.Designación y Clasificación de los aceros inoxidables.....	139
A.5.2. Familias de aceros inoxidables.....	140
A.5.3. Trabajo en frío del acero inoxidable.....	141
A.5.3.1. Valor r.....	141
A.5.3.2. Valor n.....	142
A.6 costo de la parte experimental	144

Índice de Figuras

FIGURA 1. DIAGRAMA DE GANTT	21
FIGURA 2. A) PERFIL Y B) ISOMÉTRICO DE UN COLECTOR DE PLACA PLANA.....	24
FIGURA 3. DISEÑOS DE COLECTORES PARA AGUA (A) PARA AIRE (B)	26
FIGURA 4. ESQUEMA DE LAS INTERACCIONES DE ENERGÍA DE UN COLECTOR PLANO CON CUBIERTA	26
FIGURA 5. REPRESENTACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA PARA COLECTOR SOLAR (A) DE PLACAS PLANAS ¹	32
FIGURA 6. A) TIPOS DE COLECTORES Y B) EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE $\chi = \frac{t_{f,i} - t_a}{G_t}$	38
FIGURA 7. DATOS DE IRRADIANCIA GLOBAL 2007 CIDETEQ-P.E, 2008 CIDETEQ-P.E Y 2009 EMAS-H.....	41
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE IRRADIANCIA A TRAVÉS DEL DÍA PARA 7 DÍAS: DÍA 1 (CUADROS), DÍA 2(CÍRCULOS), DÍA 3(DIAMANTES). DÍA 4(CRUCES), DÍA 5 (ASTERISCOS), DÍA 6(RECTÁNGULOS), DÍA 7 (TRIÁNGULOS) A) 2007 CIDETEQ-P.E, B) 2008 CIDETEQ-P.E Y C) 2009 EMAS-H.....	43
FIGURA 9. COMPARATIVO DE VALORES PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR	44
FIGURA 10. TABLAS DE CONSUMO DE CALENTADORES SOLARES PARA A) CLIMA TEMPLADO, TEMPERATURA DE AGUA 20°C , B) CLIMA TEMPLADO-FRÍO CON HELADAS, TEMPERATURA DE AGUA 15°C ²¹	47
FIGURA 11. SOBREPOSICIÓN DEL DIAGRAMA DE POURBAIX DEL FE Y DEL CR	58
FIGURA 12. SERIE GALVÁNICA PARA DISTINTOS TIPOS DE METALES ²⁷	58
FIGURA 13. PLACA DE ABSORCIÓN ESQUEMA Y DIMENSIONES	60
FIGURA 14. APLICACIÓN ORIGINAL DE LA PLACA DE ABSORCIÓN.....	61
FIGURA 15. DIMENSIONES ORIGINALES Y ADAPTADAS DE LA PLACA DE ACERO INOXIDABLE.....	61
FIGURA 16. PRUEBAS EN DISTINTOS TIPOS DE ACERO INOXIDABLE. FOTO DE 430 Y 304	61
FIGURA 17. EFICIENCIA DEL COLECTOR EN FUNCIÓN DE A Y ϵ DE LA SUPERFICIE SELECTIVA, A $T_A=293.15$ K.....	63
FIGURA 18. FOTO DEL PROCESO DE COLOREADO DE ACERO INOXIDABLE 304 EN UN BAÑO ELECTROQUÍMICO	67
FIGURA 19. ABSORBEDOR COLOREADO MEDIANTE BAÑO ELECTROQUÍMICO ALCALINO CROMO-OXIDANTE	67
FIGURA 20. REFLECTANCIA DE LA SUPERFICIE DE ÓXIDOS DE CROMO SOBRE ACERO INOXIDABLE A) CON LA COMPONENTE ESPECULAR INCLUIDA Y B) COMPONENTE ESPECULAR EXCLUIDA	69
FIGURA 21. ESPECTRO EN EL RANGO VISIBLE DEL ACERO INOXIDABLE AB SIN ACABADO	70
FIGURA 22. COMPONENTES DEL COLECTOR A) ENSAMBLE Y B) COLECTOR ARMADO	72
FIGURA 23. A) SOPORTE DEL COLECTOR Y B) COLECTOR ARMADO (VISTA FRONTAL)	72
FIGURA 24. SISTEMA HIDRÁULICO	74
FIGURA 25. DIAGRAMA DEL ELEMENTO DE VOLUMEN DEL SISTEMA	75
FIGURA 26. FLUJO DE ENERGÍA, VOLUMEN DE CONTROL, CONDICIONES DE FRONTERA, ECUACIÓN QUE RIGE EL DOMINIO	79
FIGURA 27. BALANCE DE ENERGÍA Y CONDICIONES DE FRONTERA EN EL VOLUMEN DE CONTROL.....	80
FIGURA 28. DIAGRAMA DE FLUJO DE LÓGICA COMSOL	81
FIGURA 29. TEMPERATURA EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN A)	84
FIGURA 30. A) VELOCIDAD Y B) VORTICIDAD EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN	85
FIGURA 31. A) FLUJO CONVECTIVO Y B) FLUJO CONDUCTIVO EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN	85
FIGURA 32. A) DENSIDAD Y B) ISOTERMAS EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN.....	85
FIGURA 33. A) TEMPERATURA Y B) ISOTERMAS EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN CON PATRÓN DE FLUJO.....	89
FIGURA 34. A) DISTRIBUCIÓN DE FLUJO Y B) ISOTERMAS EN UN ELEMENTO DE VOLUMEN CON PATRÓN DE FLUJO.....	90
FIGURA 35. A) TEMPERATURA EN CORTE TRANSVERSAL A LA MITAD DE LA DISTANCIA DE FLUJO Y B) FLUJO CONVECTIVO	90
FIGURA 36. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN CORTES TRANSVERSALES EN UN ELEMENTO DE VOLUMEN.....	90
FIGURA 37. FACTORES Y NIVELES. CUBIERTA TRANSPARENTE Y SUPERFICIE SELECTIVA.....	95
FIGURA 38. UBICACIÓN DEL COLECTOR PROTOTIPO	98
FIGURA 39. SECUENCIA DE COMPORTAMIENTO EN LA DISTRIBUCIÓN POR DIFERENCIA DE DENSIDADES SECUENCIA TOMADA CADA 5SEG. TOTAL 135S A FLUJO ESTABLE. DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 10°C.....	98
FIGURA 40. ESQUEMA Y FOTOGRAFÍA DEL SISTEMA SOLAR EMPLEADO	100
FIGURA 41. SI TEMPERATURA A LA ENTRADA $T_{F,i}$ (CUADROS) Y SALIDA $T_{F,e}$ DEL COLECTOR (DIAMANTES), $\Delta T = T_{F,e} - T_{F,i}$ (TRIÁNGULOS)	101

FIGURA 42. S2 TEMPERATURA A LA ENTRADA $T_{F,i}$ (CUADROS) Y SALIDA $T_{F,e}$ DEL COLECTOR (DIAMANTES), $\Delta T = T_{F,e} - T_{F,i}$ (TRIÁNGULOS)	101
FIGURA 43. ESQUEMA DE DISPOSITIVO DE PRUEBAS DE EFICIENCIA DEL COLECTOR.....	102
FIGURA 44. IRRADIANCIA SOLAR Y TEMPERATURA DE AGUA A LA SALIDA PARA DISTINTOS FLUJOS. TEMPERATURA DE SALIDA (CUADROS) IRRADIANCIA (DIAMANTES) A)F1, B)F2, C)F3, D)F4, E)F5, F)F6 Y G)F7	105
FIGURA 45. TEMPERATURA DEL AGUA A LA SALIDA DEL COLECTOR PARA DISTINTOS FLUJOS A) S1 Y B) S2.....	106
FIGURA 46. A) CONSTANTE DE TIEMPO A FLUJO MÁXIMO PARA S1 B) TIEMPO DE RESPUESTA PARA S2	108
FIGURA 47. A) EFICIENCIA TÉRMICA EN FUNCIÓN DE X B) EFICIENCIA TÉRMICA EN FUNCIÓN DE X VALORES PROMEDIO CON DESVIACIÓN ESTÁNDAR	109
FIGURA 48. A) EFICIENCIA TÉRMICA EN FUNCIÓN DE X B) EFICIENCIA TÉRMICA EN FUNCIÓN DE X VALORES PROMEDIO CON DESVIACIÓN ESTÁNDAR	111
FIGURA 49. AJUSTE POLINOMIAL DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN FUNCIÓN DE X.....	113
FIGURA 50. COMPARATIVO DE EFICIENCIA PARA DISTINTOS FLUJOS.....	113
FIGURA 51. DETALLE DE SOPORTES LATERALES	119
FIGURA 52. ACERCAMIENTO	119
FIGURA 53. DETALLE DE CONEXIÓN.....	119
FIGURA 54. BOSQUEJO PATRÓN DE FLUJO	120
FIGURA 55. ACABADO ECOLÓGICO.....	120
FIGURA 56. MAPA DE PROCESO DEL COLECTOR PROPUESTO.....	121
FIGURA A. 1 COLECTOR BÁSICO DE TUBOS AL VACÍO ⁹	132
FIGURA A.2. DISEÑOS DE COLECTORES DE TUBOS AL VACÍO.....	132
FIGURA A. 3. A) SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CONCENTRADOR COMPUESTO PARABÓLICO SIMÉTRICO Y B) MÓDULO DE CONCENTRADORES COMPUESTOS PARABÓLICOS ⁹	134
FIGURA A. 4 HAZ DE RADIACIÓN INCIDENTE Y REFLEJADO EN UNA INTERFASE ¹¹	136
FIGURA A. 5. TABLA DE ÍNDICES DE REFRACCIÓN	137
FIGURA A. 6. TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE UNA CUBIERTA ⁸	137
FIGURA A. 7. DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FASES DEL SISTEMA BINARIO HIERRO-CARBONO	140

Índice de Tablas

TABLA 1. TABLA COMPARATIVA COLECTORES DE LÍQUIDO Y DE AIRE	23
TABLA 2. PROPIEDADES DE FLUIDO DE ALTA TEMPERATURA	35
TABLA 3. ALGUNAS PROPIEDADES DE CUBIERTAS TRANSPARENTES	36
TABLA 4. TABLA DE PROPIEDADES ÓPTICAS DE DIVERSAS SUPERFICIES	37
TABLA 5. RESUMEN DE INVESTIGACIÓN SOBRE SUPERFICIES SELECTIVAS.....	37
TABLA 6. EFICIENCIAS ÓPTICAS Y PÉRDIDAS GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA DISTINTOS COLECTORES ...	38
TABLA 7. VALORES DE IRRADIACIÓN GLOBAL 2007 CIDETE-Q-P.E, 2008 CIDETE-Q-P.E Y 2009 EMAS-H.....	44
TABLA 8. CONDICIONES AMBIENTALES PROMEDIO EN EL PUNTO DE INTERÉS.....	45
TABLA 9. FACTOR DE ENSUCIAMIENTO POR DUREZA DEL AGUA ¹¹	53
TABLA 10. CLASIFICACIÓN DE LA DUREZA DEL AGUA.....	53
TABLA 11. COMPOSICIÓN DEL AGUA EN MUNICIPIO PEDRO ESCOBEDO ²⁶ *DE ACUERDO A VARIOS ESTUDIOS DE RUTINA REALIZADOS EN CIDETE-Q.....	54
TABLA 12. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE METALES ³³	55
TABLA 13. PROPIEDADES DE SUPERFICIE SELECTIVA CONVERTIDA QUÍMICAMENTE EN SUPERFICIES DE ACEROS INOXIDABLE. INCO LONDON AND INTERNATIONAL NICKEL COMPANY.	64
TABLA 14. RELACIÓN DE MUESTRAS CON DISTINTAS CONDICIONES DEL ACABADO NR-NO REPORTADO.....	68
TABLA 15. VALORES DE ABSORTANCIA PROMEDIO CALCULADOS A TRAVÉS DE LA LEY DE KIRCHOFF.....	70
TABLA 16. TABLA DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS AISLANTES	71
TABLA 17. VARIABLES DEL SISTEMA	83
TABLA 18. BALANCE DE ENERGÍA EN EL VOLUMEN DE CONTROL.....	87
TABLA 19. BALANCE DE ENERGÍA MACROSCÓPICO EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN.....	88

TABLA 20. VALORES INTEGRADOS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL ELEMENTO DE VOLUMEN	91
TABLA 21. BALANCE DE ENERGÍA MACROSCÓPICO DEL ELEMENTO DE VOLUMEN.....	91
TABLA 22. BALANCE DE ENERGÍA MACROSCÓPICO EN LA PLACA PLANA CON UN INCREMENTO DE ÁREA	93
TABLA 23. TABLA COMPARATIVA DE TEMPERATURAS CALCULADAS POR DISTINTOS MÉTODOS	93
TABLA 24. FACTORES DE DISEÑO. CONTROLABLES Y NO CONTROLABLES. *EL CONSUMO EN UNA CASA PUEDE MODIFICARSE.....	95
TABLA 25. VARIABLES DEL SISTEMA Y VARIABLES DE RESPUESTA.....	95
TABLA 26. PORCENTAJE DEL COSTO TOTAL DEL SISTEMA POR COMPONENTE.....	114
TABLA 27. COMPARATIVO 2 DÍAS PRECIOS OFICIALES EN LA BOLSA DE METALES DE LONDRES (LME- LONDON METAL EXCHANGE) ^COSTO TOMADO DE LA TABLA 29 A MODO COMPARATIVO	115
TABLA 28. PRECIO DE LÁMINAS DE ACERO INOXIDABLE(US \$/TON)	115
TABLA 29. COSTO PARA UN MODULO DE COLECTOR SOLAR S1, CAPACIDAD DE 1 PERSONA 55°C. (E.) ESTIMADO	117
TABLA 30. COSTO DE LOS COMPONENTES ADICIONALES	118
TABLA 31. MEJORAS PROPUESTAS PARA EL NUEVO PROCESO DE MANUFACTURA DEL COLECTOR.....	120
TABLA A. 1. VALORES DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA ⁴⁰	135
TABLA A. 2. DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FASES DEL SISTEMA BINARIO HIERRO-CARBONO ⁴⁶	140
TABLA A. 3. COMPARATIVA DE PROPIEDADES DE ACEROS FERRÍTICOS VS. AUSTENÍTICOS.....	142
TABLA A. 4. PROPIEDADES FÍSICAS DE ACEROS RECOCIDOS	143
TABLA A. 5. VALORES N&R DE DIVERSOS ACEROS INOXIDABLES. NOTA: NO SE CUENTA CON INFORMACIÓN SOBRE LOS VALORES N Y R PARA LOS GRADOS 441 Y 316.....	143
TABLA A. 6 .COSTO DEL MATERIAL PARA LA PARTE EXPERIMENTAL	144

1. Antecedentes en México

El uso y transformación de energía ha sido determinante a través del tiempo en el desarrollo de la sociedad humana. Desde la era prehispánica nuestros antecesores han visto en el Sol la fuente de energía por excelencia, la cual da vida día a día a todos los habitantes de la Tierra. Sin embargo, nuestras necesidades energéticas de esas épocas no se comparan con los consumos actuales de energía.

La mayoría de las actividades desarrolladas cotidianamente por el hombre exigen altos niveles energéticos, razón por la cual distintas maneras de transformación de energía son requeridas continuamente, sin importar la escala. Incluso requerimos de energía para obtener otros recursos vitales, como por ejemplo el agua. El momento actual de crisis energética crea la necesidad imperante de investigar, aprender y mejorar los mecanismos disponibles para lograr un suministro adecuado de energía.

A partir de la conocida como *Primera crisis petrolera* sucedieron transformaciones a nivel mundial en cuanto al concepto, uso, generación y transformación de la energía. Los países industrializados implantaron políticas de ahorro de energía y diversificación de fuentes de suministro. Los países en vías de desarrollo adoptaron, a su medida, éstas políticas energéticas.

En 1977, en México aparece un *Manual de Procedimientos para el Uso Eficiente de la Energía en la Industria y el Comercio* editado por la Comisión de la Energía en la Industria, el Comercio y Fomento Industrial. Esta obra fue basada en la publicación norteamericana *Energy Conservation Program Guide for Industry and Commerce* que pretendió ser un primer paso hacia un Programa Nacional para el Uso Eficiente de Energía.

En 1979, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) estableció el programa *Nacional de Uso Racional de Energía Eléctrica*, que en su primera fase enfocó sus acciones al sector consumidor. Sin embargo, la preocupación oficial por el tema del ahorro de energía sucedió de manera formal en el *Plan de Energía* del Gobierno Federal aparecido en el año de 1980. Años más tarde, el Gobierno Federal emitió el *Programa Nacional de Energéticos 1984-1988*, en donde se reconocen los factores de la problemática nacional y se establecen las alternativas para su solución. Se establecen

las orientaciones estratégicas del incremento de la productividad del sector energético, el ahorro de energía y la diversificación de fuentes de abasto de energía.

En 1990, se publica el *Programa Nacional de Modernización Energética 1990-1994*, en donde de nueva cuenta el ahorro y uso eficiente de la energía juegan un papel medular en la consecución de los objetivos energéticos del país. Se reconoce que los resultados logrados con anterioridad son muy escasos por la falta de un esfuerzo integral con amplia participación. También se comenta el carácter estratégico del uso racional de la energía para disminuir los ritmos de crecimiento y las inversiones para crear más infraestructura eléctrica y petrolera, así como su estrecha relación con los aspectos ambientales.¹

Durante varios años se trabaja en esta materia dando estructura a las políticas que hoy en día rigen la cuestión energética de nuestro país. El desarrollo sustentable es definido como eje central de las políticas públicas de México en el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006. En 2001 se establecen las bases dentro del marco de cooperación México-Alemania para la *Promoción de Energías Renovables*, la cual forma parte del *Programa Gestión Ambiental y Uso Sustentable de Recursos Naturales* de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ), organismo de cooperación con operación mundial que promueve reformas complejas y procesos de cambio para fomentar el desarrollo sustentable.²

Este programa, establece los principios rectores de la Política Energética: soberanía energética, seguridad de abasto, compromiso social, modernización del sector, mayor participación privada, orientación al desarrollo sustentable y compromiso con las generaciones futuras; por lo que bajo este contexto, las fuentes de energía renovables juegan un papel primordial. Además, propone establecer las acciones necesarias para que, tanto el sector público, como el privado, puedan participar en nuevos proyectos con energías renovables, que incluyan a las tecnologías solar, eólica, geotérmica, minihidráulica, de biomasa y biogás, entre otras. Asimismo, se considera generación la conversión sucesiva de la energía de las fuentes renovables en otras formas de energía.³

De acuerdo a la Asociación Nacional de Energía Solar el potencial en México en cuanto a energía solar es de los más altos del mundo con una insolación media al día de 5 kWh/m².⁵ Por lo que gran atención es prestada a la transformación de Energía Solar.

Con esto, se crea el contexto para la creación de la Norma ambiental para el Distrito Federal, actualmente en vigor, la cual ‘establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en albercas, fosas de clavados, regaderas, lavamanos, usos de cocina, lavanderías y tintorerías’ en establecimientos de nueva construcción estableciendo que se debe de lograr como mínimo una sustitución del 30% de la energía anual. Y la Norma Mexicana de Energía Solar NMX-ES-001-2005 en la que se determina el Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua, así como los Métodos de prueba y etiquetado.

Por la secuencia de hechos, la Comisión Nacional de Energía (CONAE) y ‘en cumplimiento de su mandato ha tomado la iniciativa de diseñar e implantar el *Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México* (PROCALSOL) orientado a apoyar los proyectos que en México se están considerando y/o desarrollando, a fin de complementarlas de manera que en el plazo de la presente administración federal se amplié significativamente el mercado de calentamiento solar de agua en México’.⁴ Para todo esto ha sido necesaria una mayor participación del sector privado y del apoyo de la Comisión Federal de Electricidad, así como diferentes mecanismos de financiamiento, tales como los desarrollados por el Gobierno Federal conjuntamente con el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), el Banco Mundial (BM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

En cuanto apoyo económico se cita por ejemplo la Ley del Impuesto sobre la Renta (LISR) en su artículo 40 fracción XII: ‘Los contribuyentes del ISR que inviertan en maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables, podrán deducir 100% de la inversión en un solo ejercicio y con ello favorecer la protección del medio ambiente al disminuir el uso de combustibles fósiles’.

2. Introducción: Diseño de un colector solar de acero inoxidable

El uso de energía solar en México puede encaminarnos a la autosuficiencia en cuanto al abastecimiento ciertos bienes. Para esto, son necesarios dispositivos tales que permitan la transformación sustentable de los recursos naturales, ampliamente disponibles, en formas de energía accesibles para la población. Uno de estos recursos naturales en el que se centra el interés en este texto es la energía solar. La investigación respecto a supuestos viables sobre transformación de energía es una inversión sumamente sabia que permitirá garantizar la satisfacción de nuestras necesidades. El beneficio de transformar energía de una manera óptima tiene impacto en todos los niveles de la vida actual.

Al hacer uso del potencial en México de 5 kWh/m² por día de energía solar, significaría que en un m² y con un equipo solar de eficiencia de 50% sería el equivalente a recibir diario la energía contenida en un metro cúbico de gas natural, o bien, la de 1.3 litros de gas licuado de petróleo.⁵ Cabe mencionar que en el país existen desde hace más de cincuenta años varias pequeñas empresas que fabrican e instalan calentadores solares planos para aprovechar este potencial. En la actualidad operan además, un número importante de importadores de productos provenientes de Europa, Israel y China.

De acuerdo con la Asociación Nacional de Energía Solar, si en México se instalaran cinco millones de metros cuadrados de calentadores solares, en menos de 10 años, el gas LP equivalente dejado de consumir en los siguientes 20 años sería de 15 millones de toneladas, lo que además evitaría lanzar a la atmósfera casi 30 millones de toneladas de dióxido de carbono, CO₂⁶. Esto, si se considera que 1 m² de captador solar evita la emisión atmosférica de un equivalente de 250 kg de CO₂ al año⁴, principal gas de efecto invernadero causante del cambio climático.

Por otro lado, los beneficios también se pueden observar en una mejora en el aspecto económico. Mensualmente, una familia de 5 personas, puede ahorrar entre 80 y 100 kg de gas, dependiendo del sistema y la operación que se le dé al calentador solar. Si se considera que el precio del gas LP en julio de 2004 era de poco más de 7 pesos por kilogramo, el ahorro mensual será de 560 a 700 pesos. De tal suerte que la inversión inicial al adquirir el calentador solar se puede recuperar, de acuerdo con diversos especialistas, en un plazo de 3 a 5 años.³

2.1 Justificación

- El uso de energía renovable mediante un colector solar es una decisión anticipada a la problemática energética y ambiental. Así, la propuesta de esta investigación consiste en el entendimiento, diseño y creación de un dispositivo de aprovechamiento de energía solar que permita alcanzar este objetivo generalizado sobre transformación eficiente de energía a nivel doméstico.
- Actualmente nos encontramos en el inicio de un entorno propicio que fomente el empleo de estas fuentes de energía, ya que por el momento existe gran impulso financiero por parte de organismos gubernamentales a las industrias que fomenten o hagan uso de energías renovables.
- Con el apoyo del Instituto Mexicano del Inoxidable (IMINOX), se propone el uso de acero inoxidable para la construcción de equipos transformadores de energía solar, usando como referencia el documento *Stainless Steel in Solar Energy use*⁷ el cual muestra distintas propuestas del uso de este material. Así, este proyecto propone este material como una opción factible para ser empleado en la construcción de un colector solar, debido a sus propiedades térmicas y mecánicas (Apéndice A.4). Esto finalmente impacta en algunas ventajas técnicas en cuanto al costo de inversión y del ciclo de vida de éste; a su vez brinda la posibilidad de sustituir a otros materiales, por ejemplo acero al carbono, Cu, Zn, Al, plástico, etc. Ya que durante los últimos años, en especial, los precios del aluminio, cobre, zinc y níquel se han incrementado.
- La atención también se enfoca en la apertura de mercado de energía solar de productos fabricados en el país ya que actualmente existen pocos fabricantes nacionales de la totalidad de los componentes de un colector solar; aunado a que un alto porcentaje de colectores solares son importados. Sin embargo, cabe mencionar que la investigación e innovación al respecto es considerablemente prolífera.
- Este trabajo está alineado totalmente con el programa PROCALSOL de la CONAE, mencionado con anterioridad, del cual se citan textualmente los objetivos así como la meta global:
 - Meta global: Tener instalados para el 2012 un millón ochocientos mil metros cuadrados de calentadores solares de agua en México. Esta medida fue definida con base en las evaluaciones económicas del mercado actual de calentadores solares en México, para los diferentes sectores considerados. Asimismo se consideró un

escenario esperado de evolución de metros cuadrados de calentadores solares instalados en México, con base en la tendencia actual de crecimiento del mercado y los potenciales del uso de la energía solar para el calentamiento de agua en México⁴

- Objetivos
 - Impulsar en los sectores residencial, comercial, industrial y de agro-negocios de México el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua, a través de fortalecimiento de los mecanismos actualmente en operación y del diseño e implementación de esquemas nuevos e innovadores que lleven a este objetivo
 - Garantizar el crecimiento del mercado del calentamiento solar se lleve a cabo con un nivel de calidad adecuado en los productos y servicios asociados
 - Favorecer el desarrollo de la industria nacional entendida como la que está integrada por fabricantes, diseñadores de sistemas, distribuidores e instaladores de equipos
 - Promover la adopción de tecnología desarrollada por los centros de investigación nacionales

Con este contexto, el objetivo de este trabajo consiste en el diseño, construcción y evaluación de un colector solar con placa de absorción de acero inoxidable, costeable y eficientemente funcional. Para lo cual a continuación se establece la justificación, definición del problema, objetivos específicos y metodología.

2.2 Definición del problema

- Los colectores solares foto-térmicos para aplicación doméstica son una tecnología establecida actualmente a nivel comercial en México. Sin embargo, no tienen la penetración en el mercado debido a su aún alto costo para la población en general, y como consecuencia de esto, no se logra el nivel de explotación adecuado de la energía solar disponible.
- Los componentes de los colectores solares no son totalmente manufacturados para la mayoría de los casos en nuestro país, incrementando con esto su costo.
- El costo principal de un colector lo constituye la placa de absorción, para la cual se emplean materiales susceptibles de deterioro al contacto con agua, acortando con esto el tiempo de vida y confiabilidad en los equipos solares.

- El uso de acero inoxidable en los colectores solares es prácticamente inexistente en su manufactura a nivel mundial.

2.3 Objetivos

General:

- Diseño, construcción y evaluación, en función del costo y la eficiencia, de un colector solar con placa de absorción de acero inoxidable, cuyos **componentes primarios** estarán hechos en México.

Específicos:

- Aplicar y adaptar, en función del **costo** (costo material, manufactura, tiempo de vida y mantenimiento), elementos disponibles en el mercado mexicano para la construcción del colector.
- Analizar el impacto, en la **eficiencia** del colector construido, de las siguientes variables:
 - Geometría de la placa de absorción de acero inoxidable
 - Pérdidas de calor por convección
 - Superficie selectiva
- Realizar la evaluación del comportamiento térmico del colector diseñado
- Realizar el análisis, mediante simulación computacional, de los fenómenos de transporte ocurridos en el colector solar

2.4 Hipótesis de trabajo

- El **prototipo de colector solar de acero inoxidable** diseñado entrega una eficiencia térmica mayor a 0.4. Se considera, como la aplicación mínima de referencia, un colector solar doméstico cuyo objetivo es satisfacer del 60-80% de las necesidades térmicas a una temperatura de 45°C de 1 personas (~40 L/día), diseñado de acuerdo a los índices de radiación incidente y las variaciones del clima en CIDETEQ-Pedro Escobedo.
- El costo de producción, distribución y mantenimiento, así como la vida útil de éste se propone como una opción factible para ser empleado en las casas de México

2.5 Metodología

FASE I

- Estado del arte

- Eficiencia térmica de colectores solares
- Selección de diseño de Colector Solar
 - Análisis en balance eficiencia/costo
 - Recursos disponibles

FASE II

- Selección de tipo de acero inoxidable por componente
- Análisis de los fenómenos de transporte soportado con simulación computacional
- Análisis de mejoras de acuerdo a
 - Geometría del colector
 - Pérdidas de calor por convección
 - Superficie selectiva
- Incorporación de resultados
- Balance eficiencia térmica/costo del diseño
- Estudio de Factibilidad

FASE III

- Diseño final de colector solar
- Construcción de prototipo
- Pruebas de operación
- Manual de operación/especificaciones

2.6 Resultados y entregables esperados

- Diseño final del colector solar
- Prototipo de colector solar
- Pruebas de operación
- Especificaciones por partes

2.7 Diagrama de Gantt

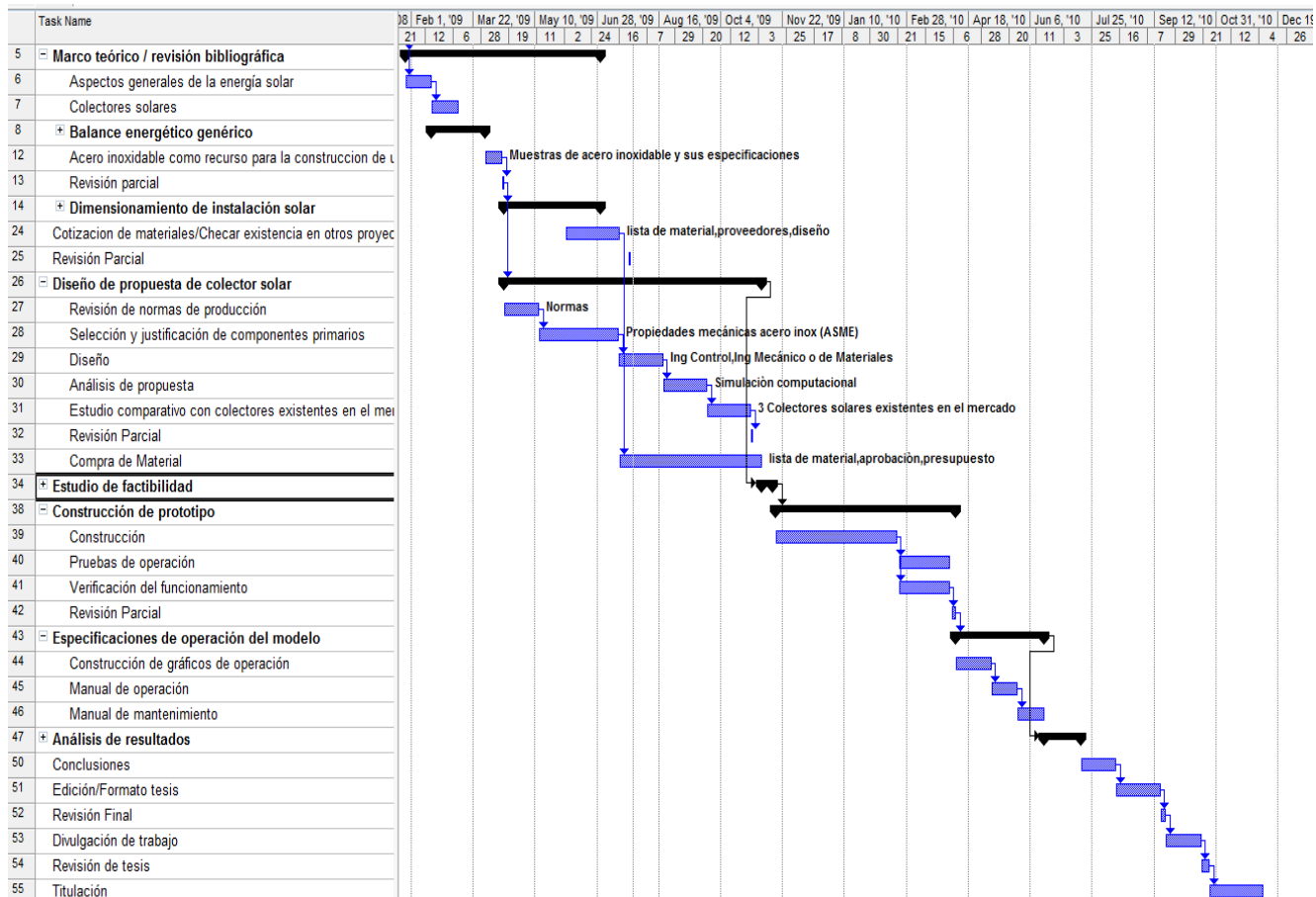


Figura 1. Diagrama de Gantt

3. Marco teórico

3.1 Colectores solares foto-térmicos

Un colector solar es un intercambiador de calor que convierte energía solar en calor útil. Básicamente consiste en un captador de la radiación solar que transfiere energía térmica a un fluido de trabajo. Debido a la naturaleza de la radiación solar, así como los diferentes tipos de aplicaciones en las cuales la energía térmica puede ser usada, el análisis y diseño de los colectores solares presentan únicas y particulares características en cuanto a la transferencia de calor, propiedades ópticas y ciencia de materiales.

Este trabajo usa como referencia diversos libros y artículos publicados en revistas especializadas; uno de los citados recurrentemente en este texto es *Solar Engineering*⁸ de Duffie y Beckman, uno de los más completos en el campo

3.1.1 Clasificación

La clasificación de los colectores solares puede basarse en: el fluido de trabajo, a la presencia de algún mecanismo para seguir la trayectoria del Sol a través del día/año y al tipo de colectores, ya sea concentradores (parabólicos, parabólicos compuestos) o no concentradores (planos, tubos al vacío) de radiación solar.⁹

3.1.1.1 Fluido de trabajo

La elección del fluido de trabajo normalmente es dictada por la aplicación. Así, los colectores de aire son convenientes para aplicaciones de secado por convección o para ambientar una locación, mientras que los colectores de líquido son más adecuados para aplicaciones de calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial. Para ciertas aplicaciones a mayor temperatura, son usados aceites que proporcionan mejores propiedades de transferencia de calor. Sin embargo, debido a su costo y abundancia los fluidos de trabajo más usados son el agua y el aire. La Tabla 1 muestra un comparativo de las ventajas y desventajas de sistemas de aire y de agua

Características	Líquido	Aire
Eficiencia	Generalmente más eficiente para un diferencial de temperatura dado	Normalmente operan con más baja eficiencia
Configuración del sistema	Puede ser fácilmente combinado con el servicio de agua caliente y sistemas de enfriamiento	Puede ser usado para precalentar agua
Protección anticongelante	Requiere de anticongelante e intercambiadores de calor que incrementan el costo y reducen eficiencia	No requerido
Mantenimiento	Constante, debido a fugas, corrosión y ebullición	Bajo. Las fugas se pueden reparar con cinta, pero son difíciles de encontrar
Requerimientos de espacio	La tubería toma valores estandarizados	La tubería toma valores estandarizados
Operación	Poca energía requerida para bombear	Más energía es requerida para sopladores, además el ruido es una desventaja
Costo	Colectores cuestan más	Almacenamiento cuesta más
Estado del arte	Bastante atención por parte de la industria	Poca atención por parte de la industria

Tabla 1. Tabla comparativa colectores de líquido y de aire⁹

3.1.1.2 Con seguimiento y estacionarios

Para obtener una mayor aprovechamiento de la energía solar, es conveniente buscar la incidencia normal de los rayos solares en todo momento. Así, existen colectores diseñados para modificar su orientación de acuerdo a la posición del sol, optimizando la intercepción de la radiación solar. Para esto, todas las relaciones geométricas son usadas para determinar la trayectoria que los colectores seguirán. Estos sistemas pueden ser automatizados para un seguimiento continuo. En otros sistemas se prefiere un seguimiento menos intensivo, con únicamente cambios de posición temporales, es decir que se encuentran fijos a ciertos ángulos y pueden cambiar de posición con los cambios estacionales. Para aplicaciones menos demandantes se prefieren sistemas fijos, como los que trataremos en este trabajo. Se elige una única orientación que depende de la localización geográfica y no se mueve a lo largo de toda su vida útil.

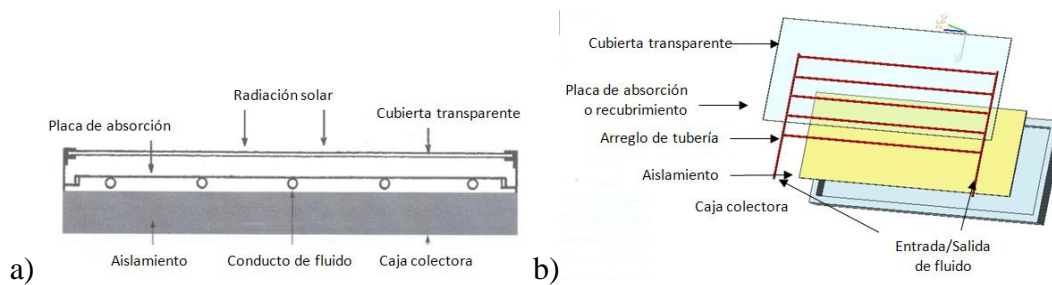


Figura 2. a) perfil y b) Isométrico de un colector de placa plana

3.1.1.3 Colectores no concentradores

Para aplicaciones de agua caliente, en el mercado, los tipos habituales de colectores son los planos y los de tubo al vacío. En esta sección se describirán las principales características de los colectores planos, siendo de éste tipo el que se abordará en esta investigación. Una descripción sobre los colectores concentradores y de tubos al vacío se encuentra en el Apéndice A.2.

El colector plano es el dispositivo solar más común en operación hoy en día, ya que es económico, su construcción es relativamente sencilla y es apropiado para entregar energía a temperaturas no mayores a 100°C . Su funcionamiento, tratando de limitar pérdidas, está basado en la captación de la radiación solar no concentrada para transformarla en energía térmica. La mayoría de los modelos comerciales se han desarrollado usando como referencia las ideas básicas del funcionamiento del colector plano.

Un colector solar plano se forma de los principales componentes, mostrados en la Figura 2:

Cubierta transparente. La radiación es captada a través de la cubierta transparente, cuyo objetivo es limitar las pérdidas de calor. El material más utilizado en la cubierta es el vidrio, y se utiliza en cubierta sencilla, doble o triple. Suprime principalmente pérdidas por convección aunque también puede suprimir algunas pérdidas por radiación y reducir la captación de energía mediante procesos de reflexión y absorción.

Superficie absorbente o de absorción. Superficie normalmente ennegrecida, la cual debe absorber la mayor parte de la radiación solar incidente, la que a su vez se calienta. Para limitar pérdidas por radiación, transmisión y convección, ésta a su vez es aislada colocando debajo un material con baja conducción térmica. Para mejorar la eficiencia de absorción, la superficie puede ser recubierta con materiales especializados como las superficies selectivas.

Ductos de circulación. Es en donde el fluido de trabajo pasa intercambiando el calor captado por la placa de absorción. Ésta puede ser de diversas formas, sin embargo usualmente se usan tubos por ser una geometría disponible en el mercado. Es primordial conocer el material, el diámetro o longitud nominal de los mismos, así como el número de tubos y el espaciamiento entre los mismos. Los materiales más usuales para los ductos de circulación son el cobre, el aluminio y el acero.

Material aislante. En la parte inferior y los lados del colector es conveniente disminuir las pérdidas de calor hacia el ambiente. El espesor de este componente es variable y determinante para la eficiencia. Los materiales más comunes son plásticos, corcho, fibra de vidrio, fibra de roca e inclusive aire.

Caja del colector. Todo el conjunto se encuentra dentro de una caja que le da integridad al sistema. Pueden ser de distintos materiales, desde madera hasta acero inoxidable.

3.2.1. Geometrías de la placa de absorción

La placa de absorción es el componente más complejo de un colector plano, ya que en ella ocurre la absorción de la energía solar.⁷ Una gran variedad de diseños están disponibles hoy en día para colectores de agua y de aire. En la Figura 3 se aprecian varios cortes transversales de estos arreglos:

El colector plano más común consiste de tubos anexados a una placa de metal mediante soldadura o uniones mecánicas, buscando que favorezcan la transferencia de calor. El arreglo que usa placas onduladas con ductos internos brinda una buena eficiencia como placa de absorción ya que los pasajes hidráulicos pueden ser diseñados optimizando el flujo del fluido así como la transferencia de calor. Otro tipo usa el diseño en donde el fluido fluye directamente sobre las placas corrugadas, sin usar ningún ducto de circulación.

Para colectores que usan al aire como el fluido, la placa de absorción requiere una mayor área. Para compensar esta desventaja, se ha experimentado con materiales con superficies rugosas para producir turbulencia, y así, incrementar la transferencia de calor. Otro acercamiento es el uso de materiales en forma de panal de abeja o arreglos de aletas ya sea entre la cubierta transparente o el fluido de trabajo y el captador.

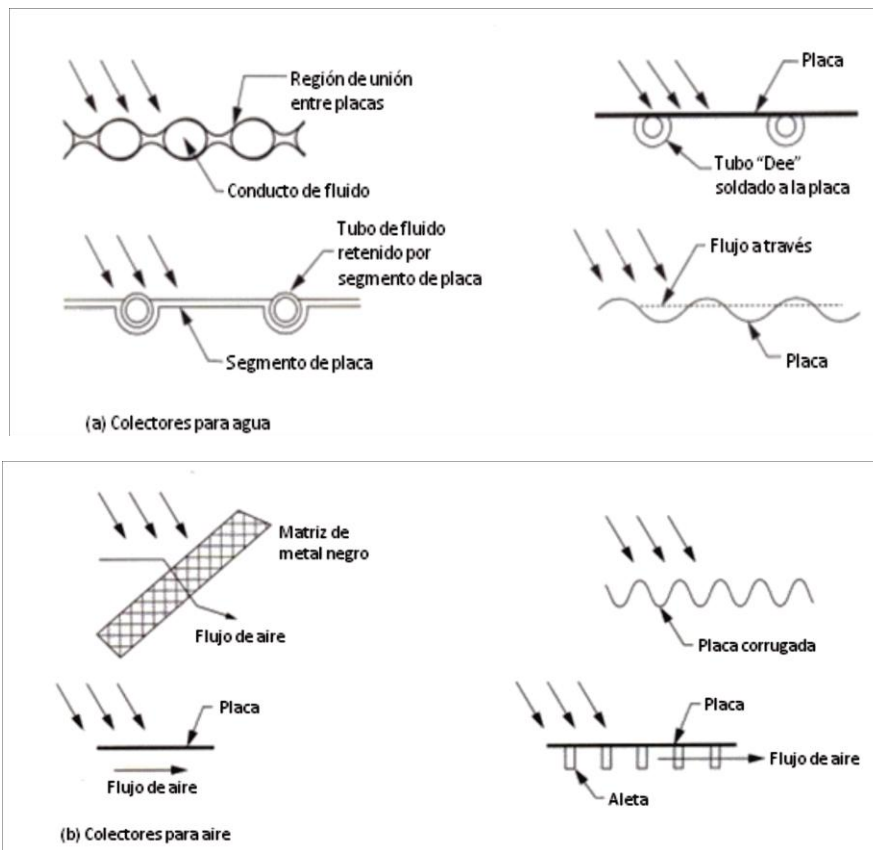


Figura 3. Diseños de colectores para agua (a) para aire (b)⁹

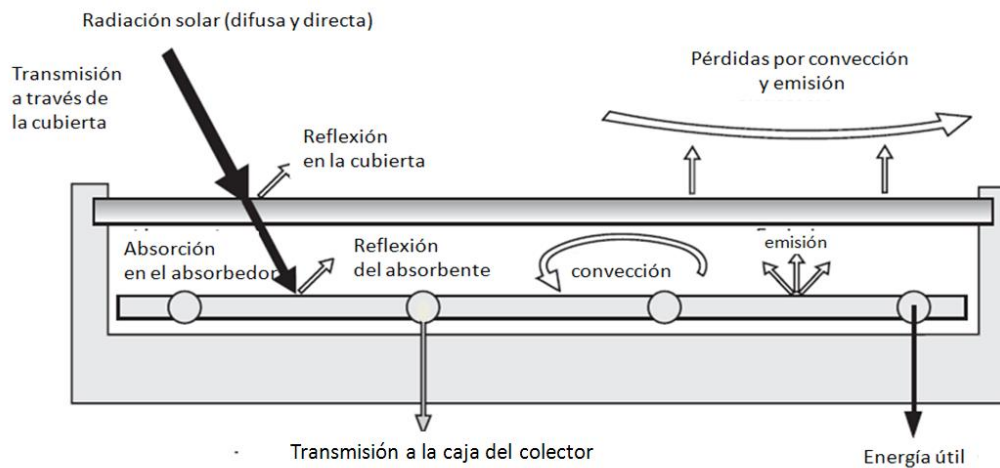


Figura 4. Esquema de las interacciones de energía de un colector plano con cubierta

3.3 Eficiencia teórica

En los sistemas de conversión de energía foto-térmica, se busca captar la energía solar y transformarla en calor útil hacia algún fluido de trabajo. También se busca en algunas aplicaciones que la temperatura de operación del sistema sea lo suficientemente alta para que su disponibilidad térmica sea satisfactoria. Para obtener una relación para la eficiencia térmica de un colector solar en general, se definen las interacciones del colector de interés con el entorno.

3.3.1 El colector solar como sistema

Si se analiza el colector como un sistema las principales interacciones de energía se esquematizan en la Figura 4. Una serie de fenómenos de transferencia de calor es observada en los distintos componentes del colector, por lo que cada uno de éstos impacta en la eficiencia global del colector.

3.3.1.1 Intercambio de calor radiado por el Sol con el captador de energía

El Sol, considerado como un cuerpo negro, emite radiación que se traduce en calor recibido en el área de apertura del captador A_a . De este modo el calor recibido por el colector por parte del sol se describe¹⁰

$$Q_{s \rightarrow c} = A_a \sigma (t_s + 273.15)^4 \quad (1)$$

Donde $\sigma = 5.6697 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ es la constante de Stefan-Boltzmann, t_s [°C] es la temperatura de la superficie del Sol. Si el captador se comportara como un cuerpo de absorción perfecto, como un cuerpo negro, a su vez radiaría energía proporcional a la temperatura del colector t_c ⁴ y a el área del colector A_c . Si se considerara que entre el colector y el Sol no hay ningún otro cuerpo, una fracción de ésta llegaría al Sol con un valor descrito por la siguiente relación,

$$Q_{c \rightarrow s} = A_c \sigma (t_c + 273.15)^4 \quad (2)$$

Sin embargo, es importante notar que la totalidad del calor emitido por el cuerpo negro, el Sol, no sólo depende de su temperatura sino que también tiene una dependencia con las longitudes de onda de la radiación emitida.

Así, para el caso de superficies reales, es decir, que no se comportan idealmente como cuerpos negros ya que pueden emitir o absorber radiación de manera diferente para diferentes longitudes de onda, se puede determinar la emitancia hemisférica monocromática ε . Definida conceptualmente como la relación entre la radiación emitida por una superficie real con respecto al valor obtenido para un cuerpo ideal negro¹¹, y matemáticamente con la siguiente expresión, cuyos valores van $0 < \varepsilon < 1$, para el caso del colector:

$$\varepsilon = \frac{Q_{emitido}}{Q_{cuerpo\ negro}} \quad (3)$$

Generalmente, a temperatura ambiente, la emitancia de superficies de metales pulidos es menor a 0.2 y la mayoría de las superficies no selectivas oscila entre 0.8 y 1.

Usando estas ecuaciones y considerando que en realidad entre el colector y la fuente de radiación se encuentra aire, en vez de la temperatura del Sol se aproximan estas relaciones empleando la emitancia y temperatura del medio ambiente, ε_a y t_a , respectivamente. Con esto se encuentra que para el intercambio de energía entre el captador y el medio ambiente las ecuaciones (1) y (2) se pueden reescribir de la siguiente forma,

$$Q_{a \rightarrow c} = A_a \varepsilon_a \sigma t_a^4 \quad (4)$$

Del mismo modo se obtiene la radiación del colector hacia el medio ambiente con la emitancia ε_c y temperatura del colector t_c .

$$Q_{c \rightarrow a} = A_c \varepsilon_c \sigma t_c^4 \quad (5)$$

Para el caso especial de un colector plano se considera $A_a = A_c$.

3.3.1.2 Energía óptica absorbida por el captador

Debido a la naturaleza electromagnética de la energía con la que se está trabajando, un estudio a profundidad de sus propiedades ópticas es esencial. Sin embargo, el alcance de este texto nos permite únicamente recurrir a las definiciones ya establecidas de estos parámetros ópticos. Así, la energía que finalmente recibe el captador para ser transmitida se puede describir con la ecuación(6)¹⁰ expresada de manera genérica para los diversos tipos de colectores solares,

$$Q_{opt} = A_a \rho_{es} \tau_t \alpha_c R S G_t \quad (6)$$

En donde ρ_{es} es la reflectancia especular del espejo concentrador (en el caso de colectores concentradores de energía), τ_t transmitancia de cualquier cubierta transparente, A_a el área de apertura del colector, S el factor de sombra del área de absorción, que es la fracción de la apertura del colector no sombreada por el absorbedor, R el factor de intercepción de absorción, que es la fracción de rayo reflejado interceptado por la placa de absorción, G_t la irradiancia en la apertura del colector, α_c es la absorptancia de la placa de absorción.

La absorptancia es una propiedad de superficie que relaciona los flujos de radiación absorbido y recibido, se diferencia la absorptancia monocromática de la absorptancia total, que corresponden a una sola longitud de onda y a un conjunto de longitudes de onda, respectivamente. La transmitancia es la fracción de la radiación total incidente sobre un cuerpo que es transmitida por el mismo. Cuando se trata de colectores no concentradores de placas planas los valores ρ_{es} , R, S son igual a 1.

Se considerara que R, S, α_a , ρ_{es} y τ_t son constantes, dependiendo únicamente de los materiales usados y la precisión en la estructura del colector, de este modo, pueden ser agrupadas en el término constante de la llamada eficiencia óptica η_0 , o el producto de la transmitancia y absorptancia de la cubierta y del captador $\eta_0 = \tau_t \alpha$. Considerando nuevamente $A_a = A_c$ se obtiene la equivalencia de la ecuación (6)

$$Q_{opt} = A_c \eta_0 G_t \quad (7)$$

3.3.1.3 Transferencia de calor por distintos mecanismos

Las pérdidas térmicas en un colector pueden ser por alguno de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección o radiación.

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un proceso de propagación de energía en un medio por contacto molecular. Al existir un gradiente de temperatura dentro del medio, la Segunda Ley de la Termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo de la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. En estas circunstancias se dice que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura, es decir

$$q_{conducción} = -k \frac{\partial t}{\partial x} \quad (8)$$

Expresión matemática conocida como ley de Fourier, donde q denota el flujo de calor por unidad de área o densidad de flujo térmico en la dirección x , y k [W/m K] es la conductividad térmica del material que, usualmente, se considera constante. Sin embargo, si se cuenta con superficies perfectamente aisladas, en el balance total de energía éste término adquiere valores muy bajos, por lo cual se puede despreciar.

Por otra parte, el fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento del fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con el movimiento de éste. La velocidad del fluido que pasa sobre una placa metálica a cierta temperatura t_p mayor que la temperatura del ambiente t_a , tiene un efecto importante sobre la transferencia de calor en la superficie. Y la velocidad de enfriamiento de la placa tiene dependencia del fluido empleado. Así, el calor disipado por el sistema puede evaluarse en términos de la diferencia de temperaturas entre la superficie de éste y el fluido por medio de la ley de Newton del enfriamiento donde h_c [W/m² K], es el coeficiente de transferencia de calor, o el coeficiente de película.

$$q_{convección} = h_c(t_p - t_a) \quad (9)$$

$$Q_{convección} = h_c A_c(t_p - t_a) \quad (9')$$

El fenómeno de transferencia de calor por convección usualmente se clasifica como convección forzada o como convección libre o natural. La diferencia principal entre la convección forzada es que la velocidad lejos de la superficie se aproxima al valor de la corriente libre impuesta por una fuerza externa, mientras que en la convección natural, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura.¹¹

El fenómeno de pérdidas de calor por radiación fue considerado en la sección de intercambio de calor del colector con el Sol, ya que al considerar el colector como el sistema, éste pierde energía en la radiación de la forma $q_{radiación} = q_{c \rightarrow a}$ definida en la ecuación (5).

De manera total se tienen las pérdidas definida en la ecuación (10):

$$q_{perd} = q_{convección} + q_{conducción} + q_{radiación} \quad (10)$$

Las contribuciones por los distintos mecanismos de transferencia de energía pueden englobarse a través de U_L que es el coeficiente total de pérdidas de calor el cual no es un valor constante ya que

puede cambiar conforme los mecanismos de pérdida de calor varían con la temperatura. En la práctica el coeficiente de transferencia de calor se determina mediante el uso de correlaciones empíricas o recurriendo a la experimentación. Así, esta transferencia de calor total puede expresarse por una relación de la forma

$$Q_{perd} = U_L A_C (t_p - t_a) \quad (11)$$

En donde t_p es la temperatura promedio de la placa de absorción, t_a es la temperatura ambiente. Sin embargo, en este modelo se supone que la temperatura promedio de la placa es conocida. Dado que no es el caso, en este análisis se hace la aproximación y se considera $t_p = \frac{t_{f,e} - t_{f,i}}{2}$. Donde $t_{f,e}$ es la temperatura en °C del fluido a la salida del colector, mientras que $t_{f,i}$ es la temperatura del mismo a la entrada del colector.

3.3.2 Balance energético

En un balance de energía en el colector se observa que sólo una fracción de G_t puede utilizarse para calentar finalmente el fluido de trabajo. Esto, debido a que una parte de la energía solar incidente se pierde hacia los alrededores por conducción, convección y radiación hacia el medio ambiente debido a las características propias de reflexión de la cubierta y la placa de absorción, consideradas en $\eta_0 = \tau\alpha$. Otra fracción se aprovecha calentando el medio de trabajo y una fracción puede ser almacenada en el colector. Este balance de energía puede expresarse analíticamente como,

$$q_{opt} = q_{\text{útil}} + q_{perd} + \frac{du}{dT} \quad (12)$$

En donde q_{opt} es la energía óptica recibida por el captador, $q_{\text{útil}}$ es el calor útil por unidad de área que es transportado hacia el fluido de trabajo, q_{perd} por unidad de área y corresponde a las distintas pérdidas de calor que experimenta el colector y $\frac{du}{dT}$ es la tasa de cambio de la energía interna almacenada en el colector, con respecto al tiempo, la cual se considera despreciable en el estado estacionario.

Para la evaluación cuantitativa de la eficiencia de colectores solares de placas planas se puede considerar el modelo, simplificado, en la Figura 5. El cual consiste en una placa plana en la que los rayos solares incidan de manera aproximadamente normal al plano del colector.

Para el análisis se supone que la temperatura del captador es uniforme y constante y la energía útil se extrae de la parte trasera de la superficie mediante un fluido en circulación. En el modelo presentado se toman las siguientes consideraciones:

- El colector opera en estado estable
- La diferencia de temperatura entre la cara externa y la cara interna de la placa de absorción es despreciable
- El flujo de calor a través de las cubiertas y el fondo del colector es unidimensional
- La radiación sobre la superficie del colector es uniforme
- El firmamento se comporta para los efectos de radiación infrarroja como un cuerpo negro a una temperatura equivalente.

Ya que A_c , el área efectiva del colector, como ya se ha mencionado para el caso de un colector plano puede considerarse como $A_a = A_c$, y despreciando pérdidas por conducción en (10), se retoman las ecuaciones (7) y (10) por unidad de área:

$$q_{opt} = \eta_0 G_t$$

$$q_{perd} = h_c (t_p - t_a) + \varepsilon_c \sigma t_p^4 \quad (13)$$

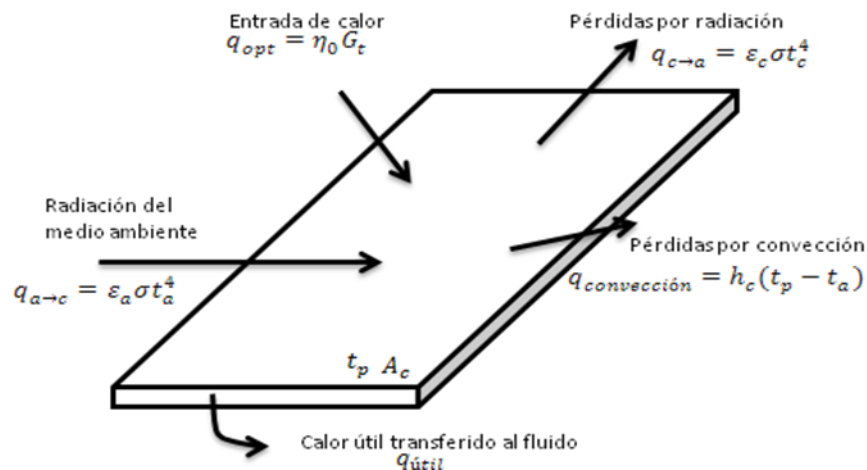


Figura 5. Representación de balance de energía para colector solar (a) de placas planas¹¹

Un balance de energía por unidad de área del colector, usando las ecuaciones (13) tiene la forma,

$$\eta_0 G_t = \varepsilon_c \sigma t_p^4 + h_c (t_p - t_a) + q_{\text{útil}} \quad (14)$$

Donde η_0 corresponde a la fracción de la radiación solar incidente absorbida por una sustancia, G_t es la irradiancia global recibida por el colector, ε_c es la emitancia de la superficie de la placa de absorción, o sea el promedio de la relación de la emisión de radiación infrarroja de un cuerpo real a la emisión de radiación de un cuerpo negro a la misma temperatura, σ es la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.6697 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, t_p es la temperatura de la superficie del colector en °C, h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $\text{W/m}^2\text{°C}$, t_a es la temperatura del medio ambiente en °C y $q_{\text{útil}}$ es la energía captada por el fluido en W/m^2 .

El rendimiento del colector se puede definir como la fracción de la radiación solar global o directa G_t incidente sobre su superficie que puede ser aprovechada como calor útil, es decir, la relación de eficiencia de conversión de energía solar a insolación, descrita en la ecuación (15)

$$\eta = \frac{q_{\text{útil}}}{G_t} \quad (15)$$

O bien,

$$\eta = \eta_0 - \frac{\varepsilon_c \sigma t_p^4}{G_t} - \frac{h_c (t_p - t_a)}{G_t} \quad (16)$$

Así, la eficiencia promedio se define como

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^T q_{\text{útil}} dT}{\int_0^T G_t dT} \quad (17)$$

Como se observa, para determinar analíticamente el calor útil y/o la eficiencia de un colector solar es necesario calcular primero las pérdidas. En la práctica, sin embargo, la eficiencia se determina experimentalmente según un intervalo finito de tiempo. En una prueba estándar este período es del orden de 15 min, en tanto que para fines de diseño el período de evaluación de tiempo puede ser de un día o un tiempo mayor.

En este trabajo se evalúan, para un flujo y propiedades ópticas fijas, la irradiancia, con un piranómetro, y la diferencia de temperaturas del fluido a la entrada y salida del colector, con un termopar.

3.3.3 Optimización de eficiencia, estado del arte

En todo diseño de ingeniería se busca disminuir las pérdidas de calor hacia los alrededores intentando siempre lograr el máximo aprovechamiento de energía solar con el mínimo costo posible.

Como se observó en las ecuaciones que definen la eficiencia, distintos parámetros pueden ser manipulados para dar el mayor rendimiento. **En la siguiente sección se describen, con mayor detalle, las variables que se sabe impactan considerablemente en el desempeño de un colector plano para aplicación doméstica.**

3.3.3.1 Fluido de trabajo

La primera y más conocida manera de proporcionar mayores temperaturas en el intercambiador es mediante la variación del **fluido de trabajo**. Distintas sustancias son empleadas de acuerdo a las propiedades caloríficas requeridas y del presupuesto disponible.

El fluido de trabajo es la materia, ya sea en fase líquida o vapor, que dentro del sistema de control transmite o absorbe energía para los fines esperados. La elección de éste depende básicamente de la aplicación final con el objetivo de hacer una evaluación de qué medios son necesarios para la transformación de la energía solar y como impactan éstos en una mejora en rendimiento.

Si en el colector el fluido intercambiador es el mismo que el fluido de trabajo, el sistema se ve simplificado influyendo en una reducción en costo/operación del equipo solar. Se citan algunas características deseables para un fluido de trabajo ideal:

- Alta estabilidad térmica, •Bajo punto de congelamiento ($\leq 0^{\circ}\text{C}$), •No flamable, •Baja presión de vapor (a altas temperaturas) •Alto punto de ebullición

En la Tabla 2 se observan propiedades de algunos fluidos de alta temperatura que son potencialmente usables en estas propiedades, pero como se observa, pueden ser flamables o simplemente de alto costo, por lo cual usualmente se utiliza agua o disoluciones de anticongelantes.

Fluido	t de aplicación (°C)	Propiedades
Aceites sintéticos Ej. Therminol VP1 (HCs aromáticos)	13-395	Flamable
Aceites minerales Ej. HCs parafinados	-10-300	Flamable
Aceites de silicón	-40-400	Flamable y alto costo
Sales de nitrato Ej. HITEC-XL	220-500	Punto de congelamiento $\geq 120^{\circ}\text{C}$ Estabilidad a altas temperaturas

Tabla 2. Propiedades de fluido de alta temperatura

3.3.3.2 Cubierta semitransparente

Otro factor posible consiste en **reducir pérdidas del captador por convección y radiación infrarroja** para lo que se incluye una cubierta o una doble cubierta semitransparente, sin embargo esto disminuye la eficiencia óptica y aumenta el costo.

En el caso de que la cubierta es un vidrio, cuando la radiación solar incide sobre éste, una parte de la misma es reflejada hacia el exterior, otra parte pasa directamente hacia el interior y la restante es absorbida por la masa del vidrio, de la cual las 2/3 partes son irradiadas hacia el exterior y el 1/3 restante pasa hacia el interior. Debido a su condición de sólido, el vidrio transmite el calor por conducción y, por su característica transparente, transmite el calor por radiación. En ambos casos intervienen fenómenos de convección superficial.

La Tabla 3 presenta algunas características de los materiales utilizados en las cubiertas transparentes de captadores solares¹¹. El empleo de materiales inadecuados de las cubiertas plásticas son causa frecuente de fallas del captador, debido a: decoloraciones, abrasiones, corrosiones, fisuras, roturas o deformaciones. Las cubiertas de cristal no presentan tantos efectos de degradación, pero frecuentemente aparecen fracturas, producidas por fatiga térmica o por una mala fijación de la cubierta. Además previo a la utilización de estos materiales es necesario someterlos a pruebas en cámaras ambientales de intemperismo acelerado, que incluyan radiación UV, humedad y temperatura.

Material	Transmitancia	t máxima °C	Resistencia a la intemperie
Polycarbonato (3 mm)	0.73-0.83	100-130	De pobre a media
Poliéster	0.8-0.87	140	De media a buena
Polietileno	0.9	50	Pobre
Polivinil Fluoruro	0.92-0.94	160	De buena a excelente
Fibra de vidrio reforzada (2 mm)	0.77-0.87	90	Buena
Acrílico(2 mm)	0.8-0.9	70-135	De media a buena
Vidrio (3 mm)	0.947	140	Buena
Vidrio templado(3 mm)	0.95	140	Excelente

Tabla 3. Algunas propiedades de cubiertas transparentes¹²

3.3.3.3 Superficie selectiva

Otro método comúnmente empleado para incrementar la eficiencia es el uso de **superficies selectivas**, cuya emisividad varía con la longitud de onda. Las pérdidas por radiación pueden llegar a reducirse hasta el 79% mediante el uso de superficies selectivas¹². Las superficies selectivas para aplicación solar se definen como los acabados con alta absorción (baja reflectancia) en la banda del espectro visible solar y que emiten la mínima radiación posible en el espectro de onda baja. La placa de absorción recubierta con una superficie selectiva constituye a menudo la parte más costosa de todo el equipo

Como se aprecia en la ecuación (16), obtenida con anterioridad, la eficiencia de la superficie selectiva depende de la absorción α , del coeficiente de transferencia de calor por convección h_c y de la emitancia ε_c . Una eficiencia máxima se alcanza cuando la ε_c y el h_c tienden a cero y la α a 1.

Esta combinación de características es posible de alcanzar puesto que el 95.19% de la radiación solar incidente se encuentra distribuida en longitudes de onda menores que 2.5 μm . Así, una superficie selectiva debe de tener propiedades correspondientes a una alta absorción monocromática en el espectro solar 0.3 a $\sim 2.5 \mu\text{m}$ y una emitancia monocromática muy baja en el infrarrojo $>2.5 \mu\text{m}$. De modo tal que para una superficie selectiva $\alpha \neq \varepsilon_i$ ($\alpha > \varepsilon_c$ para la mayoría de las aplicaciones de energía solar), mientras que una superficie no selectiva es aquella en que $\alpha = \varepsilon_c$.¹¹ Para aplicaciones en que la temperatura sea hasta 300°C, el punto de transición entre la absorción y la reflexión puede variar y moverse hacia menores longitudes de onda a medida que la temperatura de operación del colector aumenta.

Material	α (VIS+NIR)	ϵ (IR)
Oro	0.22	0.025 a 275 K
Hierro	0.44	0.11 a 468K
Óxido de zinc (pintura)	0.16	0.929 a 295 K
Níquel	0.40	0.1 a 310K
Cromo	0.42	0.29 a 715K
Aluminio	0.09	0.12 a 570K
Óxido de cobre en cobre ¹³	0.89	0.17
Óxido de cobre en aluminio	0.93	0.11
Níquel negro en hierro ¹³	0.81	0.17
Níquel negro en cobre ¹⁴	0.89	0.12
Óxido de cobalto ¹³	0.87	0.07
Fe dopado de Óxido de cobalto ¹³	0.92	0.08
Óxido de Cromo ¹⁵	0.87	0.088
Sulfato de plomo en Aluminio	0.89	0.20

Tabla 4. Tabla de propiedades ópticas de diversas superficies¹⁶

Tipo	Materiales
Materiales intrínsecos	Carburo de Hafnio, Tungsteno metálico, MoO3 dopado Mo, Trióxido de Europio Eu ₂ O ₃ , Trióxido de Renio ReO ₃ , Pentaóxido de Vanadio V ₂ O ₅ , Hexaboruro de Lantano
Arreglos absorbedor-reflector	Semiconductores impuros, Níquel negro, Cobre Negro, Cromo Negro, Hierro Negro, Óxido de Cobalto, Óxido de Tungsteno, Sulfuro de Cobre, Zinc convertido químicamente, Acero inoxidable coloreado, Recubrimiento Alcoa, Semiconductores puros, Silicón, germanio, PbS, Siluro y carburo metálicos
Stacks de interferencia multicapa	Dieléctrico metal dieléctrico
Semiconductores	Semiconductores, Óxidos inorgánicos metálicos
Combinación de reflectores	Negros orgánicos, Pinturas de polvo metálico pigmentado
Trampas ópticas/Mezcla dendrítica	Tungsteno, Níquel y Aluminio
Materiales compuestos	Películas metálicas-aislantes, Películas semiconductoras-aislantes
Efectos cuánticos	InSb en plata y sustrato de aluminio

Tabla 5. Resumen de investigación sobre superficies selectivas¹⁷

Existen varios mecanismos para producir materiales con estas propiedades, dependiendo de la temperatura a la que se trabaje; un mecanismo consiste en depositar una película delgada de alta absorción para radiación solar por medio de reacciones químicas y el uso de un sustrato que tenga una emisión pobre de radiación de onda larga (infrarroja).¹⁸

Las superficies selectivas más comunes son películas de óxidos metálicos sobre sustratos metálicos, por ejemplo las de CuO, Cu₂O, Fe₃O₄, etc. Las superficies selectivas de óxido de cobre y níquel negro fueron de las primeras usadas en la práctica. En la Tabla 4 se muestran algunos valores de α y ε para diversas superficies a distintas temperaturas, incluyendo superficies selectivas. En la Tabla 5 se muestra un resumen de materiales investigados como superficies selectivas hasta 1981.

3.4 Comparativo de eficiencia

Al comparar el desempeño de distintas configuraciones de colectores planos (A.2), se observan diferencias significativas en las curvas de la eficiencia de cada uno de acuerdo al diseño.

Los tres tipos más empleados son esquematizados en la Figura 6 a). En la Figura 6 b) se observa la eficiencia en función de la diferencia de temperatura a la entrada del colector con la t_a ; se aprecian también las temperaturas de operación. La Tabla 6 contiene valores de los coeficientes globales de pérdidas de calor, así como la eficiencia óptica. Como se observa, los tubos al vacío presentan el mejor comportamiento para diversas aplicaciones.

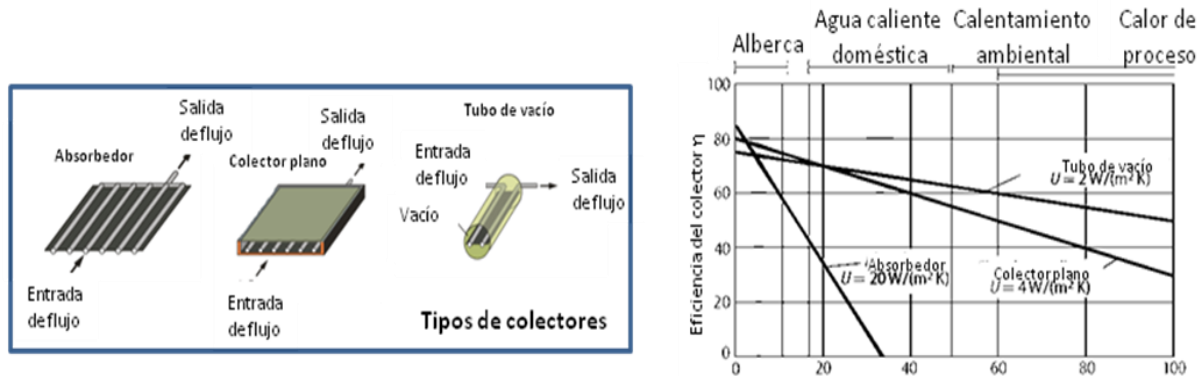


Figura 6. a) Tipos de colectores y b) Eficiencia en función de $x = \frac{t_{f,i} - t_a}{G_t}$

Colector	Rango T(°C)	Eficiencia óptica	Coefficiente global de pérdidas (W/°Cm ²)
Sin cubierta	10-40	0.9	15-25
Cubierta simple	10-60	0.8	7
Cubierta doble	10-80	0.65	5
Superficie selectiva	10-80	0.8	5
Tubos de vacío	10-130	0.7	2

Tabla 6. Eficiencias ópticas y pérdidas globales de transferencia de calor para distintos colectores¹⁹

4. Dimensionamiento del colector prototipo. Caso Querétaro

El dimensionado básico del diseño de un calentador solar está determinado por el porcentaje de la energía solar que realmente se aprovecha para calentar el agua, lo cual finalmente dependerá de los siguientes factores¹²:

- **la energía disponible y condiciones climáticas**
- **la utilización**
- **las condiciones de operación y diseño**

En el caso específico del prototipo del colector de acero inoxidable a construir, a continuación se da una descripción con mayor profundidad del impacto de estos factores.

4.1 Energía solar disponible y condiciones climáticas

La estimación de la energía solar disponible, la orientación e inclinación adecuada del diseño así como las condiciones del entorno del sistema solar están definidas de acuerdo al lugar en donde será ubicado el colector solar. Para fines de este proyecto se determina CIDETEQ, en Pedro Escobedo, Querétaro, México, como el punto de interés para el cual, de acuerdo a su ubicación geográfica de latitud 20.21°N y longitud 100.19°O, se analiza información meteorológica y solarimétrica.

4.1.1 Recurso disponible

La radiación solar global, sobre el plano del colector, es el parámetro climático más importante para el dimensionamiento del sistema. Es importante notar que la eficiencia del colector solar aumenta cuando la radiación solar es más intensa. Es por ello que un mismo calentador solar será más eficiente en México que en Europa o África del Sur, en donde los índices de irradiación son menores. De esta forma la energía solar es mejor aprovechada y las pérdidas de calor del calentador son menores mientras mayor sea la temperatura ambiente.

Para conocer el valor de la radiación total diaria media o de valores de irradiancia mínima y máxima es importante contar con una buena base de datos, validada por mediciones realizadas con sensores normalizados o contar en su defecto con modelos ajustados que permitan obtener valores confiables

de la energía solar disponible. La mejor estimación de la radiación será aquella obtenida a partir de datos medidos directamente en el punto de interés; entre más información histórica se tenga al respecto, brindará una estimación del comportamiento temporal a través del año.

Como referencia para este trabajo se emplea la información sobre radiación solar monitoreada por la red administrada por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua. La función principal de una Estación Meteorológica Automática, es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas (dirección del viento, dirección del viento de ráfaga, velocidad del viento, velocidad del viento de ráfaga, temperatura ambiente promedio, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, radiación global), para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 o 3 horas por estación.

Se inicia la recolección de datos a partir de junio del 2009 de la estación ubicada en Huimilpan, Querétaro, **la cual es la más cercana al punto de interés**. La información de EMAS-Huimilpan será considerada como referencia para hacer un comparativo con los datos obtenidos en CIDETEQ-Pedro Escobedo en donde se instaló una estación meteorológica comercial Vantage ProTM de la cual se cuenta con información desde abril del 2007 hasta agosto 2008. Los parámetros monitoreados en este lapso de tiempo incluyen radiación solar global, difusa y directa, temperaturas, velocidades y dirección de vientos, humedad relativa y razón de lluvia, entre otros. La proporción de radiación directa y difusa, la velocidad y la dirección del viento se consideran factores climáticos de segundo orden que no tienen una influencia significativa en la eficiencia del sistema.¹²

Se busca que los datos obtenidos a través de CIDETEQ-Pedro Escobedo tengan un comportamiento similar a los medidos por EMAS-Huimilpan, con el objetivo de que éstos últimos sean considerados para este estudio. Cabe señalar que la distancia entre un punto y otro es de aproximadamente 13 km y la diferencia en altura s.n.m. es de ~360 m. Esta verificación brinda la oportunidad de hacer uso de la información monitoreada por 16 meses en CIDETEQ y realizar un análisis del comportamiento de la radiación solar en el punto de interés.

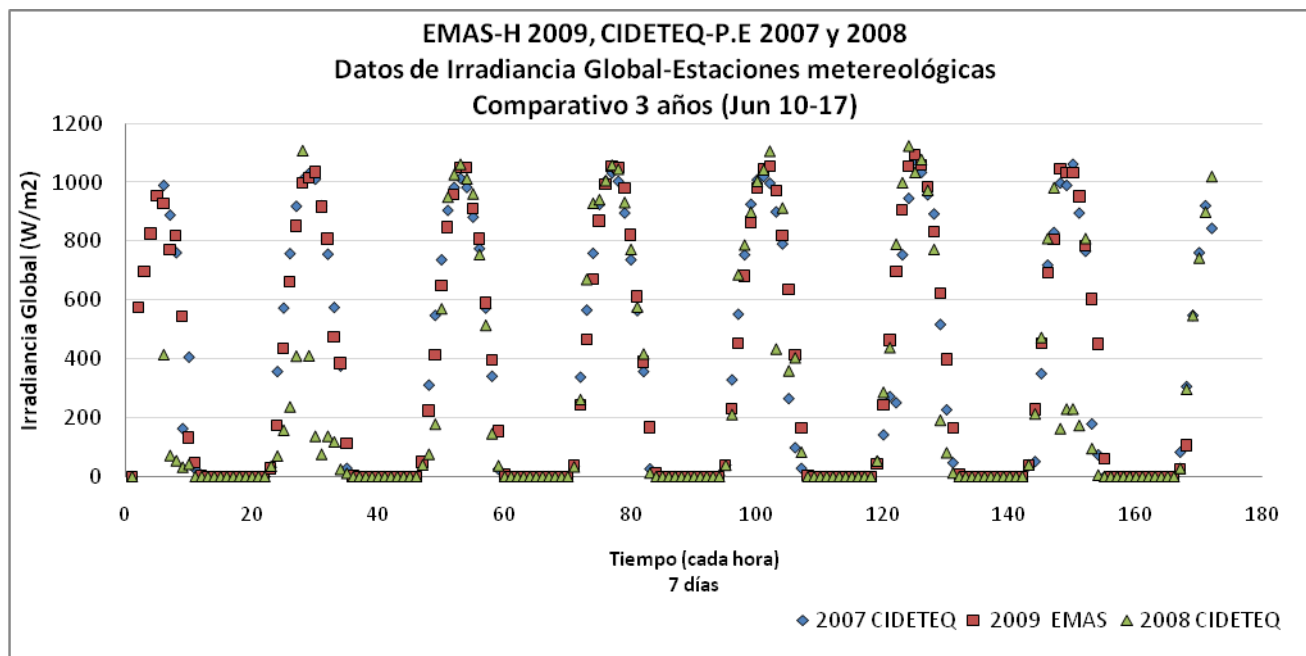


Figura 7. Datos de Irradiancia Global 2007 CIDETEQ-P.E, 2008 CIDETEQ-P.E y 2009 EMAS-H

4.1.1.1 Validación de información

Los datos con los que se cuenta sobre irradiación –y otras variables climatológicas- deben de ser validados para obtener confiabilidad, debido a las distintas condiciones en las que fueron obtenidos.

Se considera una muestra de 7 días del mes de junio y se analizará el impacto de la variación con herramientas estadísticas básicas debido a que 1) Son provenientes de dos fuentes distintas: EMAS-Huimilpan y CIDETEQ-P.Escobedo, 2) El año y período de tiempo en el que se tomaron las mediciones son distintos, 3) El intervalo de tiempo en la que se toman mediciones es distinto: para EMAS-Huimilpan el intervalo de tiempo es de 1 hr y para CIDETEQ-P.Escobedo es de 0.5 h y 4) Se mide diferentes tipos de radiación: para EMAS-Huimilpan se cuentan con datos de radiación global y para CIDETEQ-P.Escobedo se tiene información de los tres tipos de radiación.

Los primeros datos obtenidos vía internet de la estación EMAS-Huimilpan tomados cada 1 h corresponden al periodo del 10 al 17 de junio del 2009; usándolos como referencia, son comparados con los datos obtenidos en CIDETEQ, tomados cada 0.5 h, para el mismo lapso de tiempo (10 al 17 de junio) de los años 2007 y 2008. Para hacer la comparación entre estos dos conjuntos de datos se eliminaron los datos correspondientes a las medias horas de la estación CIDETEQ, reduciendo su número a la mitad.

En la Figura 7 se muestra una comparación visual de los datos de irradiancia global para los mismos 7 días pero para 3 distintos años. Por lo que se observa, existe una gran similitud entre los datos obtenidos. Con esto se puede indicar que:

- Existe consistencia para las mediciones en CIDETEQ-P.Escobedo entre 2007 y 2008
- A su vez, existe congruencia con los datos obtenidos por otra fuente de información, EMAS-Huimilpan.

Una vez verificado que los datos se encuentran dentro de un mismo rango, a pesar de la gran variación de los procesos de medición, se analizan las curvas de distribución de la irradiancia solar a través del día. La Figura 8 muestra el comportamiento de la irradiancia solar para el rango de 7 días considerado.

Como es sabido, los fenómenos meteorológicos tienen un gran impacto sobre la energía solar disponible. Lo cual se puede ejemplificar claramente en la Figura 8.b) en la que se observa un día con menores valores de irradiancia global. Esta información es complementada y verificada con mediciones de la estación meteorológica de CIDETEQ-P. Escobedo 2008 en la que se reportan porcentajes de Precipitación diferentes a cero, indicando 4 días nublados con lluvia.

Al realizar la integración de la irradiancia a través del día, se obtiene la insolación diaria para un día del mes de junio empleando la ecuación (18):

$$H = \Delta T \sum_{i=1}^N G_N \quad (18)$$

donde $\Delta T = 3600$ s y $N=14$. En la Tabla 7 se ejemplifica el cálculo realizado para el día 6/11/2007, obteniendo la equivalencia de la irradiación en MJ/m^2 y kWh/m^2 día.

Con el promedio de los valores obtenidos para cada día de un mes –del modo ejemplificado–, se puede conocer la disponibilidad de energía solar a través del año, conociendo los niveles máximos de irradiancia y la distribución a través del día. Se aprecian valores alrededor de $\sim 8 \text{ kWh/m}^2$ para un día de junio. Sin embargo, en la distribución mostrada en la Tabla 7 se consideró un día muestra nublado, como se aprecia para el 6/11/2008, para tener una idea del rango de un día con poca radiación directa.

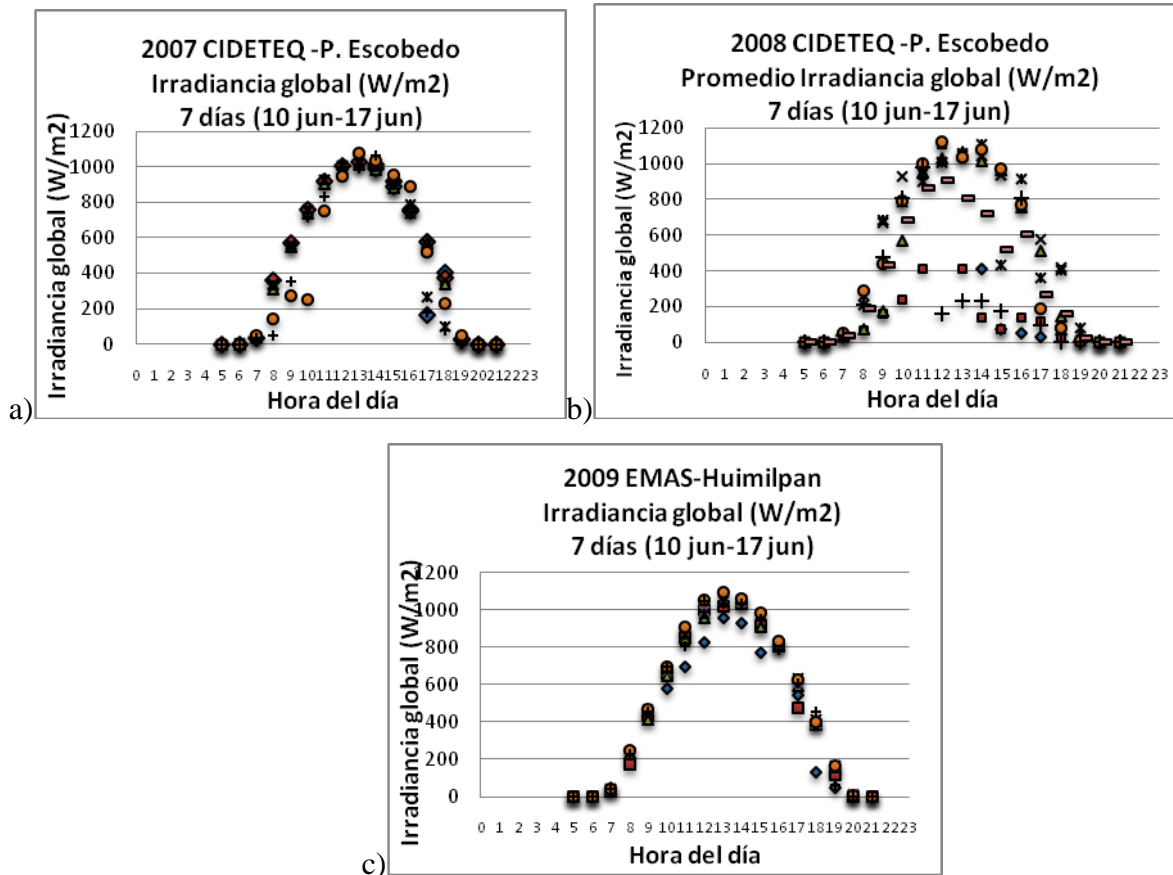


Figura 8. Distribución de Irradiancia a través del día para 7 días: Día 1 (cuadros), Día 2(círculos), Día 3(diamantes). Día 4(cruces), Día 5 (asteriscos), Día 6(rectángulos), Día 7 (triángulos) a) 2007 CIDETEQ-P.E, b) 2008 CIDETEQ-P.E y c) 2009 EMAS-H.

4.1.2 Análisis de datos de radiación

Una vez validados los datos, se realiza un análisis por meses para el conjunto con mayor información histórica. Del comparativo anual, empleando el promedio de los valores obtenidos con la metodología explicada en la sección anterior, se observa que para los meses de **marzo a octubre** se tienen valores promedio de insolación de $\sim 6.1 \text{ kWh/m}^2$ día y valores máximos de irradiancia alrededor de 1050 W/m^2 y para los meses octubre- noviembre a marzo, se tienen valores promedio de insolación de $\sim 7.7 \text{ kWh/m}^2$ y valores máximos de irradiancia alrededor de 800 W/m^2 para días soleados, como se indicó con anterioridad. Estos valores serán considerados para cálculos teóricos de pre-diseño.

Día	Hora	2007	2008	2009 RAD-
		CIDETEQ Rad. [W/m ²]	CIDETEQ Rad. [W/m ²]	SOL Rad. [W/m ²]
6/11	7:00 AM	32	35	29.7
6/11	8:00 AM	357	70	174.5
6/11	9:00 AM	573	158	435.3
6/11	10:00 AM	758	237	663.3
6/11	11:00 AM	919	410	852.2
6/11	12:00 PM	1009	1109	997.3
6/11	1:00 PM	1030	411	1016.5
6/11	2:00 PM	1011	137	1035.5
6/11	3:00 PM	921	76	917.5
6/11	4:00 PM	756	137	808.3
6/11	5:00 PM	575	118	474
6/11	6:00 PM	376	25	385.7
6/11	7:00 PM	28	11	114
6/11	8:00 PM	3	2	3.5
		30042000	10562400	28466280
		30.042	10.5624	28.46628
				J/m ²
				MJ/m ²
				kWh/m ²
		8.345	2.934	7.9073
				día

Tabla 7. Valores de Irradiación Global 2007 CIDETEQ-P.E, 2008 CIDETEQ-P.E y 2009 EMAS-H

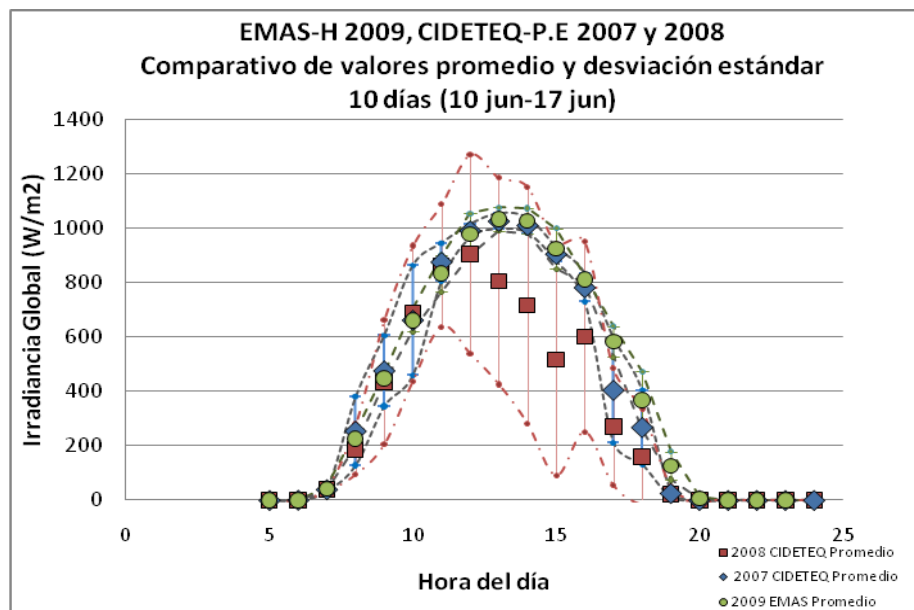


Figura 9. Comparativo de valores promedio y desviación estándar 2007 CIDETEQ-P.E, 2008 CIDETEQ-P.E y 2009 EMAS-H

Debido a la forma aleatoria con la que se eligieron las muestras de estudio, se realiza un análisis a partir de los 3 grupos de datos obtenidos en las dos estaciones climatológicas para tener conocimiento de la variabilidad de la información y la confianza que se puede tener en la misma. Haciendo un comparativo, la Figura 9, muestra la sobreposición de las bandas de la desviación estándar para los tres grupos de muestras. Se observa que la dispersión de los datos de los días nublados incluye también los valores para un posible día muy soleado. Con esto se justifica el hecho de tomar estas tres muestras de mediciones, representativas de lo que podríamos catalogar como los casos extremos hipotéticos de comportamiento; así la Figura 8.b) sería una buena representación para un día promedio nublado con baja irradiancia global, y la Figura 8.c) para un día promedio soleado.

4.1.3 Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas referentes a la radiación solar, temperaturas, velocidad y dirección de vientos, así como las condiciones del agua fría de suministro, estarán especificadas por los valores correspondientes al lugar de interés. En la Tabla 8 se muestra un resumen de los valores en cuanto a temperatura, inclinación e irradiancia considerados para fines de este trabajo.

Como se sabe, la temperatura ambiente puede tener una influencia significativa en el rendimiento de la instalación para determinadas condiciones, sobre todo en el aumento de las pérdidas térmicas, tanto a nivel del captador solar como del tanque de almacenamiento.

La temperatura del agua de la red hidráulica, tiene también un importante efecto sobre el rendimiento y puede influir en el dimensionado del sistema. Su valor es muy dependiente de la temperatura ambiente y en algunos casos los gobiernos municipales cuentan con esta información.¹⁶

Condiciones ambientales			
Irradiancia promedio (sept, oct, nov, dic)	I_{\min}	610	W/m ²
Irradiancia promedio (abril, mayo, junio, julio)	I_{\max}	770	W/m ²
Angulo de inclinación	ϕ	20	°
Temperatura ambiente mínima promedio	$T_{a \min}$	19.5	°C
Temperatura ambiente máxima promedio	$T_{a \max}$	25	°C

Tabla 8. Condiciones ambientales promedio en el punto de interés

4.2 Utilización

A partir del conocimiento de la estructura de la demanda, el consumo diario, mensual o anual así como los niveles de temperatura de uso de agua caliente, se determina la superficie requerida de los captadores y el volumen del tanque de almacenamiento de agua caliente.

La diferencia básica entre una instalación solar para aplicación industrial y una para aplicación doméstica es el consumo de agua y la temperatura de trabajo deseada.

En la aplicación industrial los consumos y temperaturas se encuentran determinados por el proceso mismo. Las instalaciones industriales que utilizan captadores planos por lo general se emplean como sistemas de precalentamiento y de manera ideal las temperaturas de diseño no deberían de ser superiores a 60°C, debido básicamente rápido decaimiento de la eficiencia, la cual disminuye a medida que la temperatura de operación aumenta.¹² De la correcta selección y análisis de diversos factores mencionados a lo largo de este trabajo, dependerá la relación eficiencia/costo de la instalación considerada y su buen funcionamiento, considerando que las instalaciones entre más grandes aumentan su complejidad.

En la aplicación doméstica, para conocer la cantidad de energía que se requiere para satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua caliente es necesario determinar: 1) El número de personas y sus hábitos de consumo, sin embargo, si se cambian los hábitos de consumo por unos más responsables, el colector solar a diseñar será de menor capacidad y así los costos serán menores, y 2) Usos distintos al aseo personal: lavado de ropa, de trastes, etc.²⁰

Es difícil establecer un patrón del consumo de agua caliente debido a la poca disponibilidad y fiabilidad de la información, así como a los muy variables factores que están relacionados con los hábitos, la condición social y la escasez de los medios técnicos para evaluarlos correctamente. Sin embargo, se pueden establecer de manera aproximada los valores promedios de 30 L/día por persona en viviendas multifamiliares con sistemas de distribución central y 40 L/día por persona en viviendas unifamiliares, en instalaciones hospitalarias 80 L/día por cama, en instalaciones hoteleras y residencias de categoría superior o igual a un hotel de tres estrellas se considera un consumo de 80 L/día por persona y en instalaciones de duchas colectivas 20 L/día por utilización de ducha.¹²

La variación del consumo a lo largo del año, depende por lo general de consideraciones de tipo climático, ya que en el sector vivienda, la demanda se reduce en los meses de verano, lo que impacta de manera negativa a instalaciones diseñadas con consumos constantes. La Figura 10 muestra una tabla de valores de referencia.

Finalmente, la estimación correcta permitirá disminuir los posibles errores que podrían tener una influencia importante sobre la relación eficiencia/costo. Las instalaciones sobredimensionadas no son rentables y funcionan en verano con excedentes de energía que no son utilizables, provocando en algunas ocasiones altas temperaturas que pueden afectar la durabilidad del sistema. En el diseño se deben de indicar consumo diario promedio mensual referido a una temperatura de utilización.

Solo para uso de regadera	30 L por persona a 45°C		40 L por persona a 45°C	
No. De personas	Capacidad del termotanque	No.de colectores solares planos	Capacidad del termotanque	No.de colectores solares planos
2	115	1	115	1
4	115	1	200	2
6	200	2	300	2
8	300	2	300	3
10	300	2	2*200	4
Para uso de regadera, lavabo fregadero y ropa de lavado	45 L por persona a 55°C		60 L por persona a 55°C	
No. De personas	Capacidad del termotanque	No.de colectores solares planos	Capacidad del termotanque	No.de colectores solares planos
2	115	1	200	2
4	200	2	300	3
6	300	3	2*200	4
8	2*200	3	300+200	5
10	300+200	4	2*300	6
Para uso de todos los servicios anteriores, más lavatrastes	60 L por persona a 60°C		80 L por persona a 60°C	
No. De personas	Capacidad del termotanque	No.de colectores solares planos	Capacidad del termotanque	No.de colectores solares planos
2	115	1	200	2
4	300	3	300	4
6	2*200	4	300+200	5
8	300+200	5	2*300	6
10	2*300	6	3*300	8

Figura 10. Tablas de consumo de calentadores solares para a) clima templado, temperatura de agua 20°C ²¹, b) clima templado-frío con heladas, temperatura de agua 15°C ²¹

4.3 Condiciones de operación

Las condiciones de funcionamiento se refieren a la relación de los distintos factores considerando sus rendimientos individuales respectivos. Se encuentra que existen varias situaciones importantes para favorecer la confiabilidad en el uso de sistemas de captación solar en el contexto de una instalación real, como se ha hecho hincapié, aparte de la radiación solar del lugar. Varios son los factores que influyen en el buen desempeño de un colector solar para lograr el máximo aprovechamiento como por ejemplo: el diseño, la aplicación, la calidad del colector, el área, los requerimientos de consumo, si el calentador solar es instalado de forma adecuada, los distintos componentes como intercambiadores, bombas, etc.; así como las condiciones de operación del sistema tales como: flujos de agua, tamaño del almacenamiento, etc. Incluso, para este trabajo se consideran **la calidad del agua** suministrada al colector o la posible **corrosión del equipo** por diversas causas.

4.3.1. Captador solar: área e inclinación

El captador es el principal componente de los sistemas solares, el área del sistema de captación impactará directamente en la eficiencia de una instalación. De acuerdo a Pilatowsky¹², la superficie total de los captadores responde a la ecuación (19) Siendo A_c el área del captador en m^2 y C el consumo de agua caliente a la temperatura especificada, en L/día.

$$1.25 \leq 100 A_c/C \leq 2 \quad (19)$$

Con el objetivo de que el colector solar quede expuesto a la radiación solar lo más posible durante el día se recomienda que los colectores se instalen en las azoteas de las casas, orientados hacia el sur magnético (ya que nos encontramos en el hemisferio norte), evitando sombras sobre el calentador, por lo que se sugiere que el tinaco quede del lado norte del calentador solar. Si existen muros o pretilas deberán estar tan separados como las alturas de los mismos.

Además se sabe que deben de ser colocados con cierto grado de inclinación, lo que permite aprovechar eficientemente la radiación. La inclinación a la que se debe colocar el colector depende de la localización de la ciudad donde se pretenda instalar, sin embargo, se recomienda, que aquella sea aproximadamente 10° más o menos que la latitud del lugar de instalación para favorecer la utilización en invierno o en verano, respectivamente¹².

4.3.2 Tanque de almacenamiento

El volumen de almacenamiento térmico es un parámetro fundamental que depende directamente del consumo diario de agua caliente. Al tanque de almacenamiento que evita pérdidas a través de sus paredes, al usar un aislante térmico, se le llamará también termo-tanque. De esta forma, las pérdidas térmicas en los tanques de almacenamiento pueden considerarse de segundo orden en los balances energéticos siempre que la instalación y su aislamiento térmico se lleven a cabo conforme a las especificaciones vigentes.¹²

La instalación solar se debe diseñar de tal manera que el volumen del tanque de almacenamiento coincida con el consumo diario previsto. La relación entre el volumen y el área de captación (V/A) puede variar en función del tipo de captador entre 50 y 100 litros por metro cuadrado. Mayores volúmenes de acumulación no proporcionan aumentos significativos en el rendimiento. En la mayoría de los casos se sugiere que el volumen del tanque de almacenamiento no rebase el valor de 80 litros por m^2 de superficie instalada.¹²

La posición del tanque de almacenamiento debe permitir que éste se llene por gravedad, por consiguiente debe colocarse por lo menos 30 cm sobre el nivel superior del colector. De tal suerte que los tinacos que sean abastecidos por los calentadores solares, deberán estar como mínimo 50 cm sobre el nivel de los calentadores solares.¹²

Las características de estratificación y de mezclado en los tanques de almacenamiento durante el calentamiento, deben ser consideradas adecuadamente en el diseño; aunque en realidad estos fenómenos no se realizan a un 100%. La estratificación en el mismo puede aumentar la eficiencia del sistema hasta cerca de un 10%.¹² Para establecer una correcta estratificación, la alimentación del fluido deberá ser en lo posible horizontalmente y no debe haber obstrucciones que modifiquen la dirección. En sistemas en donde se tienen diferencias importantes de temperatura es posible alimentar el agua caliente a diferentes niveles del tanque de almacenamiento, acomodando los niveles térmicos en forma descendente.

4.3.3 Elementos de interconexión

Otro factor que influenciará en el correcto funcionamiento del sistema es la interconexión entre colectores como parte del montaje de la instalación. Para la instalación de los sistemas de conexión se deben tener en cuenta las dilataciones térmicas, los problemas de alineamiento de colectores y la resistencia a elevadas temperaturas. Pilatowsky¹² hace una clasificación sobre las conexiones y comenta algunas consideraciones sobre éstas:

- Las conexiones metálicas rígidas soportan bien las temperaturas pero pueden crear problemas de dilataciones y alineamiento. Su utilización requiere considerar las fijaciones del colector que permitan posibles movimientos producidos por dilataciones del conjunto de captadores
- Las conexiones metálicas flexibles no presentan problemas pero su costo es elevado
- La utilización de mangueras flexibles para conexiones elimina los problemas de dilatación y alineamiento, pero requiere prestar atención a dos problemas: la resistencia del material de la tubería a temperaturas elevadas y la calidad de las conexiones. La selección del material de la tubería debe asegurar la resistencia a temperaturas mayores de 120°C. Esto es factible utilizando tuberías de polímeros sintéticos.
- Las mangueras para agua caliente con conexiones en los extremos pueden proporcionar buenos resultados, pero debe darse especial atención a las juntas utilizadas. Las juntas tóricas de materiales resistentes a temperaturas de 150°C y compatibles con agua caliente, son adecuadas.

5. Propuesta de diseño de colector

En las secciones anteriores se mencionan las características de los principales elementos de un colector solar. Esto brinda las bases para realizar la selección de diversos parámetros que influyen en el diseño del colector. En esta sección, la búsqueda es acotada y se describe en específico las propiedades por componente del colector solar a diseñar. Los valores de esta serie de descripciones, las cuales caracterizan al sistema, serán usados en la sección 6 para dar sustento al modelo matemático y la simulación computacional.

Además, una aportación importante de este proyecto, como parte de la cultura alineada con el uso de la tecnología solar, consiste en partir del principio de integración, uso y reuso de materiales así como tecnología creada para otros fines. Es decir, en este proyecto se busca iterar las ideas de tal forma que se utilicen materiales ecológicos, de reuso o adaptados para favorecer la filosofía del desarrollo sustentable que a su vez, brinda beneficios económicos.

5.1 Fluido de trabajo y Termosifón

El fluido de trabajo más común es el agua y es el elegido para este proyecto. En orden de evitar costos en consumos de energía adicionales, se eligió que el colector será diseñado para hacer uso del efecto termosifón. De acuerdo a la literatura, se encuentra que el aprovechamiento del fenómeno termosifón en colectores solares permite el ahorro de energía que, por convección natural y diferencia de presión permitirá el movimiento del fluido en el circuito de trabajo.

Usualmente, el tanque de almacenamiento se sitúa sobre el captador de forma que la diferencia de densidad entre el agua fría proveniente del tanque de almacenamiento y el agua calentada en los captadores genera la circulación del agua entre ambos. De acuerdo a Han²², el ángulo de inclinación de un termosifón tiene una influencia notable en el coeficiente de transferencia de calor de condensación, y encuentra que el ángulo de inclinación óptimo está entre 20° y 30°.

Incluso, se encuentra en un estudio comparativo, entre un sistema de tubos con efecto termosifón convencional y un sistema termosifón vertical de placa plana, realizado por Srimuang et al.²³, que el segundo puede tener una mejor transferencia de calor. Además, se observa una mejora en el rendimiento al comparar la transferencia de calor de la sección transversal de un tubo con la de un

tubo aplanado reconfigurándolo a una elíptica, similar a casi dos paredes paralelas curvadas en su unión.

De acuerdo a Pilatowsky¹², en el diseño del sistema termosifón deben de tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los captadores solares deben colocarse siempre por debajo del tanque de almacenamiento.
- Con el objeto de evitar que se produzca la inversión del flujo durante la noche, la tubería de salida del colector debe situarse al menos 30 cm por debajo de la tubería de salida del depósito. En las instalaciones en donde esto no fuera posible, es conveniente el uso de una válvula antiretorno en el circuito primario, obviamente de tipo vertical.
- Debido al movimiento del fluido que se genera a causa de las pequeñas diferencias de densidad, provocadas a su vez por las diferencias de temperaturas en el sistema, la potencia disponible de bombeo natural es muy reducida y por tanto las fuerzas debidas a la fricción del fluido en las tuberías deberán de reducirse al máximo. Con base a esto no se instalaran filtros, válvulas u otro tipo de estrangulamientos al flujo, con excepción de la válvula antiretorno y del purgador de aire, el cual se deberá colocar siempre en la parte más alta del circuito. No se instalaran codos a 90°.
- Deben evitarse las tuberías horizontales y en ningún caso el diámetro de la tubería será inferior a ½ pulgada.
- En el diseño del intercambiador se debe evitar que las circulaciones del fluido provoque cambios de dirección que bloquen el efecto termosifón. Los cambios de dirección se realizaran con curvas de un radio mínimo de tres veces el diámetro del tubo.
- Se puede reducir el aislamiento de la tubería de retorno para facilitar el efecto termosifón.

5.1.1 Calidad del agua

Un punto importante son las propiedades del agua como fluido de trabajo, ya que la concentración de impurezas puede obstruir el paso adecuado del agua. Lo cual corresponde con lo indicado por Strum²⁴ sobre problemas encontrados en los tanques de almacenamiento: ‘Adicional a la rápida corrosión de superficies oxidadas, precipitación de carbonato de calcio proveyó una fuente adicional de bloqueo físico del resto del ambiente del tanque.’²⁴

Circuito de consumo	Factor de ensuciamiento m kW*10 ⁴
Agua blanda y limpia	6
Agua dura	12
Agua muy dura y/o sucia	18
Circuitos cerrados	8

Tabla 9. Factor de ensuciamiento por dureza del agua¹¹

Tipos de agua	mg CaCO ₃ /l
Agua blanda	0-75
Agua levemente dura	75-150
Agua dura	150-300
Agua muy dura	>300

Tabla 10. Clasificación de la dureza del agua²⁵

Existe un impacto considerable en el valor de factor de ensuciamiento de acuerdo a la dureza empleada, como se observa en la Tabla 9, lo cual está en relación con el grado **dureza del agua**. La dureza está determinada por la concentración de sales metálicas, en particular sales de magnesio y calcio relacionado con el pH de equilibrio de la calcita y con la alcalinidad de los carbonatos.

Las aguas duras al calentarse por encima de 60 °C favorecen la precipitación de sales calcáreas provocando incrustaciones en el interior de los captadores y en el circuito¹². La Tabla 10 muestra la clasificación de la dureza del agua que se puede determinar fácilmente por titulación con EDTA, agente complejante que permite valorar tanto la concentración de Ca como la de Mg.

La dureza temporal se produce por carbonatos y puede ser eliminada al hervir el agua o por la adición de CaOH (hidróxido de calcio). El carbonato de calcio es menos soluble en agua caliente que en agua fría, así que al hervir (lo cual contribuye a la formación de carbonato) se precipitará el bicarbonato de calcio fuera de la solución, dejando el agua menos dura. Los carbonatos pueden precipitar cuando la concentración de ácido carbónico disminuye, con lo que la dureza temporal disminuye, y si el ácido carbónico aumenta puede aumentar la solubilidad de fuentes de carbonatos, como piedras calizas, con lo que la dureza temporal aumenta. La dureza permanente no puede ser eliminada al hervir el agua, es usualmente causada por la presencia del sulfato de calcio y magnesio y/o cloruros en el agua, que son más solubles mientras sube la temperatura. Puede ser eliminada utilizando el método SODA (Sulfato de Sodio). También es llamada “dureza de no carbonato”.

Parámetros que rebasan los límites permisibles	Límite	Valor más alto encontrado	Número de veces que rebasó el límite
Coliformes totales	(2UFC/100 ml)	360	45(13.8%)
Coliformes fecales	(0UFC/100 ml)	360	43(13.1%)
Turbiedad	(5 Unidades)	90	5 (1.5%)
pH	(6.5-8.5 unidades)	6.10:8.69	2 (0.61%)
Fierro	(0.3 ppm)	4	8 (2.4%)
Flúor	(1.5 ppm)	2.04	3 (0.92%)
Nitratos	(10 ppm)	17.1	14 (4.3%)
Nitritos	(0.05 ppm)	0.09	2 (0.61%)
Nitrógeno amoniacal	(0.5 ppm)	0.52	1(0.31%)
Sulfatos	(100 ppm)	115	3 (0.92%)
Dureza	mg _{CaCO3} /l	230*	

Tabla 11. Composición del agua en Municipio Pedro Escobedo²⁶ *De acuerdo a varios estudios de rutina realizados en CIDETEQ

Un proceso para la eliminación de la dureza del agua, es la de adición de carbonato sódico, que conlleva la eliminación de Ca^{2+} . Otra de las formas de suavizado del agua se basa en la utilización de intercambiadores iónicos que son resinas artificiales que están formadas por una gran red orgánica con numerosos grupos ácidos o básicos.

La información sobre la calidad del agua considerada en este trabajo es de acuerdo a los resultados mostrados en el libro La Ecología Política en la Cultura del Agua en Querétaro²⁶, se puede apreciar en la Tabla 11 algunas de las características del agua en el área de estudio, Municipio Pedro Escobedo Querétaro.

5.2 Placa de absorción

5.2.1. Material

La misión de la placa de absorción consiste en hacer una eficiente transferencia de calor del sistema captador al fluido de trabajo. Para esto, los materiales que tengan las mejores propiedades de conducción térmica serán los elegibles. Los mejores ejemplos de estos materiales son los metales. Haciendo referencia a la Ley de Fourier cuya expresión matemática está dada por la ecuación (8), se observa que entre mayor sea el valor de la conductividad k_p , la transferencia de calor q será mayor, sin embargo esta transferencia de calor también se ve modificada si el espesor del materia dx

disminuye. Sustentado en esto, se puede considerar que algunos materiales con valores no tan altos de conductividad, como por ejemplo el acero inoxidable, pueden brindar un desempeño satisfactorio en cuanto a la transferencia de calor si se modifica el espesor del material. Se muestran en la Tabla 12 valores de conductividades térmicas a 300 K para distintos materiales.

Uno de los materiales más comunes usados para la construcción de superficies de absorción de colectores solares es el cobre, debido a su alta conductividad térmica. Para la selección de un material en orden de lograr un beneficio integral es importante considerar otras variables, tales como costo, resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas, dilatación térmica, etc.

Con el objetivo de incorporar el uso del acero inoxidable, en los principales componentes de un colector solar, se emplea como el material de la placa de absorción. Las propiedades mecánicas del acero inoxidable, aunadas a un diseño adecuado con uniones mecánicas que eviten la formación de pares galvánicos (es decir uniones con metales más catódicos que el acero inoxidable como el aluminio, el acero al carbón o soldaduras de plomo-estaño), pueden garantizar una vida útil prolongada para los colectores solares que empleen este metal en su construcción. Incluso comparado con un colector de las mismas dimensiones, de un material como el cobre, en principio es más ligero debido a que la densidad del cobre es de 8.9 kg/dm^3 vs 7.7 kg/dm^3 del acero inoxidable.

Material	W/m.K
Acero	47-58
Acero Inoxidable	16-27
Aluminio	209.3
Bronce	116-186
Cobre	372.1-385.2
Estaño	64
Latón	81-116
Níquel	52.3
Oro	308.2
Plata	406.1-418.7
Plomo	35

Tabla 12. Conductividad térmica de metales³³

Para determinar la mejor selección de tipo de acero inoxidable se siguen los lineamientos de acuerdo al Sistema de Evaluación del Sitio y del diseño²⁷, el cual es una herramienta desarrollado por el International Molybdenum Association (IMOA), que proporciona un panorama inicial de la susceptibilidad a la corrosión a la que puede estar expuesto un proyecto. Las condiciones del clima y medio ambiente son el principal determinante en la elección del tipo de acero. En adición, el acabado superficial, las consideraciones en el diseño y el mantenimiento tendrán también un impacto considerable.

Haciendo uso de esta herramienta, finalmente se encuentra que el tipo 304 o 304L es la elección más efectiva en cuanto a costo para nuestro tipo de aplicación específico. Esto se determina, considerando que el colector será diseñado para las condiciones estándar del clima en Querétaro, el cual se considera dentro del clima caliente o frío con humedad típicamente por debajo de los 50%; una contaminación urbana moderada; en cuanto a la exposición a sal de la costa ésta se considera nula, ya que nos encontramos a un valor >1.6 a 16 km de la costa; y en cuanto a las consideraciones del diseño, se determina una superficie con acabado BA, de rugosidad $Ra=2\mu\text{in}$, que se encuentra inclinada y con cubierta de vidrio no expuesta a la intemperie, por lo que no se tiene contemplado lavar frecuentemente la superficie.

5.2.2 Corrosión

Uno de los problemas asociados a los colectores solares con componentes metálicos es la corrosión por el constante flujo de agua en condiciones variables. Al estar en contacto con agua las placas de absorción metálicas pueden sufrir dos tipos de corrosiones diferentes, la corrosión externa, debida fundamentalmente a la penetración de agua, fallo del recubrimiento y acción de la atmósfera y, la corrosión interna, por acción del fluido de trabajo. En ambos casos pueden presentarse las diferentes formas típicas de corrosión: galvánica, por concentración de esfuerzos, puntual y biológica.¹²

La corrosión galvánica, proceso electroquímico originado por el paso de corriente entre dos metales a través de un electrolito. El fenómeno puede producirse entre dos zonas del mismo metal y su intensidad depende de la acidez (pH) del electrolito y la temperatura, la cual acelera intensamente el proceso.

La corrosión por picaduras, se produce fundamentalmente en la superficie del absorbedor en torno a partículas de suciedad o de contaminantes.

La corrosión por esfuerzos, se produce normalmente alrededor de los puntos de soldadura o remaches, donde la fatiga térmica conduce a fallas del material.

La corrosión biológica, tiene su origen en la actividad metabólica de microorganismos. La ebullición del agua en el interior de los colectores debido a la falta de presión causa rápidamente la corrosión de los conductos internos y la perforación del colector.

Los principales problemas de corrosión en el acero inoxidable suceden principalmente por corrosión localizada tanto en el cuerpo del colector como en los tanques de almacenamiento. Entonces es aquí donde la soldadura, los pares galvánicos entre materiales, y los diseños lo más libres de recovecos posibles cobra suma importancia. Incluso, los pequeños daños superficiales al estar en contacto con ciertos materiales podrían propiciar un ataque localizado.

Por citar un ejemplo de resultados encontrados por varios autores, Strum²⁴ encuentra que ‘La corrosión fue iniciada por una severa oxidación de las zonas posteriores de las soldaduras, fomentado por la presencia de ambientes acuosos (acorazados, cerrados, protegidos).’ Proponiendo incluso que en el momento de soldar se evite la oxidación del interior del tanque a través del uso de una atmosfera de un gas inerte, tal como el Argón.

El problema de corrosión se presenta en menor cantidad en el acero inoxidable. Si se analiza en un diagrama de Pourbaix, en el que se hace la sobreposición de los diagramas individuales de Fe y Cr, que su zona de pasividad abarca un rango de pH desde ~4 hasta 12, lo que lo hace adecuado para el empleo en diversas aplicaciones. Figura 11. En comparación, el aluminio tiene una zona de pH más estrecha de ~5 a 8. Y el cobre de ~6 a 14. En la Figura 12 se muestra una serie galvánica incluyendo tres tipos distintos de acero inoxidable.

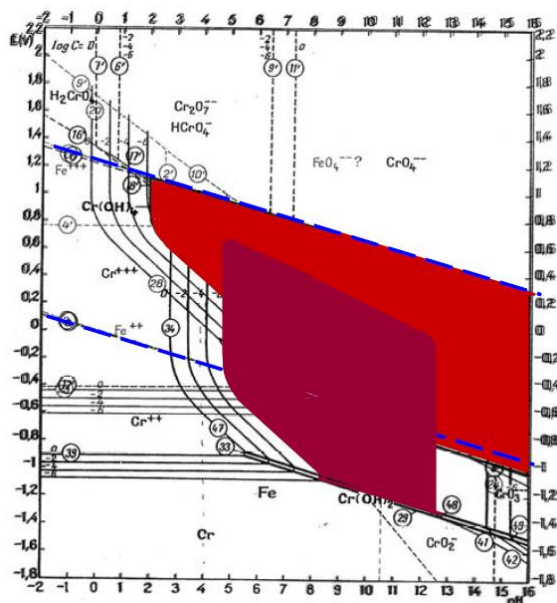


Figura 11. Sobreposición del diagrama de Pourbaix del Fe y del Cr²⁸

	Platino
	Oro
	Grafito
	Titanio
	Plata
→	Clorimet 3(62Ni,18 Cr,18Mo)
→	Hastelloy C (62Ni,17Cr,15Mo)
→	Acero Inoxidable 18-8 Mo (pasivo)
→	Acero Inoxidable 18-8(pasivo)
→	Acero Inoxidable al Cromo 11-30%Cr(pasivo)
→	Inconel (pasivo) 80Ni,13Cr,7Fe
→	Níquel (pasivo)
→	Soldadura de plata
→	Monel (70Ni,30Cu)
→	Cupro -níquel (60-90Cu,40-10Ni)
→	Bronce (Cu-Sn)
→	Cobre
→	Latón /Cu-Zn)
→	Clorimet 2(66Ni,32Mo,1Fe)
→	Hastelloy B(60Ni,30Mo,6Fe,1Mn)
→	Inconel (activo)
→	Níquel (activo)
→	Estaño
→	Plomo
→	Soldadura Plomo-estaño
→	Hierro Colado (fundiciones)
→	Hierro y acero
→	Aluminio 2024 (4.5-Cu,1.5Mg,0.6Mn)
→	Cadmio
→	Aluminio comercial puro (1100)
→	Zinc
→	Magnesio y aleaciones de magnesio

Figura 12. Serie galvánica para distintos tipos de metales²⁷

5.2.3. Patrón de flujo

Un factor importante de la placa de absorción depende de que tan bueno sea el diseño termomecánico. Dos placas paralelas de área infinita serían lo más sencillo de manufacturar para un intercambiador de calor de energía solar. Sin embargo, se requiere dar un soporte estructural para tener un flujo adecuado entre las placas.

El uso de secciones metálicas elípticas, semejantes a dos placas paralelas planas, ha sido estudiado por Srimuang²³, quien encuentra una mejora en el rendimiento al comparar la transferencia de calor de la sección transversal de un tubo con la de un tubo aplanado reconfigurando su sección transversal a una elíptica, similar a casi dos paredes paralelas curvadas en su unión. Un serpentín o algún patrón de flujo ‘impreso’ en las láminas favorecerían la distribución del agua, dando a su vez estabilidad estructural con estos dobleces. La forma común de lograr estos patrones en metal es mediante el uso de un trabajo en frío empleando un troquel. Incluso se identifican dos patentes usando el principio de placas delgadas, ya sea planas o con algún patrón de flujo, una registrada en Francia²⁹ y una en Estados Unidos³⁰.

A través de una búsqueda de lo existente en el mercado sobre algún bien que cumpla con varias características mencionados con anterioridad, se encuentran finalmente placas de acero de un espesor mínimo con patrones de flujo probados para intercambiadores de calor a contraflujo de una empresa transnacional. Las cuales además, son utilizadas en el sector alimenticio lo que garantiza su no toxicidad y resistencia a la corrosión. Por esta serie de características son propuestas como el absorbedor del colector solar. Su diseño y aplicación original los hace factibles para ser usadas o adaptadas como componentes de un colector solar.

En la Figura 13 se observa una esquematización de la geometría de la placa de acero inoxidable 304 GA 24 (0.6mm) troquelada con un patrón de flujo TranterTM (sección). Para este diseño, la caída de presión y la transferencia de calor son dependientes el ángulo ϕ en flecha del patrón de la placa. Un ángulo ϕ obtuso significa alta resistencia y una alta fuerza de conducción térmica; un ángulo ϕ agudo significa una baja caída de presión pero una menor fuerza de conducción. De esta forma, el tamaño del colector se delimita al tamaño de placas de 0.62 m x 0.38 m, con una sección central que cuenta con 47 ondulaciones en zig-zag.



Figura 13.Placa de absorción esquema y dimensiones

5.2.2.1 Aplicación original

Las placas de los intercambiadores de calor a contraflujo, cuya aplicación original es el pasteurizado de leche, se usarán como alternativa para realizar el mecanismo de transferencia de calor en el área solar.

En el dispositivo original, un conjunto de placas paralelas es apilado y luego sujeto mediante la presión de grandes tornillos. Se observa que mediante el uso de empaques intercalados entre las placas, los flujos se mantienen dentro de cierto límite; de esta forma se van alternando entre placas las corrientes fría y caliente, de forma tal que se favorezcan justamente la entrada y salida de estas corrientes. Esta descripción puede apreciarse en la Figura 14.

En un inicio se realizó un análisis exploratorio sobre la posibilidad de respetar el diseño original y del que finalmente se selecciona la mejor distribución de empaques/entradas de flujo. Debido al uso de solo dos placas, en las que no se presentan corrientes adyacentes a las placas tales que equilibren la presión interna del flujo (como sucede en la aplicación original), se presentaron deformaciones severas del colector. De acuerdo a lo anterior, finalmente para la elaboración del prototipo, se realiza una modificación en las dimensiones de las placas originales, lo cual puede ser apreciado en la Figura 15.

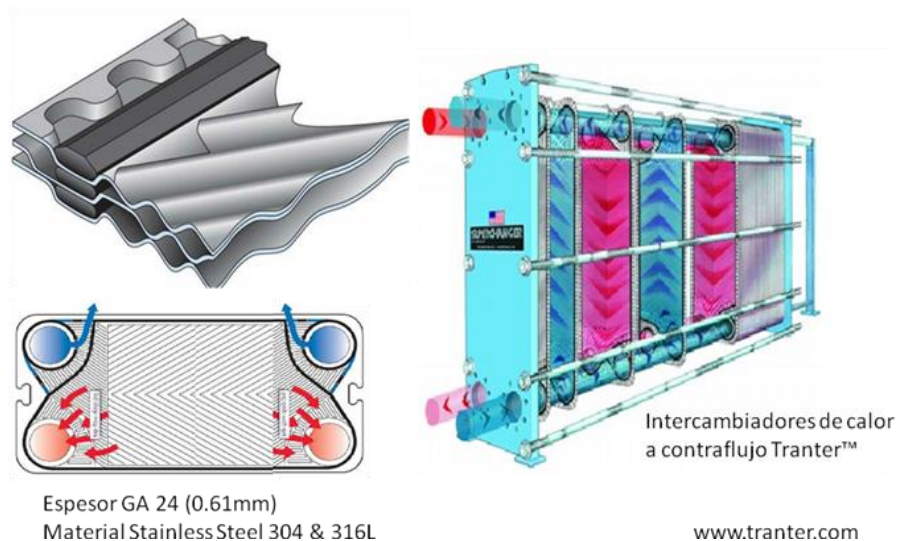


Figura 14. Aplicación original de la placa de absorción

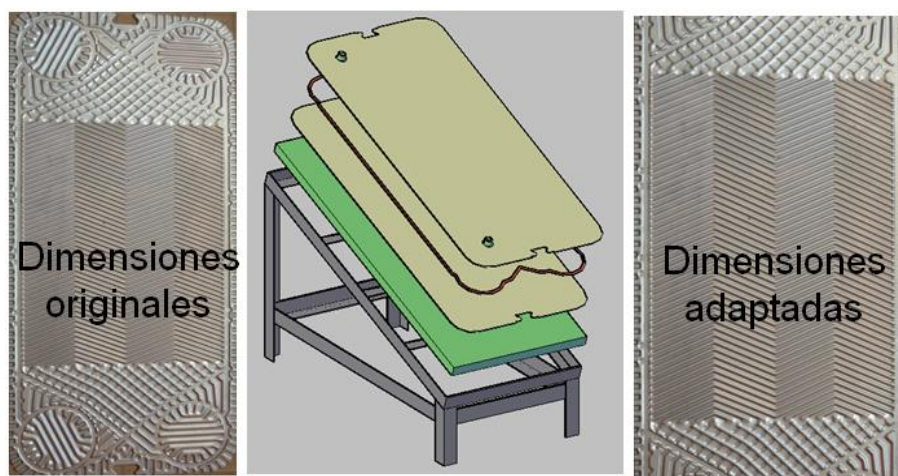


Figura 15. Dimensiones originales y adaptadas de la placa de acero inoxidable

Tipo de acero GA.24 Acabado BA	Defectos en el proceso de troquelado de patrón
430	Sí
439	Sí
441	Sí
304	No
316L	No

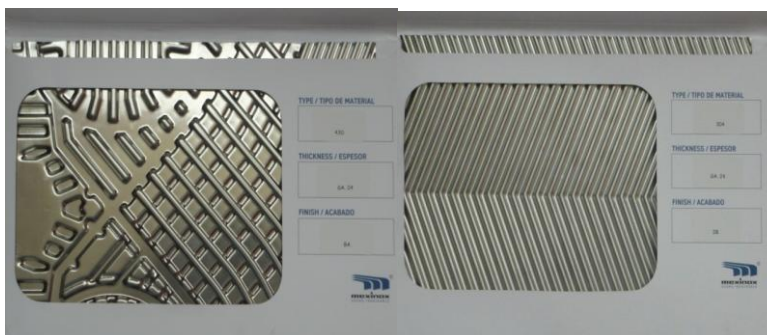


Figura 16. Pruebas en distintos tipos de acero inoxidable. Foto de 430 y 304

5.2.2.2 Proceso metalúrgico

El proceso de impresión de estas formas en acero inoxidable es complejo y relativamente costoso, ya que es necesaria herramienta especializada. La operación de trabajo de prensa se compone en un inicio de la prensa, comúnmente hidráulica, del troquel y del material que se desea modificar en su forma. Sobre el material sucede trabajo de compresión, haciéndolo fluir, estampando el patrón original. La velocidad y energía son determinantes para lograr la adecuada forma deseada. De esta forma, todos los parámetros de operación de la prensa se vuelven un factor determinante.

Las consideraciones para diseñar un proceso como éste requieren de cálculos para determinar la capacidad de la prensa, determinar la posición óptima en la carrera de la carga de la prensa, torque en la flecha del cigüeñal³¹, por mencionar algunas. En este trabajo no se diseña este tipo de herramienta, ya que se identificó el lugar de producción de este componente. Haciendo uso de éste equipo se hicieron pruebas (Figura 16) para distintos aceros inoxidables tanto ferríticos como austeníticos suministradas por IMINOX. A pesar de la viable posibilidad de usar aceros ferríticos para la construcción del colector, las pruebas no fueron satisfactorias para los aceros inoxidables de la serie 400, debido a que el troquel se encontraba diseñado para aceros 304 y 316. En el apéndice A.5.3 se detalla la información sobre la posibilidad de estos materiales de ser deformados.

5.3 Superficie selectiva

Para que el absorbedor incremente su eficiencia desde el punto de vista térmico, se requiere una superficie selectiva con alta absorción en la banda de emisión del espectro visible solar y que emita la mínima radiación posible a mayores longitudes de onda. Sin embargo, comúnmente todos los materiales conductores son metales y los metales usualmente tienen su brillo característico que los hace ser reflejantes en su mayoría y no superficies de absorción. Así, al incrementar las propiedades ópticas de la superficie de la placa troquelada de metal, mediante el empleo de una superficie selectiva, podemos lograr una mayor transferencia de calor hacia el fluido.

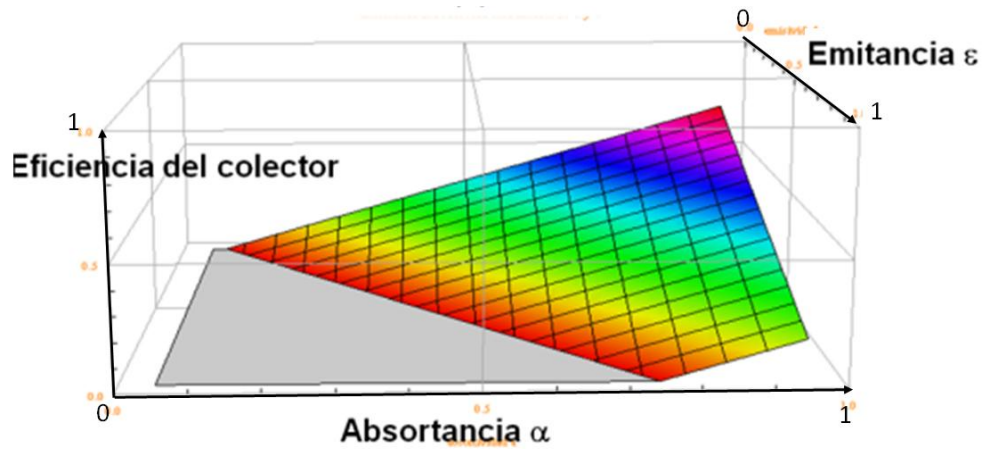


Figura 17. Eficiencia del colector en función de α y ε de la superficie selectiva, a $t_a=293.15$ K

En la Figura 17 se muestra en el eje z, la eficiencia global del colector obtenida con la ecuación (16) en función de la absortancia (α) y emitancia (ε), manteniendo fijas las demás variables con un incremento de temperatura de 5°C . La escala para todos los ejes de esta gráfica es de 0 a 1. En el punto máximo de la eficiencia del colector se aprecia un valor hipotético de absortancia igual a 1 y una emitancia igual a cero. Para ciertos valores tanto de la emitancia como de la absortancia la eficiencia toma valores negativos, los cuales no son apreciados en esta Figura 17, porque carecen de sentido para los objetivos de un colector solar.

De este tipo de gráficos se encuentra que la emitancia en el espectro visible a bajas temperaturas de operación ($20\text{-}50^\circ\text{C}$) tiene un menor impacto en la eficiencia del colector, **por lo cual se hará mayor hincapié en este trabajo a los valores de absortancia en el espectro visible (VIS). Estos parámetros son determinantes para la propuesta de la superficie selectiva empleada de tal forma que se obtenga un beneficio final en la eficiencia térmica lo cual impactara también en la parte económica.**

5.3.1 Acabado del absorbedor de acero inoxidable

La característica de la formación de la capa pasiva de óxidos de cromo en el acero inoxidable lo hace un material con opciones reducidas de recubrimiento. De la literatura se encuentra las superficies selectivas investigadas como primer acercamiento sobre acero inoxidable las cuales consisten en colorear su superficie químicamente.

Muestra	α	ϵ 100°C	α/ϵ
Acero inoxidable Azul (SEL)	0.9	0.1	9
Acero inoxidable Dorado (SEL)	0.86	0.1	8.6
Acero inoxidable Rojo (SEL)	0.77	0.1	7.7
Acero inoxidable Verde (SEL)	0.78	0.1	7.8
Acero inoxidable Azul (INCO)	0.83	0.1	8.3
Acero inoxidable Gris (INCO)	0.91	0.1	9.1
Acero inoxidable Dorado (INCO)	0.68	0.1	6.8
Acero inoxidable Rojo (INCO)	0.62	0.1	6.2
Acero inoxidable Verde (INCO)	0.63	0.1	6.3
Gris + Cr2O3	0.93	0.1	9.3
Gris+Si3N4	0.87	0.25	3.6

Tabla 13. Propiedades de superficie selectiva convertida químicamente en superficies de Aceros inoxidable. INCO London and international nickel company.³²

Autores como Karlsson y Ribbing³², Smith³³ y Granziera³⁴ investigaron las propiedades selectivas de acero inoxidable coloreado. El coloreado era llevado a cabo por inmersión en una solución caliente que contenía las concentraciones adecuadas de ácido crómico y ácido sulfúrico, formando de esta forma una película. Sin embargo esta película era suave y tenía aplicaciones limitadas por lo que Evans y colaboradores³⁵ lograron un endurecimiento de esta película mediante un tratamiento catódico en un baño similar de ácido crómico y ácido sulfúrico.¹⁸ Las superficies coloreadas mostraron una muy buena resistencia a la corrosión y al medio ambiente. De estos resultados, Agnihotri¹⁸ muestra la Tabla 13 comparativa.

5.3.2 Pintura negra mate de alta temperatura S1

Como referencia se emplea pintura negra mate de alta temperatura High HeatTM, la cual es aplicada en forma de aerosol sobre la placa. La textura resultante sobre acero inoxidable es porosa.

5.3.3 Coloreado de acero inoxidable mediante baño electroquímico S2

5.3.3.1 Pruebas preliminares

Como parte de un verano de investigación en CIDETEQ fue realizado un estudio por Ruiz³⁶ sobre coloreado negro de superficies de acero inoxidable de las series 400 y 300 con propiedades ópticas que hagan factible su uso como superficie selectiva para colectores solares. La hipótesis de este

estudio consistió en que mediante un baño con una solución alcalina-cromo-oxidante, con la aplicación de corriente anódica, es posible obtener superficies con un color aproximado al negro.

Se realizaron pruebas exploratorias con piezas rectangulares de acero inoxidable 441 y 430 acabado 2B de 2 cm x 3 cm con un pre-tratamiento y sin él. El pre-tratamiento consistía en un granallado con arena (sand blast), esto sustentado en la idea de que a mayor porosidad habrá una mayor retención de luz en el material.

Se empleo como cátodo una barra de Titanio recubierto con platino y como ánodo el acero inoxidable a colorear, contenidos en un vaso de precipitados. La condición de densidad de corriente fue de 0.23 A/dm^2 a una $T= 121\text{-}125^\circ\text{C}$ y con un intervalo de tiempo para las pruebas de 10 min. Para cada tipo de acero fue preparado un baño nuevo con los siguientes componentes:

- NaOH (hidróxido de sodio) grado industrial
- NaNO_3 (Nitrato de sodio) grado industrial
- $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Dicromato de Sodio) grado reactivo
- Agua

De manera práctica para obtener los valores de la absortancia (α) y emitancia (ϵ) de una superficie se realizó la estimación a partir de valores obtenidos de reflectancia (ρ), al utilizar la suposición de que la radiación incidente en la superficie responde a la Ley de Kirchhoff (20).

$$\epsilon = \alpha \quad (20)$$

De este trabajo se concluye que por medio del tratamiento de inmersión en un baño alcalino-cromo-oxidante

- Se obtuvieron coloraciones sobre el acero inoxidable aproximadas a recomendadas en la literatura optimizando el tratamiento con una polarización anódica
- Se obtienen colores variados con iridiscencia para las muestras con acabado AB sin tratamiento. Mientras que los colores más oscuros y con mejor absortancia se verifican en las piezas que fueron sometidas a tratamiento de sand blast.
- Los mayores porcentajes de absortancia para las muestras de acero inoxidable fueron obtenidas en los acero tipo 304 y 441³⁶.

5.3.3.2 Proceso de coloreado

A partir de los resultados del estudio anterior, llevado a cabo en muestras planas, se realizó una variación del mismo para obtener una mejora en cuanto a los coloreados ya obtenidos, considerando la geometría real de la placa.

De inicio, debido a la variación en volumen de la solución requerida (ahora ~16 L) se realizó una modificación en el tamaño de la celda, a una celda rectangular (0.05 m x 0.4 m x 0.89 m), la cual fungió a su vez como cátodo, ya que se fabricó de acero inoxidable 304, pero de calibre 20.

Debido al patrón de flujo, las fluctuaciones en la superficie provocaban una variación en cuanto a la distribución de corriente. En complemento, la solución al ir evolucionando a través de la experimentación, debido a su naturaleza, contribuye con este factor de variación. Además, debido a que el tratamiento de granallado en una superficie como ésta genera una acumulación de esfuerzos en desequilibrio con los esfuerzos de la placa troquelada, se provocaba una deformación de la placa. Para reducir todas estas variaciones, primero se empleó la placa con acabado AB -que de acuerdo a los resultados de la sección anterior presenta un acabado iridiscente- y segundo, se colocaron 4 puntos de contacto en la placa para favorecer la conducción eléctrica. Se observan los caimanes conectados a los extremos de la placa en la Figura 18.

Una coloración morado oscuro como la observada en la Figura 19 se determinó como la coloración objetivo, seleccionándose un valor de densidad de corriente de 0.2 A/dm^2 , un voltaje de 1V, una temperatura $T= 107^\circ\text{C}$ y con un tiempo de baño de 30 min. La celda de acero inoxidable 304 que contenía la solución se empleó como cátodo y la placa troquelada de acero inoxidable 304 a colorear como ánodo. La oxidación de la superficie se llevó a cabo en la solución de:

- NaOH (hidróxido de sodio) grado industrial
- NaNO_3 (Nitrato de sodio) grado industrial
- $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Dicromato de Sodio) grado reactivo
- Agua

Cabe mencionar que por las variaciones debido a la geometría misma, se observan ligeras irregularidades a lo largo de las dimensiones de la placa de la tonalidad del coloreado. Estrictamente

hablando, estas variaciones influyen negativamente en términos de eficiencia. Sin embargo las variaciones no son realmente impactantes.

Como se indicó con anterioridad, debido a las relativamente bajas temperaturas de operación de este colector plano, la absorptancia es el parámetro óptico de mayor impacto. El valor de la absorptancia se puede obtener de manera indirecta mediante la caracterización del espectro electromagnético en el rango visible. Para esto, se evaluó la reflectancia (ρ) con el espectrofotómetro de medición de color SP64 X-rite mediante la técnica de esfera integradora en el espectro visible, con un iluminante estándar D65 con observador a 10° y una apertura de 4 mm. En la Tabla 14 se presenta la relación de las condiciones de acabado para cada muestra incluyendo acabado de pintura mate, superficie de óxidos de cromo por baño electroquímico con y sin tratamiento sand blast. Las muestras con los acabados con identificador 1 son obtenidos del estudio anterior.

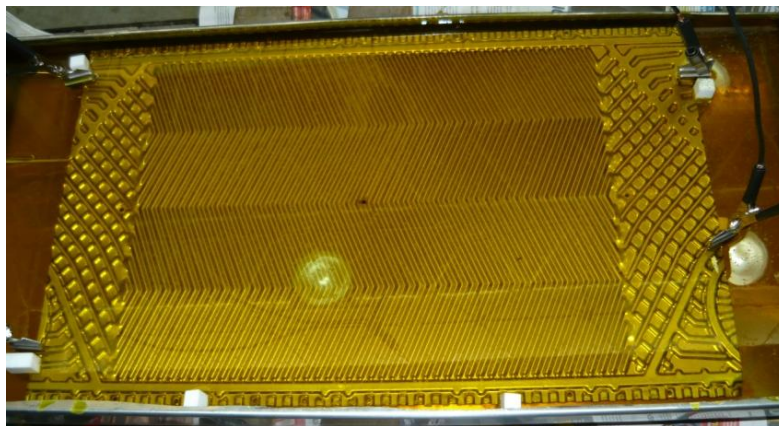


Figura 18. Foto del proceso de coloreado de acero inoxidable 304 en un baño electroquímico

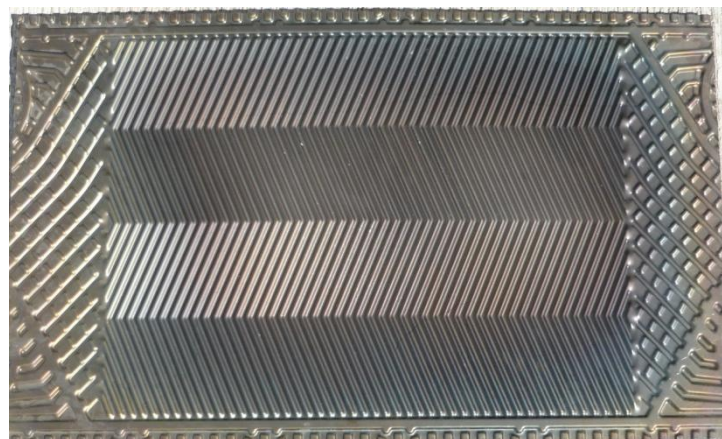


Figura 19. Absorbedor coloreado mediante baño electroquímico alcalino cromo-oxidante

Tipo de Acero	Id.	Símbolo Figura 20 y 21	Acabado	Tiempo de inmersión [min]	Voltaje [V]	Temperatura [°C]	Aspecto
304	4	diamantes	AB	5min	1V	105	Café/azul
304	6	cuadros	AB	5min	0.5V	110	Café/azul
304	7	triángulos	AB	5min	1V	105	Café/azul
304	1	cruces	sand blast	10min	NR	125	Negro mate poroso
441	1	asteriscos	AB	10min	NR	125	Iridiscente
304	Pint.HH	círculos	AB	-	-	-	Negro mate poroso
304	s/acabado	Cruces (Fig.21)	AB	-	-	-	Pulido

Tabla 14. Relación de muestras con distintas condiciones del acabado NR-No reportado

5.3.4 Espectro electromagnético en el rango visible de la superficie aplicada

De acuerdo a los parámetros establecidos y a las definiciones del apéndice A.4 se muestra el espectro electromagnético para aceros 441 y 304 a partir de la cual se estiman valores de absorción α en el rango VIS. La Figura 20.a) muestra los espectros con la componente especular excluida y la Figura 20.b) con ésta componente incluida.

De los gráficos se observa que todos los espectros presentan porcentajes de reflectancia bajos, lo que indica absorción alta. La muestra iridiscente del 441, en la Figura 20 presenta una tendencia al color azul alrededor de los 500 nm. La muestra 304-6 presenta una tendencia creciente hacia los 700 nm. En adición, los acabados mate (círculos) y con sand blast (asteriscos) presentan en este grupo los valores más bajos en la reflectancia tanto con la especular incluida y excluida. Sin embargo, para estos casos, la desventaja de su uso es para la pintura su baja resistencia al medio ambiente y para el tratamiento sand blast la deformación que se origina en la placa empleada en este caso en específico.

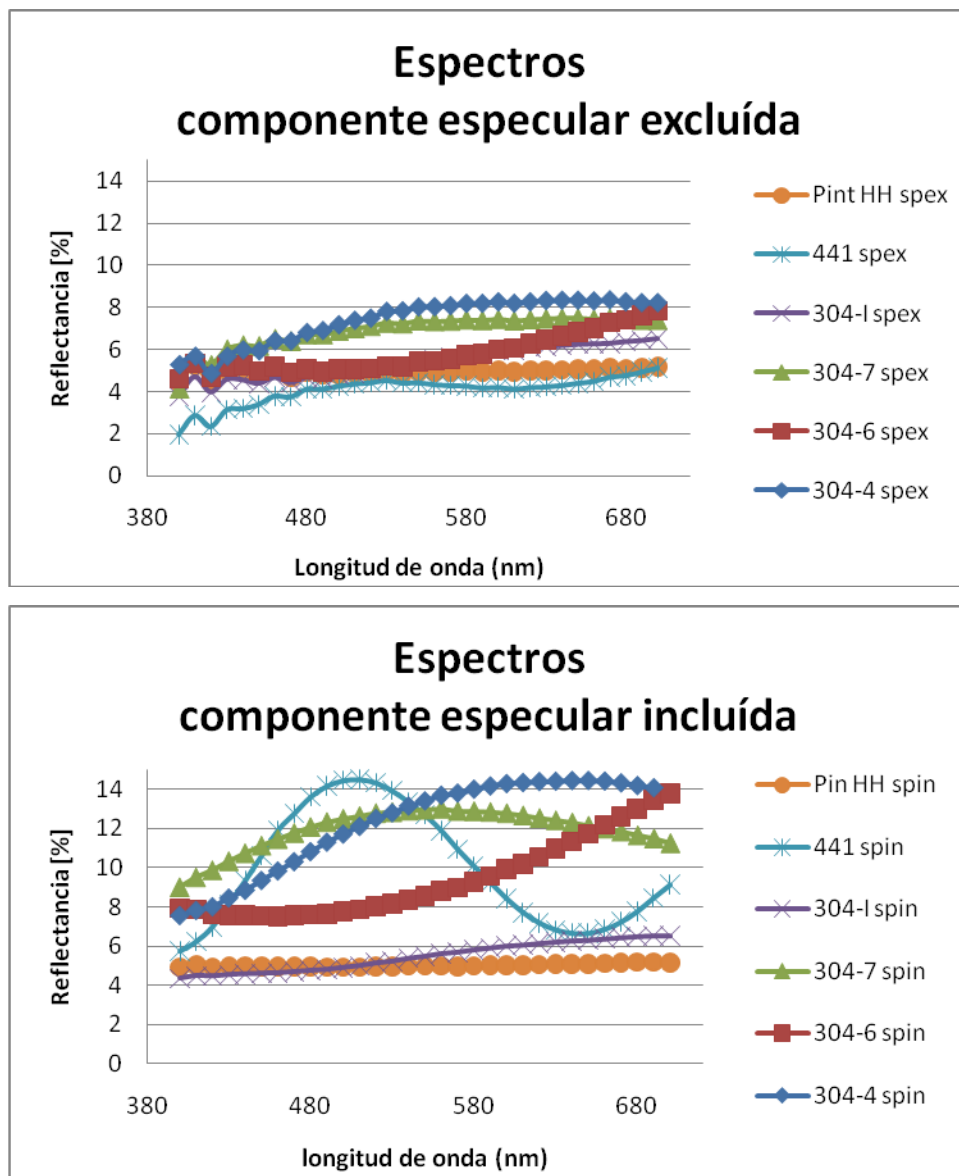


Figura 20. Reflectancia de la superficie de óxidos de cromo sobre acero inoxidable a) con la componente especular incluida y b) componente especular excluida

Los espectros en la región visible para el acero inoxidable 304 sin ningún acabado son mostrados en Figura 21. Debido al acabado AB de manufactura, esta muestra presenta una alta reflectancia.

Una estimación de absorptancia en el espectro visible para los distintos acabados con su respectiva desviación estándar se muestra en la Tabla 15. A partir de estos datos, **se concluye aplicar el acabado obtenido con las condiciones del acero 304-id 6, el cual presenta una absorptancia con la especular incluida de $\alpha=0.906$ (Tabla 15).** Para la aplicación del acabado en la placa real será necesario el adecuado escalamiento de acuerdo las condiciones de corriente y voltaje.

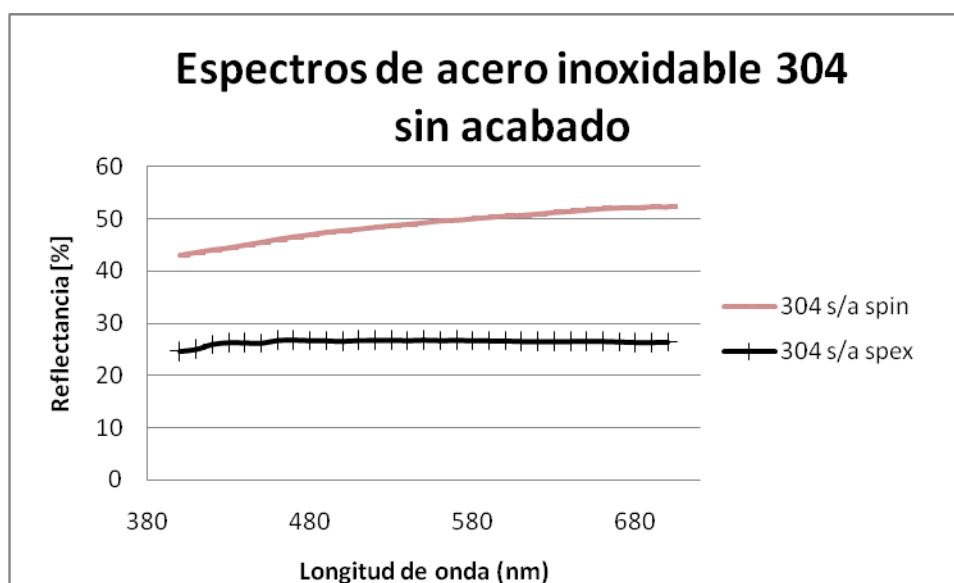


Figura 21. Espectro en el rango visible del acero inoxidable AB sin acabado

Tipo de Acero	Id.	Componente especular incluida		Componente especular excluida	
		α prom %	desviación estándar	α prom %	desviación estándar
304	4	92.6173548	1.08132991	88.1653871	3.20959013
304	6	94.2162903	0.9216405	90.6014516	2.01643912
304	7	93.1057419	0.79031791	88.0820645	1.065912
304	1	95.9428387	0.70918155	90.0732903	2.94188784
441	1	94.6505161	0.80031131	94.5361935	0.75750025
304	Pint.HH	95.0643548	0.17670041	94.9869677	0.07857925
304	s/acabado	73.5444839	0.48146484	51.2422581	2.88673254

Tabla 15. Valores de absorptancia promedio calculados a través de la ley de Kirchoff

5.4 Cubierta transparente y aislante

En relación con lo que se ha mencionado en secciones anteriores la cubierta transparente evita pérdidas por convección. En este trabajo se emplea vidrio templado cuyo espesor es de 3 mm y su transmitancia se considera de referencia igual a 0.8. La distancia media empleada entre la cubierta transparente y la placa de absorción es de 4 cm (Figura 22) que se encuentra dentro de los límites (2 a 4 cm) señalados por Pilatowsky¹².

	K (W/mK)
Ladrillo aislante	0.15
Ladrillo rojo	0.6
Hormigón	0.8
Corcho	0.04
Fieltro	0.04
Fibra de vidrio	0.04
Vidrio	0.8
Hielo	1.6
Lana mineral	0.04
Espuma de poliestireno	0.01
Madera	0.12 – 0.04
Aire	0.024
Argón	0.016
Helio	0.14
Hidrógeno	0.14
Oxígeno	0.023

Tabla 16. Tabla de conductividades térmicas aislantes³⁷

Como aislante se eligió fibra mineral de 1.5 in, la cual es fabricada a partir de una formulación química semejante a una roca basáltica o una lava volcánica, combinando minerales naturales y sintéticos en una masa viscosa (lava) a alta temperatura que se estira en un proceso de centrifugación, seguido de un paso de refinación o separación de la fibra de perdigón en medio neumático. En la Tabla 16 se muestran valores de conductividad térmica para distintos materiales, y se hace notar el valor de 0.04 W/mK para la lana de fibra mineral.

La marca del aislante elegido es RolanTM el cual cumple la norma mexicana NOM-009 ENER y además la norma de la American Society Testing Materials ASTM C-795 sobre aislamiento para ser usado sobre acero inoxidable. Algunas de las propiedades suministradas por el proveedor se mencionan a continuación: ✂Resiste a bacterias y hongos ✂ Temperatura de operación -183°C a 750°C ✂No contiene asbesto ✂Absorción de humedad <1% en volumen ✂Encogimiento 0% expuesto a 650°C ✂No despidе olores.

5.5 Colector integrado

El colector solar propuesto se compone de placas paralelas conectadas a cabezales de ¾ in diámetro interno. El flujo de calor atraviesa, en la sección transversal, un espesor de las placas de 0.6mm. El

flujo de agua que pasa entre éstas, con un espesor de 3 mm, entra de forma paralela a la dirección de las placas y el patrón de flujo impreso en la placa permite una distribución del mismo generando vorticidad, evitando con esto zonas muertas. En la Figura 22.a) se muestra una esquematización del armado del colector solar con todos sus componentes, en 22.b) se visualiza el colector armado dentro de la caja de soporte.

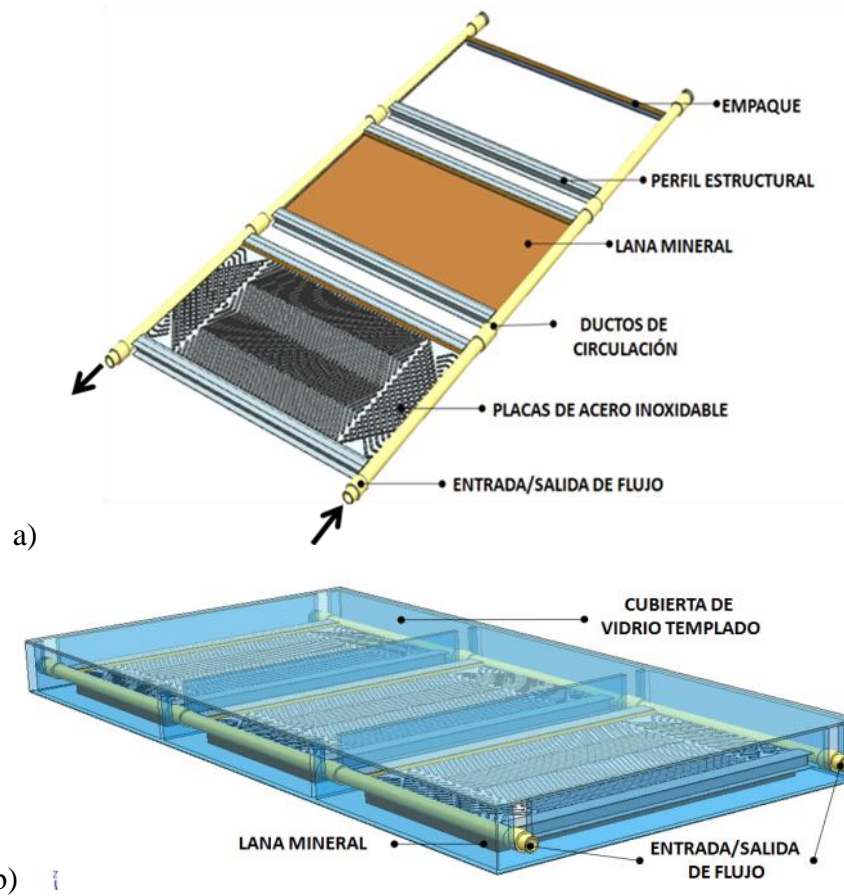


Figura 22. Componentes del colector a) ensamble y b) colector armado

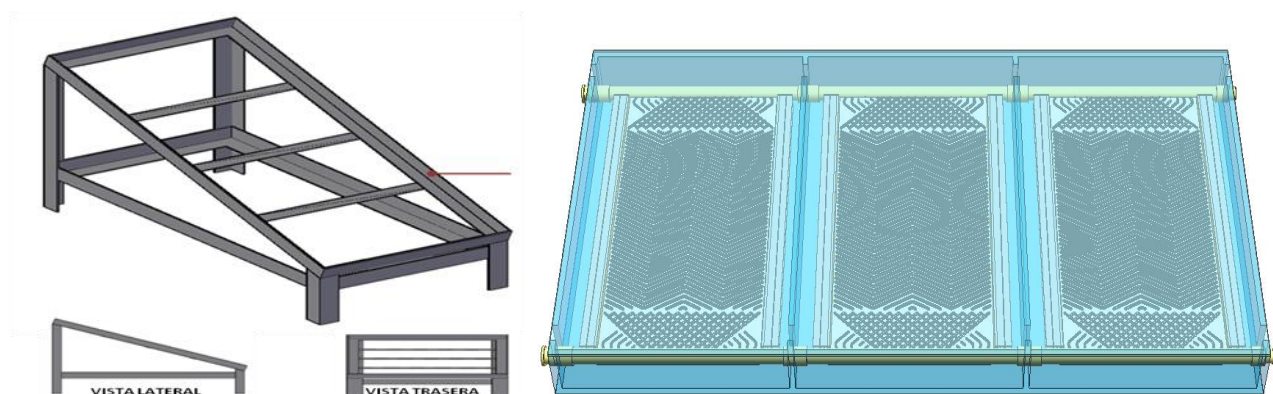


Figura 23. a) Soporte del colector y b) Colector armado (vista frontal)

El uso de un empaque o silicón evita el empleo de soldadura ya que ésta puede provocar corrosión en ambiente acuoso. Además de ser un factor potencial de corrosión, la soldadura en acero inoxidable no es de bajo costo ya que requiere el uso de gases como el argón y de capacitación adecuada para aplicarla.

El colector armado con tres módulos tiene un peso en vacío de 14.2 kg., una capacidad de 6.5 L incluyendo cabezales, un área de apertura es de 0.84 m² y un área de las placas de absorción de 0.65 m². La caja con el aislante tiene un peso de 7.7 kg y con el vidrio de 9.1 kg. Siendo un total de ~31 kg.

El diseño elegido para el soporte es el convencional en el que el tanque se coloca en la parte superior permitiendo, el fenómeno de circulación de agua por termosifón. El soporte de éste deberá de ser lo suficientemente resistente para el peso del mismo así como para resistir las fuerzas de la naturaleza. El soporte con la inclinación de la latitud del lugar es mostrado en varias vistas en la Figura 23.a).

5.6 Sistema hidráulico

La disposición del sistema hidráulico es otra de las definiciones importantes para el buen funcionamiento de un colector solar por termosifón. De manera esquemática en la Figura 24 se muestra el diagrama del sistema hidráulico propuesto para la experimentación de este diseño.

El circuito trata de representar la situación más común de la configuración del sistema en una casa. Se muestran los componentes primarios: el colector solar, el tanque de almacenamiento, el depósito primario y los elementos de interconexión. Para el colector básico analizado se realiza la interconexión de 3 módulos.

En los 3 módulos se tienen 6 L, y en el sistema en total, incluyendo tubería y tanque de almacenamiento se tienen 50 L. El acoplamiento de los 3 módulos se realizó en paralelo, lo cual proporciona un funcionamiento similar en todos los módulos del colector. En este tipo de conexión se obtiene un incremento tanto de presión como de temperatura menor que al compararlo con una conexión en serie de los mismos 3 módulos, sin embargo, las pérdidas se

incrementan al incrementar el diferencial de temperatura en el fluido de trabajo y el incremento en la presión siempre afecta la estructura del colector.

La interconexión en paralelo proporciona buen rendimiento, pero incrementa la longitud de tuberías y el diámetro necesario, al ser el flujo total la suma de los flujos en todos los captadores. Los captadores con salidas laterales y conductos internos horizontales de sección suficiente, pueden conectarse en paralelo, lo cual reduce la longitud y complejidad¹², como es el caso del sistema empleado en este trabajo.

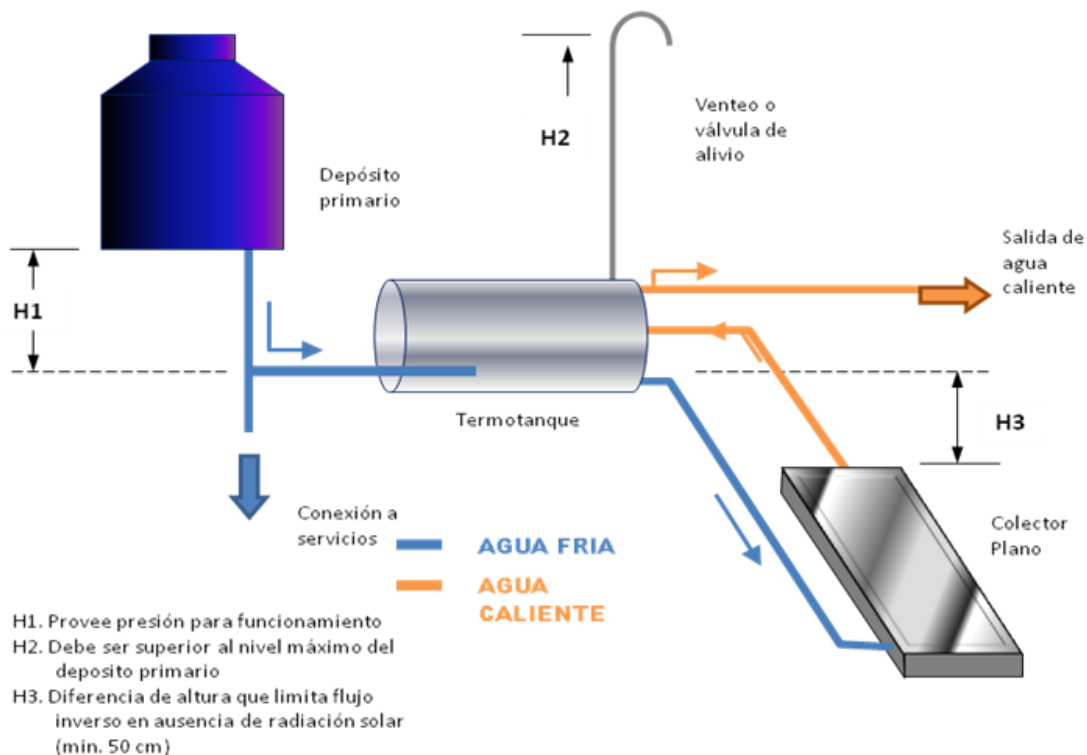


Figura 24. Sistema hidráulico

6. Modelo matemático

Una vez determinados los materiales de los componentes básicos, se procede a hacer una descripción matemática del fenómeno físico implicado en un colector solar. **La intención de esta sección es definir la ecuación general, que gobierne la interacción entre el sólido y el líquido para obtener una aproximación a la solución de esta ecuación.** Para esto, las propiedades mencionadas con anterioridad cobran valores, los cuales han sido justificados a lo largo de este trabajo. El planteamiento de la solución de este problema sigue la metodología de acuerdo al libro *Fenómenos de Transporte*, Bird³⁸.

6.1 Definición del sistema

El fenómeno a estudiar es la transferencia de calor de la placa de absorción hacia el fluido de trabajo, siendo el agua calentada a partir de la energía recibida del sol en la placa de absorción y transmitida por distintos mecanismos. En la Figura 25, indicando el sistema de coordenadas de referencia, se observa una esquematización del sistema a estudiar, una vista lateral del mismo y el elemento de volumen elegido. También se visualizan los dominios de cada cuerpo, llamando de esta forma, sólido al acero inoxidable y líquido al agua. En cuanto al espesor, se mencionó en la sección 5.2 que la placa de acero inoxidable es calibre GA.24 lo cual corresponde a 0.6 mm; respecto al flujo de agua se eligió, en orden de cumplir un volumen ~ 1.3 lt, el espesor δ_c de 3 mm. Cabe mencionar que la aplicación original emplea 1 mm.

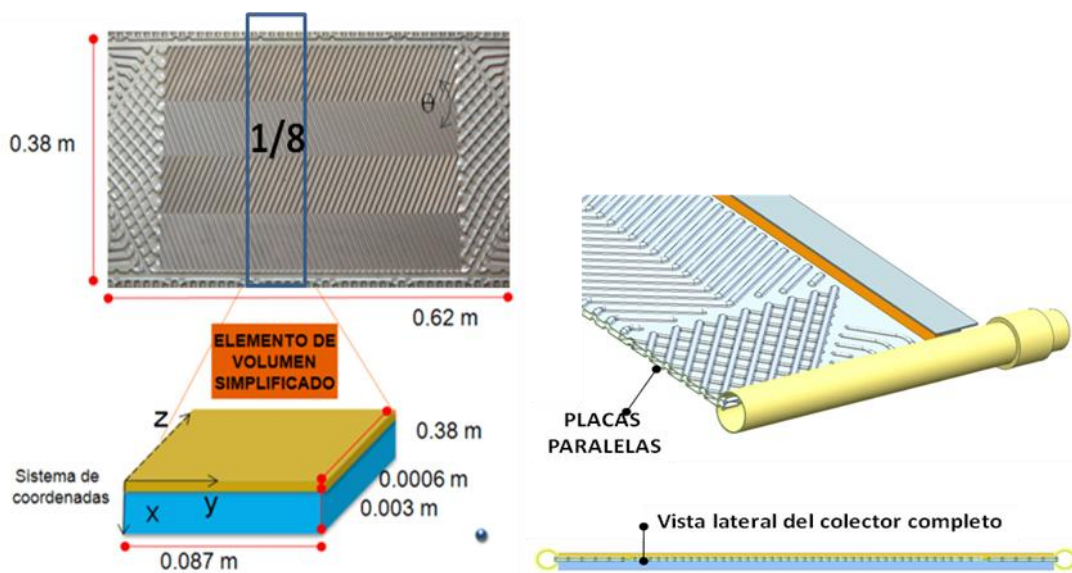


Figura 25. Diagrama del elemento de volumen del sistema

Es importante notar que las ondulaciones de las placas hacen que el flujo de agua entre ellas no sea horizontal totalmente. Esto se puede llevar a un sistema simplificado, respetando las condiciones de entrada de flujo, en el que las dimensiones del elemento de volumen en la dirección z se conservan, ya que el supuesto es que el campo de velocidades del agua a través de la sección transversal sería modificado si no se respetara la longitud real de la placa.

Se iniciará enfocando el estudio a un elemento de volumen diferencial; éste en un inicio se considerará plano y simétrico. Posteriormente se hará el análisis para la placa completa, y finalmente la placa con el patrón de flujo. En resumen, las dimensiones serán:

- Elemento de volumen: 0.087 m x 0.38 m, **proporcional a 1/8 de placa el cual fue elegido arbitrariamente de acuerdo a la capacidad computacional de simulación**
- Placa completa: 0.62 m x 0.38 m, **dimensiones restringidas por el proceso de manufactura actual**

Para caracterizar el sistema es importante determinar los parámetros adimensionales que lo rigen. El número de Reynolds, de Prandtl y Nusselt definen características del sistema, y sus equivalencias matemáticas corresponden a la Ecuación (21 a), (21 b) y (21 c) respectivamente.

$$\text{a) } Re = \frac{\rho_f \vec{v}_f L}{\mu} \quad \text{b) } Pr = \frac{\mu C_p}{k_a} \quad \text{c) } Nu = \frac{h_a \delta}{k_a} \quad (21)$$

Haciendo referencia a lo discutido en la sección 3.3.1.1 de este trabajo, la transferencia de calor por radiación solar con la emisividad del recubrimiento de la placa metálica estará definida por las Ecuaciones (4) y (5). El calor transmitido por conducción estará definido por la ecuación (8). La transferencia del calor por convección se define en la ecuación (9). Todas éstas incluidas en la expresión (10), sobre las cuales es importante mencionar que tienen diversas equivalencias matemáticas dependiendo en función de qué variables se quieran determinar.

Como primer acercamiento se enlistan algunas consideraciones sobre las propiedades conocidas de cada cuerpo:

- Líquido, flujo de agua
 - Fenómeno descrito por la ecuación de Navier-Stokes
 - La masa se conserva lo que significa que la densidad y la velocidad están relacionadas: estado estable
 - Se busca incrementar la temperatura: sistema no isotérmico
 - Fluido incompresible: $\rho \approx \text{cte}$, $C_p \approx C_v$
 - $Re = 6959.32$: transición a turbulento
- Sólido, Acero inoxidable
 - Fenómeno de transferencia de calor descrito por Ley de conducción de Fourier
 - Conductividad $k_s = \text{cte}$

6.2 Ecuaciones de gobierno

Una vez definido el fenómeno físico, así como el elemento de volumen, es conveniente definir las interacciones de energía en el sistema, las fronteras del mismo y la dirección en que las cantidades de flujo de materia o energía serán consideradas como positivas para poder determinar las ecuaciones que rigen al sistema.

De acuerdo a la literatura, las expresiones matemáticas necesarias para resolver este sistema acoplado de ecuaciones diferenciales ordinarias corresponden a: una ecuación que describa el perfil de velocidades, otra que describa las interacciones de energía en función de la temperatura y la ecuación de continuidad que describe a un sistema incompresible en movimiento.

La ecuación de movimiento de un fluido incompresible es descrita por la llamada ecuación de Navier-Stokes, en la que es importante considerar si el movimiento sucede por convección libre o convección forzada.

La ecuación de energía hace el balance de todas las entradas y salida de energía, por los distintos mecanismos descritos, a través de las fronteras del volumen de control. Estas relaciones matemáticas son mostradas en las ecuaciones (22), (23), (24) y (25).

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho_f \vec{v}_f = 0 \quad (22)$$

Ecuación de movimiento

Convección forzada

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_f \vec{v} = -\nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) - \nabla P - (\nabla \cdot \tau) + \rho_f g \quad (23)$$

Convección libre

$$\nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -(\nabla \cdot \tau) + \rho_f \beta g (t - \bar{t}) \quad (24)$$

Ecuación de energía

$$\rho_f C_p \frac{\partial t}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_a \nabla t) = -\rho_f C_p (\vec{v}_f \cdot \nabla) t + \tau : \left(\frac{1}{2} \nabla \vec{v}_f + (\nabla \vec{v}_f)^T \right) - \frac{t}{\rho_f} \frac{\partial \rho}{\partial t} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{v}_f \cdot \nabla P \right) \quad (25)$$

Si el fluido estuviera únicamente contenido en el colector, es decir, con velocidad 0, todo el término derecho de la ecuación de energía (25) se haría cero, conservando la ecuación de transferencia de calor por conducción.

La Figura 26 muestra de manera general una descripción del flujo de energía y las propiedades de cada cuerpo. Además, se muestran algunas propiedades iniciales de cada cuerpo, las ecuaciones que describen el fenómeno llevado en cada dominio y, en adición, se indican las condiciones de frontera. Si suponemos que el sol se encontrara en la parte superior de esta hoja, y que cada uno de los bloques representa las capas del elemento de volumen, entonces podemos añadir una descripción matemática para cada una de estas. Así, se muestran de izquierda a derecha: el fenómeno que rige en ese dominio, la dirección del flujo de energía considerado positivo, las condiciones iniciales y de frontera, la equivalencia matemática del fenómeno y en la última columna se observa la variable que se busca resolver. Más adelante, se detallan estas propiedades.

En adición en la Figura 26 se delimita claramente el Volumen de Control (recuadro), que es donde se hacen evidentes las interacciones que deben de ser consideradas en el balance de energía si nuestra atención está enfocada a conocer la temperatura promedio final del agua. El diagrama es simplificado a una visualización bidimensional, sin embargo el análisis es considerado de forma tridimensional.

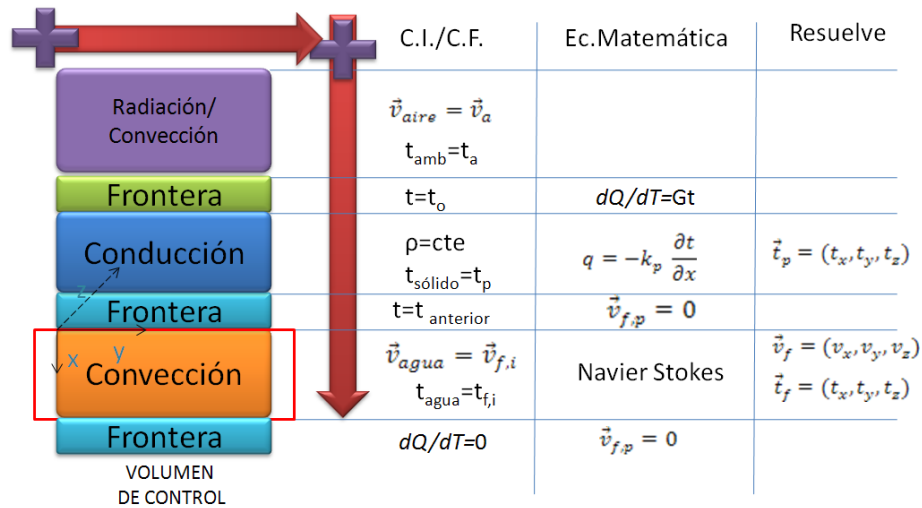


Figura 26. Flujo de energía, volumen de control, condiciones de frontera, ecuación que rige el dominio

Se visualiza que el modelo matemático está acoplado, ya que la solución de uno de los fenómenos depende del otro; de este modo se hace evidente que se pretende obtener tanto un perfil de temperaturas como un perfil de velocidades, que indiquen en el espacio-tiempo el comportamiento del fluido.

Es necesario enfatizar que las fronteras del elemento de volumen elegido coinciden con las fronteras del fluido de trabajo en todo momento. Una vez definido el volumen de control a detalle se procede a la realización del balance de energía para el cual se tienen las siguientes consideraciones:

-
- Se desprecian los cambios de las energías cinética y potencial
- Se desprecian los cambios de energía por otras fuerzas que las viscosas
- La velocidad del flujo a la entrada del colector se supone conocida
- El calentamiento del agua se inicia a partir de la temperatura ambiente
- Se desprecian las pérdidas de calor en el aislante
- Se consideran constantes los valores de la conductividad térmica del agua y del metal, así como los valores de la densidad, sin embargo, éstos en la realidad varían
- Se desprecian los términos de la conversión en energía térmica y trabajo comunicado a los alrededores

En la Figura 27 se muestran las interacciones de energía, indicadas por flechas, de los mecanismos de conducción y convección, en adición se indica la conversión de energía interna, así como el trabajo realizado por el fluido hacia los alrededores debido a fuerzas de expansión.

Se determinan también las condiciones de frontera mostradas de manera bidimensional. La entrada de flujo de agua sucede con una velocidad \vec{v}_f (sección 8.2) y una temperatura $t_{f,i}$ conocidas. En las paredes entre la placa y fluido la velocidad del fluido es cero; la condición de la frontera de la cara de la placa que está en contacto con el fluido es indicada como continuidad, debido a que la temperatura $t_{p,agua}$ de ésta se conoce al resolver el perfil de velocidades por conducción en la placa, que para los fines las interacciones en el volumen de control es necesario conocer esta temperatura. En la parte inferior del volumen de control la descripción de la condición de frontera corresponde al aislamiento térmico equivalente a $dQ/dT=0$. El agua sale por flujo convectivo, dejando el volumen de control.

Finalmente con todas las consideraciones descritas, se define el modelo matemático a resolver a partir de las ecuaciones (25), en las siguientes ecuaciones acopladas (26)

- Ecuación de Movimiento

$$\nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -(\nabla \cdot \tau) + \rho_f \beta g(t - \bar{t}) \quad (26)$$

- Ecuación de Energía

$$\nabla \cdot (-k_a \nabla t) = -\rho_f c_p (\vec{v}_f \cdot \nabla) t \quad (26')$$



Figura 27. Balance de energía y condiciones de frontera en el volumen de control

6.3 Solución a través de simulación en COMSOL™

La solución numérica de las ecuaciones acopladas (26) diferencial es demasiado compleja, por lo que se resuelve con COMSOL™, un programa de simulación avanzada, que integra la resolución de ecuaciones que rigen fenómenos físicos a partir de la geometría simulada en el programa. Esto permite una fácil visualización de los fenómenos. Las ecuaciones diferenciales y las condiciones de frontera son aplicadas al dominio de los cuerpos representando las dimensiones reales. Una malla es generada usando el software, la cual automáticamente segmenta los cuerpos en elementos triangulares. El modelo es resuelto usando un solver de ecuaciones diferenciales ordinarias. En la Figura 28 se muestra el diagrama simplificado de lógica de resolución del modelo.

A continuación se describen las características de la simulación.

- Metodología
 - Se usa por módulo
 - Cada dominio tiene un comportamiento descrito por una ecuación (Figura 26)
 - Primero se resuelve para obtener el perfil de velocidades
 - Segundo se resuelve para obtener el perfil de temperaturas
 - Se utiliza como solver general Direct UMFPack, con una tolerancia de 10^{-3}
 - Se comprueban resultados con hoja de cálculo

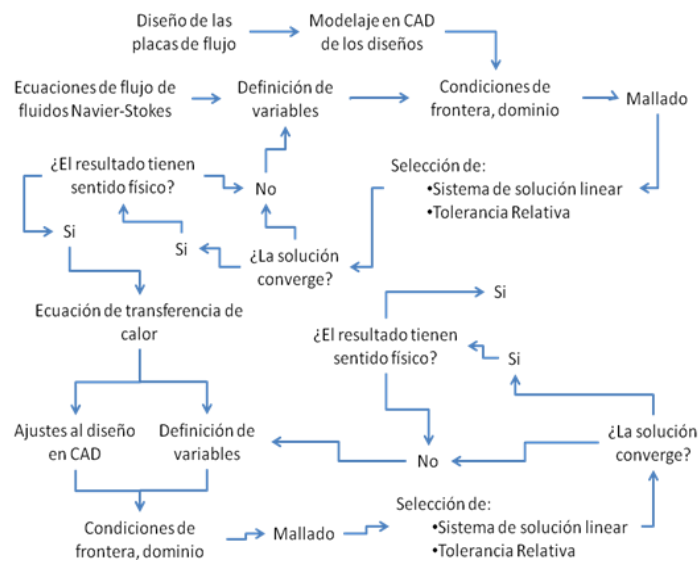


Figura 28. Diagrama de flujo de lógica COMSOL

6.3.1 Variables del sistema

En la Tabla 17 se muestra una relación de variables con los valores considerados para la resolución del elemento de volumen con las especificaciones dadas. Cada uno de estos valores está sustentado en la discusión a lo largo de este trabajo, es decir, ya sea el material, el estado de la materia o propiedades de los cuerpos enlistados a continuación provienen de las descripciones discutidas, de acuerdo a la sección indicada en la última columna de esta Tabla.

Descripción	Nomenclatura		Cantidad	Unidades		
	a					
Tiempo	t		18000	s	5hrs	
Condiciones de Querétaro						
Irradiancia promedio (sept,oct,nov,dic)	G_{\min}		600	W/m ²		4.1.2
Irradiancia promedio (abril,mayo,junio,julio)	G_{\max}		700	W/m ²		4.1.2
Angulo de inclinación	θ		20	°		4.1.2
Temperatura Ambiente Mínima promedio	$t_{a,\min}$		20	°C		4.1.2
Temperatura Ambiente Máxima Promedio	$t_{a,\max}$		25	°C		4.1.2
A la entrada del colector	$t_{f,i}$		293.15	°C		
P atmosférica	P_a		102200	Pa	4lb/in	
P de agua	P		131600.57	Pa	27kPa	
Cubierta transparente						
Emisividad	ϵ		0.95			5.4
Transmitancia	τ		0.8			5.4
Espesor	δ_c		3	mm		5.4
Absorbedor						
Absortancia	α		0.9			5.3.4
Conductividad térmica	k_{304}		26.8	W/mK		5.2
Espesor lámina	dd		0.0006	m		5.2
Área superficial	A_c		Por 1	módulo	3 módulos	
Largo	L		0.62	m	0.62 m	5.2.2
Ancho	W		0.38	m	1.14 m	5.2.2
Espesor de flujo transversal	d		0.003	m	0.003 m	5.2.2
Área	A		0.235	m ²	0.706 m ²	

Volumen	V	0.00078	m ³	0.002 m ³	
		0.706	lt	2.120 lt	
Área total del colector	Ag	0.68	m ²		
Área de apertura del colector	Aa	0.84			
Masa de agua	m	0.7060932	kg	2.12 kg	
Número de 'grooves'	N	47			5.2.2
Distancia entre 'grooves'	n	0.005	m		5.2.2
Flujo					
		(F1,F2,F3,F4,F5,F6,F7)			
Flujo másico	m		kg/s	(3 módulo)	
Velocidad	v1	0.01	m/s		8.2
Parámetros adimensionales					
Re	$\rho v L / \mu$	6959.325			6.1
Un	$h^* L / k_a$	88.571			6.1
Pr	$\mu C_p / k_a$	0.0059			6.1
Propiedades Agua					
Viscosidad dinámica	μ	0.00089	N s/m ²		
Viscosidad cinemática	ν	0.0000008	m ² /s	0.0006 Pa s	
Densidad	ρ	999	kg/m ³		
Coefficiente de transmisión del calor	h_a	90	W/m ² K		A.3
Dureza	D	250	mg _{CaCO3} /l		5.1.1
pH	pH	7.35			5.1.1
Calor específico	C_p	4.181	KJ/kg K		
Conductividad térmica del agua	k_a	0.63	W/mK		
Capa de aire					
Coefficiente de transmisión del calor	h_c	5	W/m ² K		A.3.
Espesor de capa de aire	δ_c	0.04	m		5.3
Aislante					
Conductividad térmica	k	0.04	W/mK		5.2.1
Termo-Tanque					
Consumo de agua caliente/persona	C	40	L/día		4.2
Altura al colector	H3	0.3	m		4.3.2
Deposito primario					
Altura al tanque de almacenamiento	H1	0.5	m		4.3.2

Tabla 17. Variables del sistema

6.3.2 En el elemento de volumen

Se inicia el análisis de un elemento de volumen simplificado a placas planas, a partir del cual se realizará la simulación de las dimensiones reales. Los resultados obtenidos por el simulador se muestran en las siguientes Figuras, indicando los campos vectoriales en escala de colores. Como referencia se mantiene una imagen del sistema de coordenadas en el elemento de volumen:

Perfil de temperatura

Se observa, de la Figura 29, que la temperatura en la placa superior, que es la que recibe la radiación del Sol, incrementa la temperatura del fluido, y por la misma velocidad del fluido la placa transfiere energía hacia el fluido. La temperatura mínima en azul corresponde con la temperatura ambiente de 20°C , que es la condición inicial de temperatura en la experimentación.

Perfil de velocidad y vorticidad

Se corroboran en la Figura 30 las condiciones de frontera en cuanto a velocidad, es decir, en todas las paredes la velocidad es cero. De acuerdo las dimensiones y a la velocidad propuesta es presentando un perfil no laminar. Se muestran cortes del perfil de velocidad con la máxima velocidad al centro de las placas, alrededor de una distancia de 1.5 mm, disminuyendo hacia las paredes y aumentando ligeramente conforme aumenta la temperatura del fluido. Del lado derecho de la imagen se observa vorticidad a través del flujo de agua acentuada cerca de la placa superior.

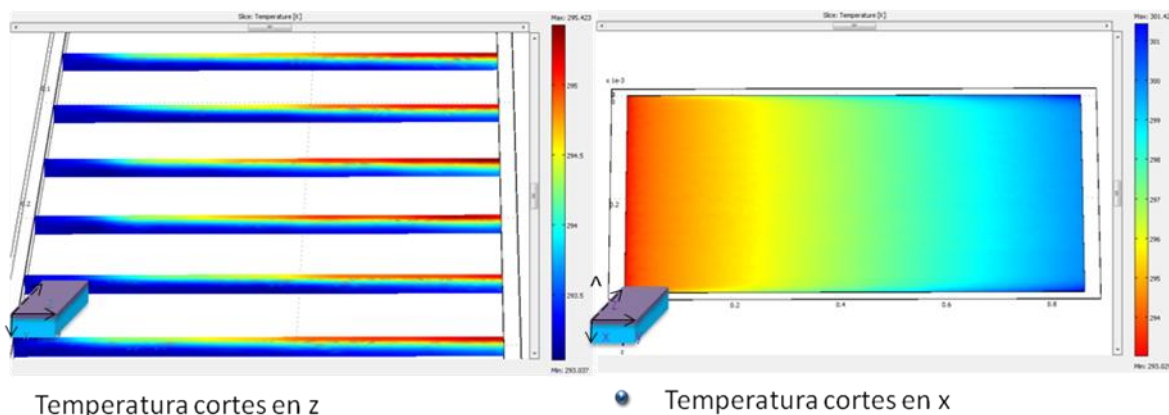
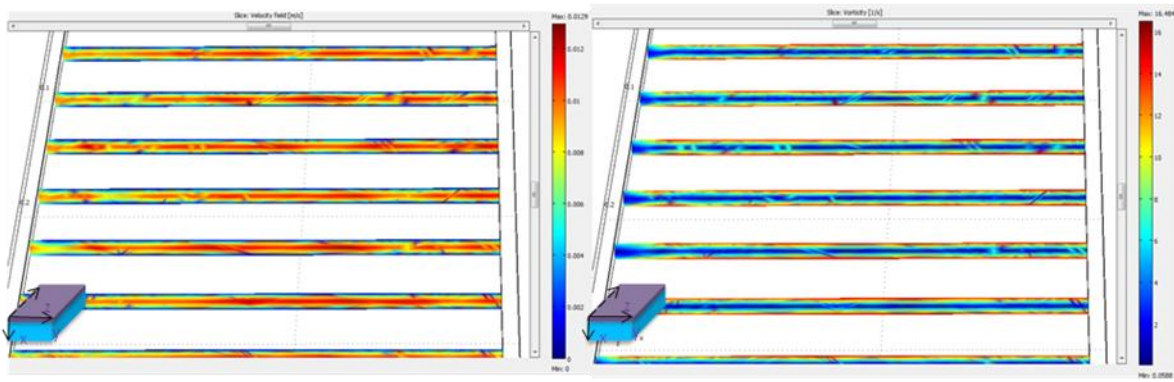


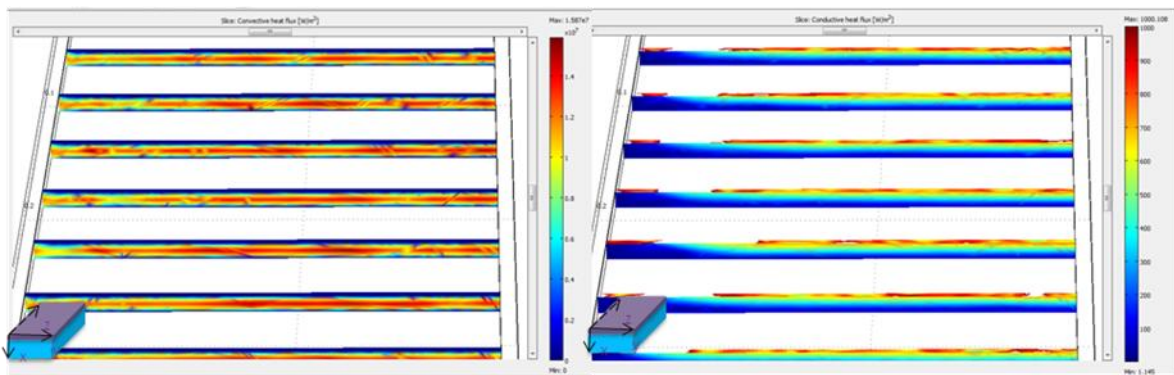
Figura 29. Temperatura en el elemento de volumen a)



● Velocidad subdominio

● Vorticidad subdominio

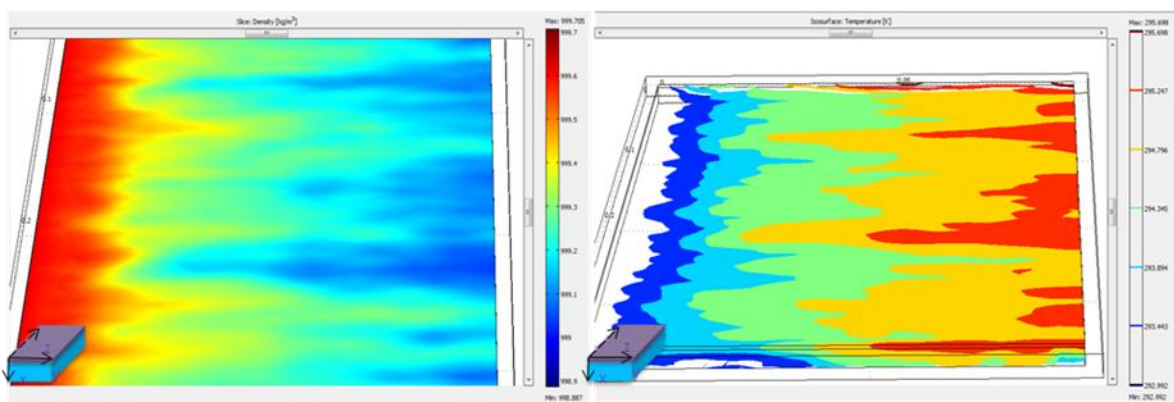
Figura 30. A) Velocidad y b) Vorticidad en el elemento de volumen



● Flujo convectivo

● Flujo conductivo

Figura 31. A) Flujo convectivo y b) flujo conductivo en el elemento de volumen



● Densidad subdominio

● Gráfica Isotermas

Figura 32. A) Densidad y b) Isotermas en el elemento de volumen

Flujo convectivo y Flujo conductivo

Con los resultados mostrados en la Figura 31, se verifica que los fenómenos de transferencia de calor suceden en el dominio adecuado. Del lado izquierdo, en el dominio del fluido, se muestran las corrientes convectivas por diferencia de temperaturas, favorecidas por la misma velocidad del flujo. Del lado derecho, el flujo conductivo de calor muestra los mayores valores en el dominio de la placa de metal, y debido a la baja velocidad del fluido también existe conducción en el dominio del agua.

Perfil de densidad del agua

La Figura 32 muestra el cambio de densidad a lo largo del diferencial de volumen, disminuyendo la densidad del agua en la dirección en que es calentada. Como complemento se muestra una grafica de cortes de superficies con la misma temperatura.

Todos los anteriores son cambios casi imperceptibles en la realidad ya que el elemento diferencial usado es muy pequeño. Con esto se corrobora la afirmación de que la energía solar transformada en calor dependerá del área de captación de energía. El cambio de densidad del agua a través de 8.7 cm es casi imperceptible, sin embargo este cambio de densidad sustenta el hecho de la aparición del fenómeno de termosifón comentado con anterioridad.

Para obtener los valores de temperatura t , presión P y velocidad en cada dominio o frontera, se realiza la integración por área o volumen de cada uno de acuerdo a los valores de la Tabla 18. Esto se hace debido a que el simulador arroja los valores por unidad dimensional. De esta forma podemos conocer las propiedades en un punto, en un plano o en un dominio. De hecho se muestran los valores obtenidos en las superficies de frontera más importantes, como la cara de la placa de absorción que recibe la energía del sol, o la de la placa en contacto con el agua. También se aprecian los valores en los planos de entrada y salida del colector. En la columna llamada Frontera de la Tabla 18 se recurre al identificador numérico asignado en la simulación de cada una de las superficies de frontera. Del mismo modo, para conocer las propiedades finales del agua como se evalúa el dominio asignado en el simulador.

Frontera	Variable	Valor integrado de T	Área	Temperatura K
1	$t_{f,i}$	0.334 m ² K	0.001 m ²	293.15
10	$t_{f,e}$	0.335 m ² K	0.001 m ²	294.080 $\Delta t = 0.930$
9	$t_{p,sol}$	9.739 m ² K	0.033 m ²	294.606
6	$t_{p,agua}$	9.738 m ² K	0.033 m ²	294.579
Dominio	Variable	Valor integrado de T	Volumen	Temperatura K
Agua	t_f	0.029 m ³ K	0.00009 m ³	293.647 $\Delta t = 0.498$

Tabla 18. Balance de energía en el volumen de control

6.4 Validación del modelo

La validación se realiza mediante hoja de cálculo a partir del balance macroscópico de los mismos elementos de volumen analizados con anterioridad. Éste balance únicamente nos indica los estados iniciales y finales respecto a la temperatura de la masa del fluido una vez que transcurrió el tiempo de interés. Se puede decir que es una manera más sencilla en cuanto a cálculos de obtener la temperatura final, si se consideran las dos ecuaciones diferenciales ordinarias que son resueltas por un simulador computacional. El fin esperado es un incremento a través del tiempo en la temperatura a la entrada y la salida del colector, para lo que se compararan valores de éstas obtenidas tanto con el simulador como con el balance macroscópico mostrado a continuación.

De acuerdo a la expresión de la ecuación (27), es posible tener una relación entre el calor recibido de la energía solar con el cambio de temperatura Δt en el fluido de acuerdo a su capacidad de aumentar de temperatura C_p por unidad de masa m

$$q_{opt} = mC_p \Delta t \quad (27)$$

Donde la masa de agua se conoce a partir de la relación de la densidad

$$m = \rho_f V \quad (28)$$

Y por consiguiente se puede obtener la temperatura final del fluido, despejándola de (27)

$$t_{f,e} = \frac{q_{opt}}{mC_p} + t_a \quad (29)$$

En la Tabla 19 se muestran los resultados de los cálculos de las Ecuaciones (27) y (29), para el elemento de volumen.

PLACA PLANA	Dimensiones Elemento de volumen	Transferencia de calor			
L	0.087 m				
W	0.38 m	$q_{opt} = m C_p \Delta t$			
d	0.003 m	T=		8.7 s	
A	0.033 m ²	$\dot{q}_{opt} =$		23.142 W	
V	9.91E-05 m ³	$q_{opt} =$		0.201 KJ	
	0.099 lt	$t_{f,e} =$		293.636 K	
m	0.099 kg	$\Delta t =$		0.485	

Tabla 19. Balance de energía macroscópico en el elemento de volumen

Finalmente si comparamos el incremento de temperatura calculado a través del balance macroscópico, Tabla 18, $\Delta t = 0.48^\circ\text{C}$ con el del valor obtenido por el simulador, Tabla 17, $\Delta t = 0.49^\circ\text{C}$ se observa que podemos concluir que la simulación en COMSOL™ es confiable.

Por consiguiente, de esta forma es verificado que los fenómenos, considerando un par de placas planas paralelas, son simulados adecuadamente lo cual permitirá la extrapolación a una geometría más compleja.

6.5 Resultados de la placa Tranter™

Una vez que se ha corroborado el modelo matemático de la simulación en una placa plana, se obtienen los resultados de la placa de acero inoxidable en COMSOL. Para el caso de la placa Tranter™ a emplear en la experimentación aún es importante considerar el incremento de área de transferencia de calor, así como las mayores pérdidas por fricción interna y los cambios de velocidad por el mismo patrón de flujo.

En orden de obtener la simulación de las placas completas éstas se modelaron a partir de la placa real. Es decir, los diseños de las placas Tranter™, al ser propiedad industrial no están a nuestro alcance, por lo que fue necesario reproducirla a semejanza de la placa real con la que se cuenta.

6.5.1 En el elemento de volumen

Se toma el elemento de volumen con las mismas dimensiones –que en el caso simplificado de placas planas- y se realizan la misma serie de análisis visuales mostrados con anterioridad. En la

Figuras 33 y 34 se observa que el patrón de flujo favorece una adecuada distribución de temperatura tanto a lo largo, como lo ancho, del elemento de volumen. Se observa también que la isoterma de menor temperatura es adyacente al plano de la placa que está en contacto con el aislante.

La Figura 35.a) muestra la temperatura en la parte media del flujo de agua, en esta vista se observa que el flujo, entrando esquemáticamente de abajo hacia arriba, va siendo calentado en su recorrido. La transferencia de calor por efecto convectivo es mostrada en la Figura 35.b).

La Figura 36 muestra el patrón de velocidad en el que se observa una distribución esperada, en la que, cerca de las paredes de la placa, la velocidad es cercana a cero, y justo en la parte media del flujo de agua la velocidad es más alta como se aprecia en la imagen del lado derecho.

Realizando el mismo procedimiento de estimación de datos a partir de la información del simulador, se muestran los resultados en la Tabla 20, en la que en la columna llamada ‘frontera’ se aprecia el número identificador de la frontera física evaluada. Se aprecia que el modelo con ondulaciones presenta mayor complejidad en su simulación ya que se compone de más de mil segmentos que reconoce como fronteras.

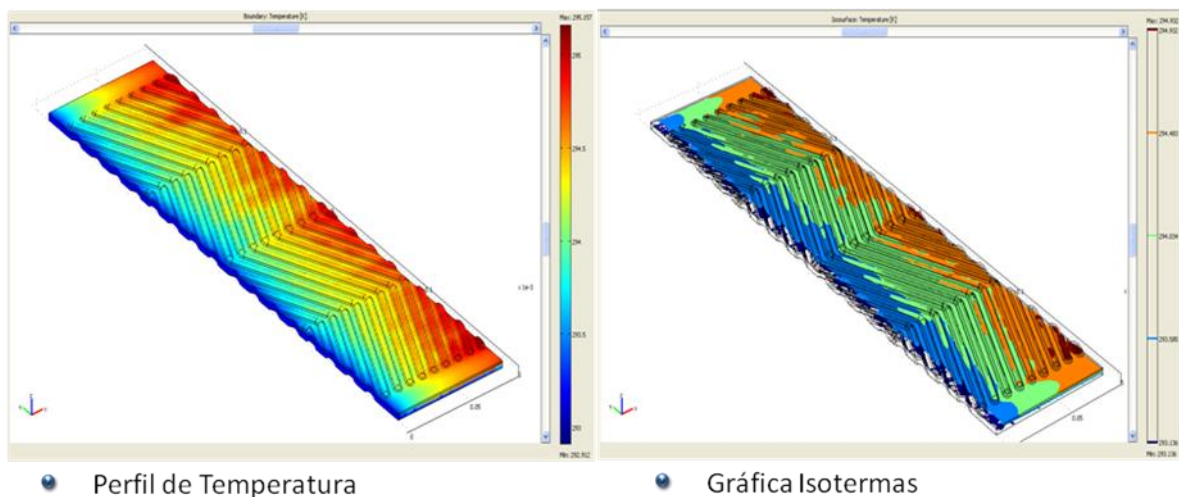


Figura 33. a) Temperatura y b) Isotermas en el elemento de volumen con patrón de flujo

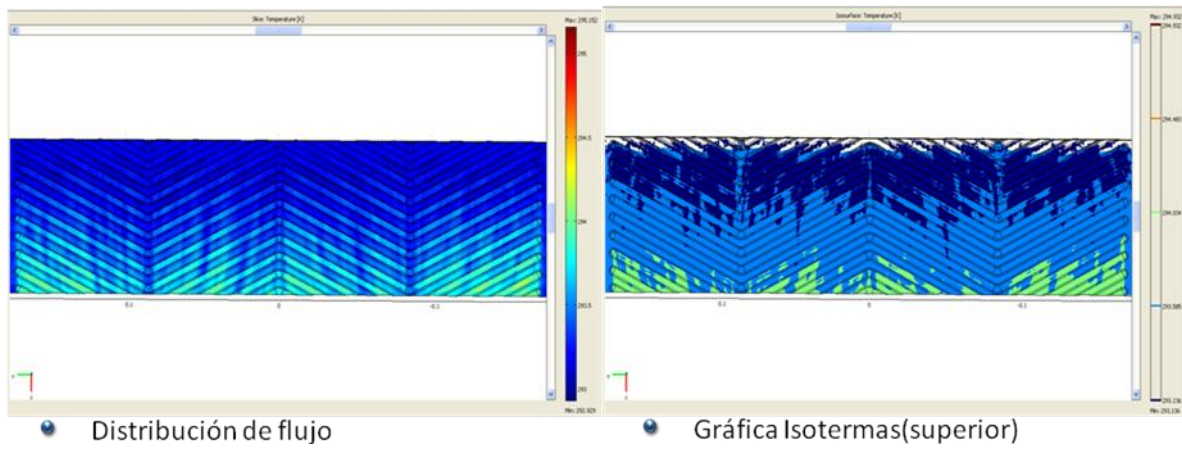


Figura 34. a) Distribución de flujo y b) isotermas en un elemento de volumen con patrón de flujo

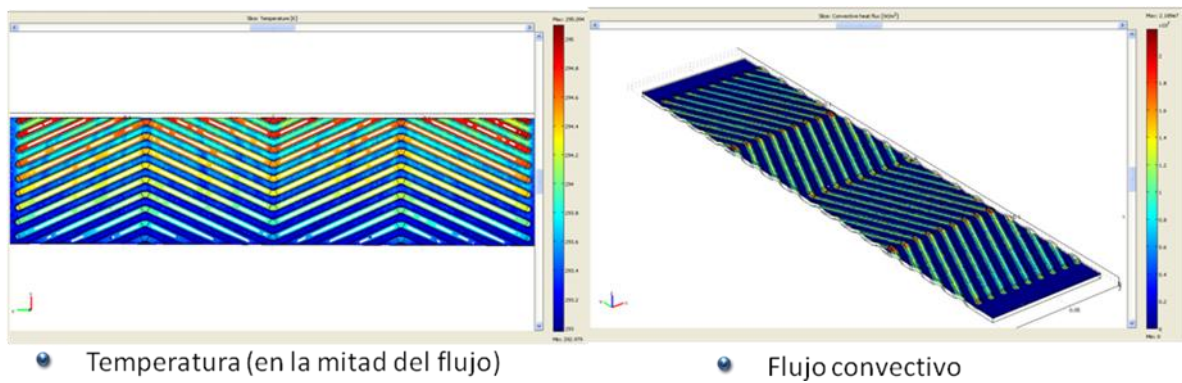


Figura 35. a) Temperatura en corte transversal a la mitad de la distancia de flujo y b) flujo convectivo

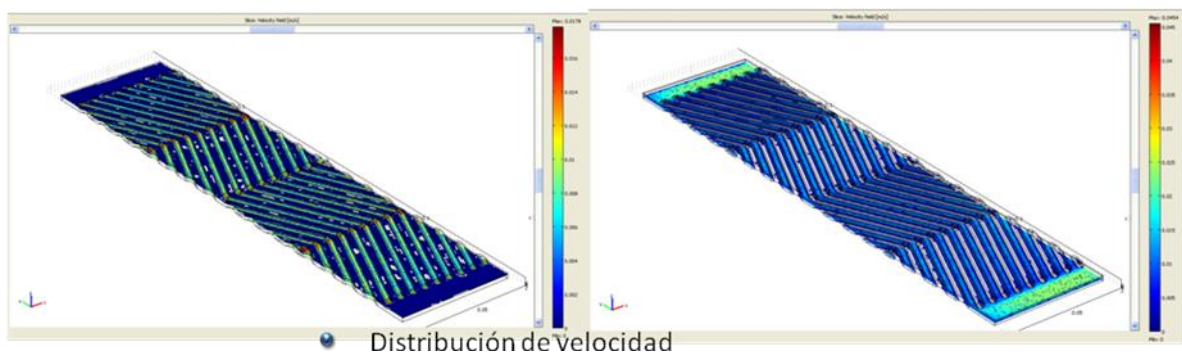


Figura 36. Distribución de velocidades en cortes transversales en un elemento de volumen

Placa ondulada elemento						
v=0.01m/s						
Frontera	Variable	Valor	Área	Temperatura K		
integrado de T						
1	$t_{f,i}$	0.312	$m^2 K$	0.001064	m^2	293.239
856	$t_{f,e}$	0.313	$m^2 K$	0.001064	m^2	294.727
9	$t_{p,sol}$	9.739	$m^2 K$	0.03306	m^2	294.606
6	$t_{p,agua}$	9.738	$m^2 K$	0.03306	m^2	294.579
Dominio	Variable	Valor	Volumen	Temperatura		
integrado de T						
Agua	t_f	0.027	$m^3 K$	9.354E-05	m^3	293.585
Placa ondulada	t_p	0.011		3.955E-05		294.197
						Δt 0.345
						0.958

Tabla 20. Valores integrados de resultados de la simulación del elemento de volumen

Elemento de volumen	Dimensiones	Transferencia de calor	
		$q_{opt}=m C_p \Delta t$	
		T=	13.659 s
A	0.0519 m^2	$\dot{q}_{opt} =$	32.699 W
V	0.000155 m^3	$q_{opt} =$	0.446 KJ
	0.1557 lt	$t_f =$	293.836 K
m	0.15555 kg	$\Delta t =$	0.686

Tabla 21. Balance de energía macroscópico del elemento de volumen

Si comparáramos el área de transferencia de una placa con ondulaciones con las mismas dimensiones de una placa plana se tendría una ganancia en área total. Se calcula que esta relación de áreas es **1:1.58**. Este será el valor de la relación de área considerado ya que, de acuerdo a la complejidad del diseño del patrón de flujo es difícil obtener el valor exacto del área de la placa completa. **Es importante mencionar que este factor es considerado como una aproximación para simular las pérdidas internas en el fluido debido al contacto con una mayor superficie, así como las irregularidades en la radiación total recibida en la superficie deformada por el troquel.**

En la Tabla 21 se realizan los cálculos de Ecuación 27 pero modificando el área correspondiente de una placa plana por un factor de 1.58.

6.5.2 En la placa completa

La simulación del comportamiento de la placa completa con el patrón de flujo fue imposible realizar debido a limitación en la capacidad de memoria computacional. El principio de elemento finito es empleado para la resolución de las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor y movimiento, lo cual incrementa considerablemente el tiempo y complejidad. En orden de realizar una evaluación aproximada se simplifican los cálculos a un sistema de placas planas.

La Tabla 22 muestra la misma serie de cálculos de un balance macroscópico, modificando el área de una placa plana por un factor de 1.58, considerando las dimensiones de una placa completa. De esta forma se tiene un incremento en el área superficial de la placa, lo que a su vez incrementa la capacidad de volumen de un colector lo cual simula el diseño del colector prototipo. Se encuentra que el incremento por una variación de áreas es aproximadamente de $\Delta T \sim 4.89^\circ\text{C}$.

En la Tabla 23 se muestra un resumen de la serie de cálculos realizados tanto como para el elemento de volumen como la placa completa. Se incluye el valor de la diferencia numérica en valor absoluto de los resultados obtenidos empleando el balance macroscópico y la simulación.

Como se observa, la diferencia para la placa plana en el elemento de volumen es de 0.018°C , lo cual es una buena aproximación. Sin embargo, cuando se hace la modificación considerando el caso real con el patrón de flujo, se observa para el balance macroscópico una diferencia por arriba a los resultados de la simulación de 0.341°C , lo cual es aceptable debido a la consideración de las pérdidas por fricción y vorticidad principalmente. Esto se encuentra dentro de lo esperado, ya que el método a través del balance macroscópico considera la temperatura media de toda la masa de agua, sin considerar pérdidas por movimiento o a través de las paredes del colector.

El gran beneficio de la simulación es que nos brinda información adicional, ya que es posible integrarla en el dominio del plano de salida del fluido, en el que se observa un incremento de temperatura de 1.48°C . Lo cual, finalmente, es lo que se asemejaría más a la realidad. Se realiza una estimación a partir de balance macroscópico de la diferencia de temperatura para la placa completa y se encuentra una diferencia de 1.79°C comparando la placa plana y la placa con un factor de área de 1.58, que se enfatiza, es empleado como referencia para estimar los valores de temperatura mediante un análisis macroscópico, con las consideraciones mencionadas con anterioridad.

De esta forma se busca establecer una referencia teórica de los valores esperados en este sistema. Es decir, a partir de esta verificación se establecen las bases para la validación de los supuestos empleados y por consiguiente de la simulación computacional, los que a su vez serán corroborados con la parte experimental.

Así, se concluye que el valor estimado del incremento de temperatura para el colector propuesto es de $\sim 5^{\circ}\text{C}$ (Tabla 23), recorriendo una vez el colector completo, con una irradiancia total promedio de 700 W/m^2 y sin considerar propiedades selectivas en el acero inoxidable.

PLACA PLANA	Dimensiones	Transferencia de calor	
		$q_{\text{opt}} = m C_p \Delta t$	
		T=	97.34 s
A	0.3698 m ²	$\dot{q}_{\text{opt}} =$	233.031 W
V	0.00110 m ³	$q_{\text{opt}} =$	22.683 KJ
	1.109 lt	$t_{f,e} =$	298.043
m	1.108 kg	$\Delta t =$	4.893

Tabla 22. Balance de energía macroscópico en la Placa plana con un incremento de área

Geometría	Método de solución	Referencia	Elemento de volumen		Placa completa	
			t(°C) en toda la masa	t(°C) plano de salida	t(°C) en toda la masa	t(°C) plano de salida
(plano)	Balance macroscópico	Tabla 13	0.48	-	3.1	-
(plano)	Simulación	Tabla 12	0.498	0.93		
	Diferencia Absoluta		0.018			
(con A=1.6Ap)	Balance macroscópico	Tabla 15	0.686	-	4.89	-
(con patrón)	Simulación	Tabla 14	0.345	1.48	-	-
	Diferencia Absoluta		0.341	0.55	1.79	

Tabla 23. Tabla comparativa de Temperaturas calculadas por distintos métodos

7. Modelo experimental

La intención de este trabajo es comparar ciertos parámetros que tienen un efecto significativo en el incremento de la temperatura de fluido al pasar por el colector. Se busca, a través de pequeñas modificaciones en la disposición o material de ciertos componentes, definir características deseables en el diseño final del colector solar. Es importante mencionar que a pesar de que se tiene cierta intermitencia respecto a la energía solar, en general se puede determinar que las condiciones de operación real, son relativamente fijas. Se empleara el diseño de experimentos de acuerdo a la metodología seguida en el texto *Diseño de Experimentos* de Montgomery³⁹.

7.1 Definición de Variables

A lo largo de este trabajo se han planteado distintas variables que juegan un papel importante en el desempeño de un colector solar. En Tabla 24 se clasifican la mayoría de los factores potenciales de diseño, tanto controlables como no controlables.

Dentro de los anteriores, los factores considerados como constantes en el diseño son el fluido de trabajo, el material y diseño de la placa de absorción, la ubicación geográfica, el flujo de agua, las pérdidas de calor con el uso del aislante de fibra mineral.

A partir del listado anterior, se determinan las variables consideradas para este estudio en la clasificación de la Tabla 25.

La eficiencia del sistema está en relación directa con la temperatura del fluido $t_{f,e}$, después del tiempo T de estudio. Es por esta razón que la variable de respuesta de nuestro problema se limita a la temperatura $t_{f,e}$ en función de las variables seleccionadas. Sin embargo, cabe mencionar que esta selección no excluye el monitoreo de otras variables a lo largo del diseño experimental, tales como el flujo másico, la presión, la temperatura ambiente y temperaturas en otros puntos del sistema. Además, se determinan algunos factores perturbadores que impactarán en la variable de respuesta, como por ejemplo la variación de los instrumentos de medición y la hora del día.

No controlables	Controlables
t_a Temperatura ambiente	Posición
H_t Radiación solar	Angulo de inclinación
Presión atmosférica	Área de captación
Consumo*	Flujo másico o Velocidad del fluido
	Propiedades de cubierta transparente
	Propiedades Superficie selectiva
	Algunas pérdidas de calor
	Distribución de flujo
	Materiales

Tabla 24. Factores de diseño. Controlables y no controlables.*El consumo en una casa puede modificarse

Variables del sistema	Variables de respuesta
t_a Temperatura ambiente	t_{f,e} Temperatura a la salida del colector
G_t Radiación solar	m flujo másico V_f
t_{f,i} Temperatura a la entrada del colector	Δt cambio de temperatura
t_p Temperatura de la lámina	Δρ_f cambio de densidad
	ΔP cambio de presión

Tabla 25. Variables del sistema y variables de respuesta

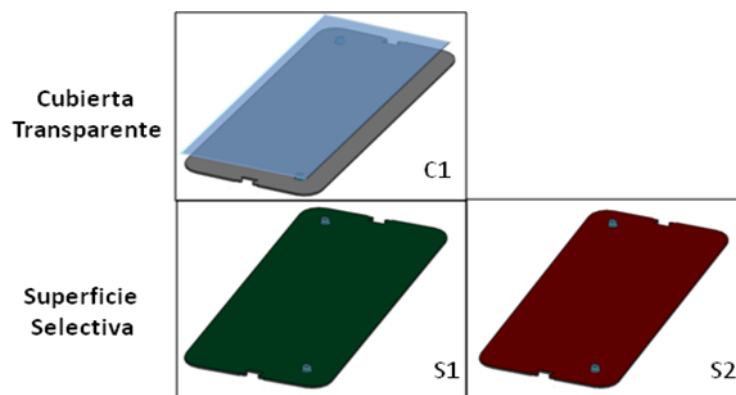


Figura 37. Factores y niveles. Cubierta transparente y superficie selectiva

Así, uno de los objetivos es la caracterización estadística de los factores de interés que tienen una influencia significativa en el desempeño del colector. En la Figura 38 se esquematizan los factores con sus niveles de la siguiente manera. La búsqueda del diseño que brinde los mayores beneficios térmicos será a partir de la comparación de los factores definidos como:

- C → Cubierta transparente: 1) Con vidrio templado
- S → Superficie selectiva: 1) Pintura negra mate, 2) Acero Inoxidable coloreado

En adición, en orden de evaluar un flujo óptimo en el colector se realizan pruebas a distintos flujos:

- $F \rightarrow$ Flujo de agua: 1) **0.25 lt/min**, 2) **0.5 lt/min**, 3) **0.8 lt/min**, 4) **1.3 lt/min**, 5) **1.8 lt/min**, 6) **2.8 lt/min**, 7) **4.8 lt/min**

Cabe mencionar que existe una ronda previa de pruebas para un diseño empleando la placa completa en su forma original (Figura 18), no reportada en este trabajo ya que no existen datos cuantitativos al respecto. Dos combinaciones de empaques/entradas fueron probadas, mostrando resultados no satisfactorios al presentar fugas severas por la asimetría del sistema. De esta forma, se descartó de la primera iteración de diseño, el empleo de las placas con entradas y salidas de flujo perpendiculares a las del plano del agua, proponiendo una entrada transversal a lo largo de cabezales de distribución. También, se modificaron las dimensiones de la placa, se implementaron mejoras en cuanto a la colocación de empaques y se introdujo un mejor soporte en los laterales del colector. **Así, el presente trabajo en realidad muestra resultados de un colector, en su versión ya estudiada.**

7.2 Monitoreo de variables

Las variables del sistema que se monitorean a fin de dar una estimación de la eficiencia del colector son: Irradiancia G_t , tiempo T , t_a Temperatura ambiente, $t_{f,i}$ temperatura a la entrada del colector, $t_{f,e}$ temperatura a la salida del colector. A partir de esta información se puede tener un historial de la temperatura a lo largo del día.

El instrumento de medición para la evaluación de las temperaturas es un Dual Input Datalogger marca ExtechTM que permite el monitoreo de la variable de interés en un intervalo de tiempo establecido de 5 min para las pruebas del sistema a lo largo del día y de 10 segundos para las pruebas de eficiencia del colector. Para la evaluación de la irradiancia instantánea se cuenta con un pirheliómetro que es colocado en el mismo plano a la superficie del colector, para tener la estimación de la energía sin gran variación por ángulo.

8. Pruebas de operación

Las pruebas de evaluación de la eficiencia térmica del colector pueden consistir en la determinación de la eficiencia instantánea de un colector recibiendo la radiación solar de manera aproximadamente normal a la superficie del colector o de la constante de tiempo, como una medida de la capacidad térmica efectiva. Los cálculos de la eficiencia pueden basarse en 1) el área total del colector y la temperatura promedio de agua a la entrada del colector, 2) el área del absorbedor y temperatura del agua a la entrada del colector y 3) el área del absorbedor y temperatura promedio del fluido.³¹

El método usual para evaluar el desempeño de un colector consiste básicamente en exponerlo a la radiación solar y evaluar la temperatura de entrada y de salida, así como el flujo del fluido de trabajo. El beneficio térmico obtenido está dado por la ecuación (27). En adición, se mantiene un monitoreo de las condiciones que rodean el sistema. De esta forma se obtienen dos tipos de información: del recurso disponible y de la respuesta térmica del sistema. Las pruebas se llevan a cabo empleando las definiciones de acuerdo al método ASHRAE 93-2010⁴⁰ y a la norma ES 001⁴¹.

8.1 Ubicación

Las pruebas de operación se realizaron en la ubicación mostrada en la Figura 38, en donde se hace una sobreposición de un mapa de insolación en el que el horizonte aparece como un círculo con el observador en el centro. Los círculos concéntricos igualmente espaciados representan la altitud solar a intervalos de 10°, mientras que las líneas radiales representan el acimuth en los mismos intervalos (A.1.2). Las curvas elípticas horizontales representan la trayectoria del sol el día 20 o 21 de cada mes. Las curvas verticales, por otra parte, indican las horas del día del tiempo solar¹¹. Con esto se analizan sombras sobre el colector y comportamiento a lo largo del año para la zona en la que se lleva a cabo esta investigación.

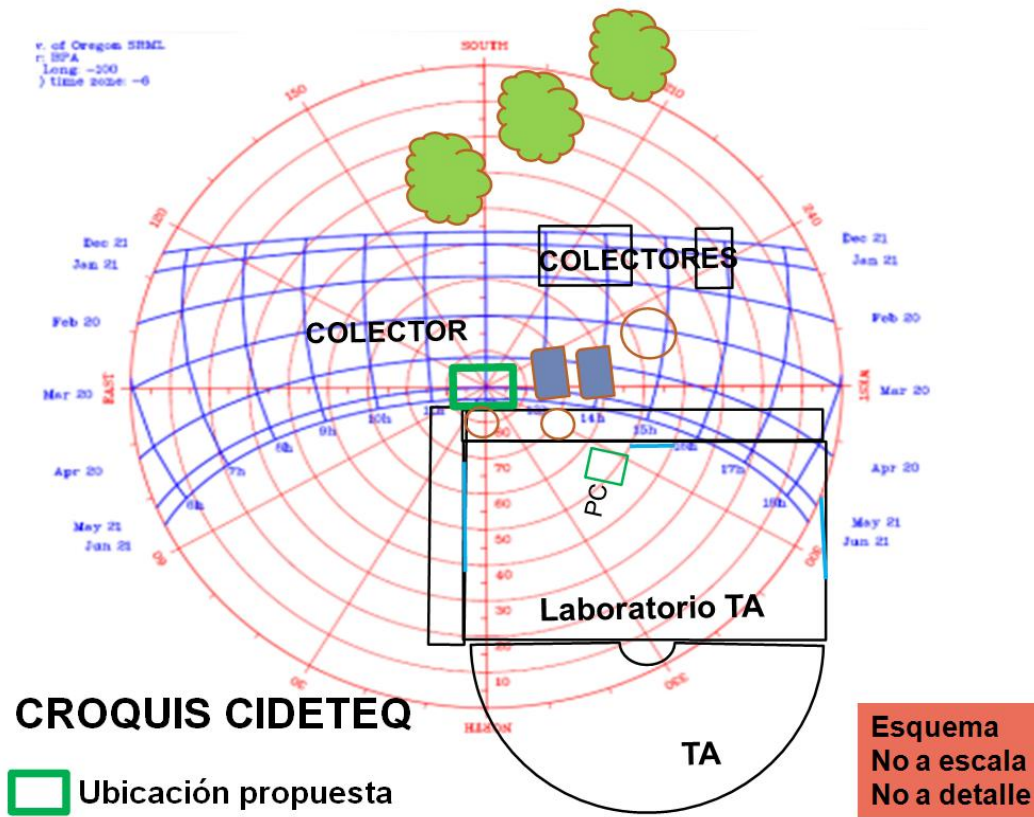


Figura 38. Ubicación del colector prototipo

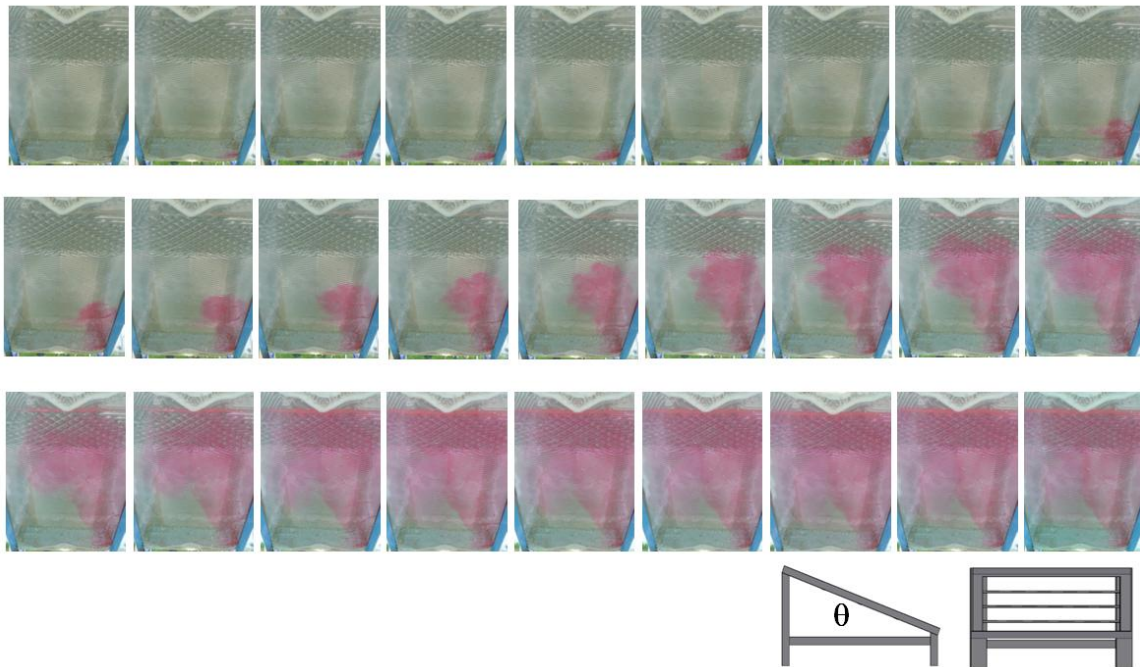


Figura 39. Secuencia de comportamiento en la distribución por diferencia de densidades **Secuencia** tomada cada 5seg. Total 135s a flujo estable. Diferencia de temperatura de 10°C

8.2 Visualización de flujo

Como pruebas preliminares para conocer el comportamiento del agua en el colector se construyó un molde en resina cristal para lograr una visualización del flujo interno. Este molde simulaba la función de la placa y su patrón de flujo. Se realizó un análisis de flujo preferencial, mediante la inyección de agua coloreada a diferente temperatura 10°C arriba de la temperatura del fluido a temperatura ambiente. Lo cual a su vez permite visualizar el efecto termosifón que se da por diferencia de temperaturas en el que el fluido, una vez caliente tenderá a subir por el plano inclinado del colector por una diferencia de densidades.

Cabe mencionar que esta prueba sólo se realizó para las placas en su versión original, es decir, con dos entradas encontradas cuyo plano de flujo es tangente al plano del agua. Se aprecia que el patrón indicado para la aplicación original favorece el flujo de manera diagonal.

En la Figura 39 se puede observar la secuencia de tomas realizadas cada 5 segundos, por lo que de la misma se puede estimar una velocidad lineal de termosifón, ya que se conocen de antemano las dimensiones. De este modo se calcula $v \cong 0.82\text{m}/100\text{s} = 0.0082\text{m/s}$. **Estos resultados son empleados como referencia, ya que brindan una idea del comportamiento interno del efecto termosifón, comprobando que el patrón favorece el flujo en su componente vertical promoviendo adecuadamente el movimiento del agua menos densa.**

8.3 Desempeño del sistema

De manera esquemática (Figura 40) se muestra el diagrama del sistema hidráulico propuesto para la experimentación de este colector, indicando también **los puntos de monitoreo**. El circuito representa la situación más común de la configuración del sistema en una casa y se considera el funcionamiento por efecto termosifón. Se muestran los componentes primarios: el colector solar, el tanque de almacenamiento, el depósito primario y los elementos de interconexión. Las variables del sistema que se monitorean, de acuerdo a la sección 7.3, **son: G_t Irradiancia solar, tiempo T , t_a temperatura ambiente, $t_{f,i}$ temperatura a la entrada del colector, $t_{f,e}$ temperatura a la salida del colector.** (Figura 40). **Se evalúa la operación del prototipo propuesto. La presión de operación calculada es de 117.68kPa ($17\text{ lb}_f/\text{in}^2$).**

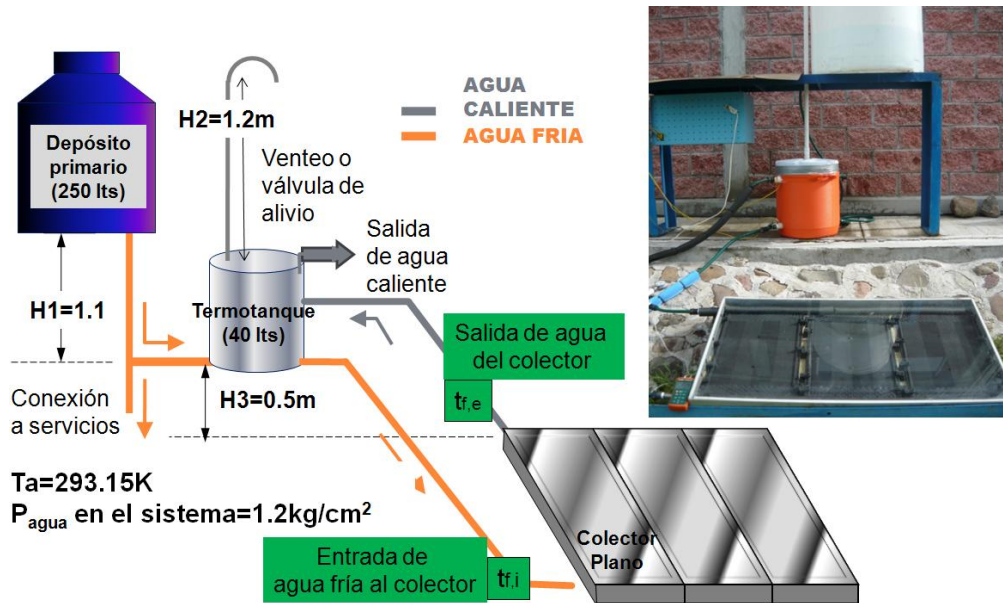


Figura 40. Esquema y fotografía del sistema solar empleado

8.3.1 Sistema cerrado C1 vidrio templado, S1 pintura negra mate

Empleando como acabado de la superficie de absorción pintura negra mate, de alta temperatura, es decir, sin que se le haya colocado la superficie selectiva se realizan pruebas de operación en el sistema con convección libre, termosifón. Se muestra en la Figura 41 el comportamiento de un día muestra soleado, en 6.5 horas de operación continua, alcanzando temperaturas de 65.5°C la temperatura a la entrada del colector, $t_{f,i}$ (cuadros). Los incrementos de temperatura ΔT (triángulos) se observan en promedio de 7.9°C , después de la estabilización del sistema.

8.3.2 Sistema cerrado C1 vidrio templado, S2 coloreado de acero inoxidable

De la misma manera, se muestra en la Figura 42 el comportamiento de un día muestra soleado alcanzando temperaturas de 71.2°C a la temperatura a la salida del colector, $t_{f,i}$ (cuadros). Los incrementos de temperatura Δt (triángulos) se observan en promedio de 17.8°C , lo cual muestra un incremento en cuanto a la transferencia del calor con el acabado S2, sin embargo también se observa que la temperatura cae más rápidamente, debido a las altas temperaturas. Las mediciones en este caso se llevaron cada 10 segundos.

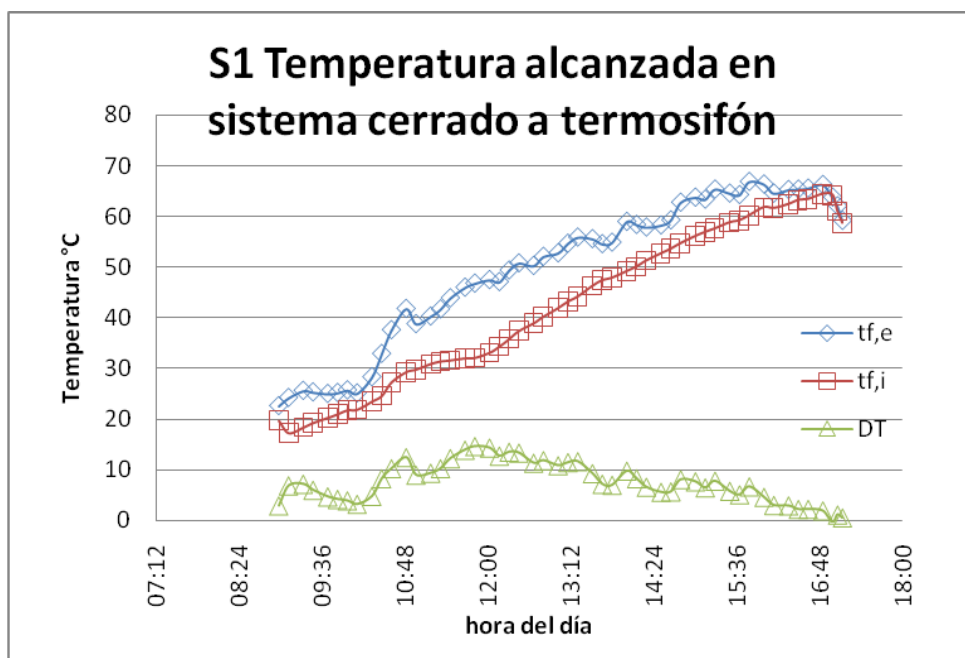


Figura 41. S1 Temperatura a la entrada $t_{f,i}$ (cuadros) y salida $t_{f,e}$ del colector (diamantes), $\Delta t = t_{f,e} - t_{f,i}$ (triángulos)

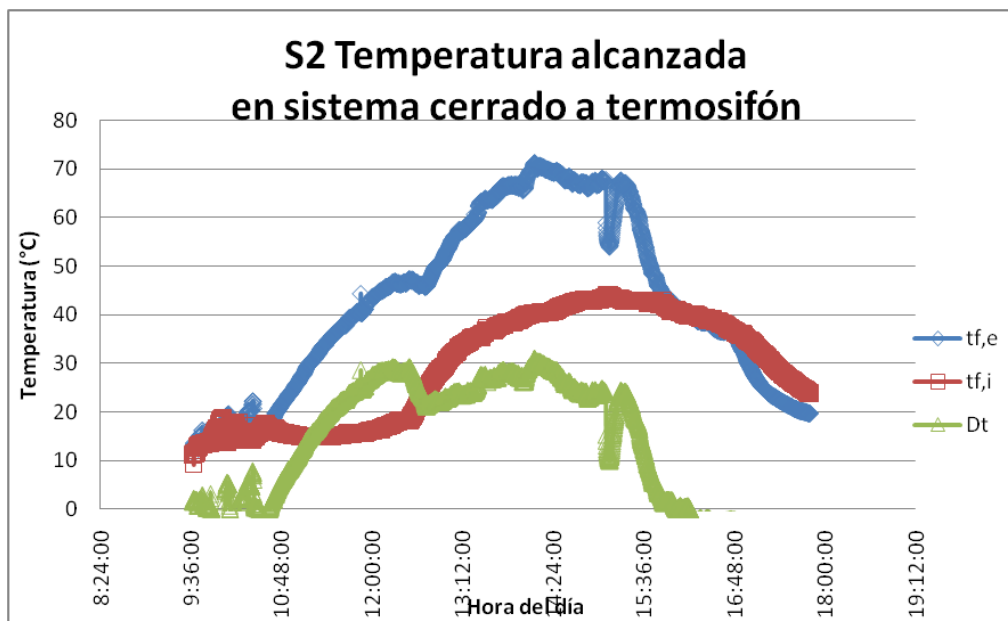


Figura 42. S2 Temperatura a la entrada $t_{f,i}$ (cuadros) y salida $t_{f,e}$ del colector (diamantes), $\Delta t = t_{f,e} - t_{f,i}$ (triángulos)

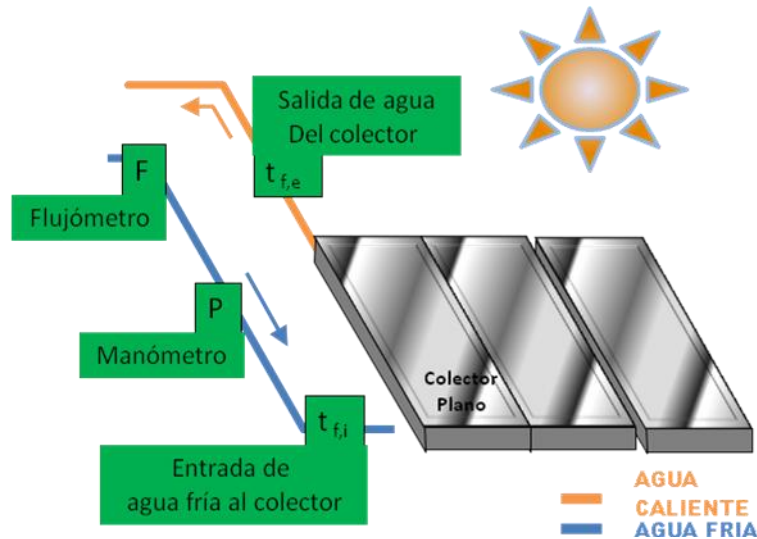


Figura 43. Esquema de dispositivo de pruebas de eficiencia del colector

8.4 Desempeño del colector

Ahora se procede a la evaluación de la eficiencia del colector, sin incluir la recirculación de agua proveniente del tanque de almacenamiento. En la Figura 43 se observa el esquema del dispositivo empleado para estas pruebas.

Se varió el flujo manualmente con los valores indicados en la sección 7.1 de este documento. Para iniciar la prueba, el flujo F estudiado se establece a estado estable. El procedimiento de medición iniciaba con el colector solar cubierto de modo tal que impidiera el paso de la luz solar. El registro de datos se llevó a cabo con un intervalo de 10 segundos. Los puntos de monitoreo se indican en la Figura 43. El tiempo de evaluación fue de 5 min y la irradiancia fue evaluada en el plano del colector.

8.4.1 C1 vidrio templado, S1 pintura negra mate y S2 coloreado electroquímico, varios F

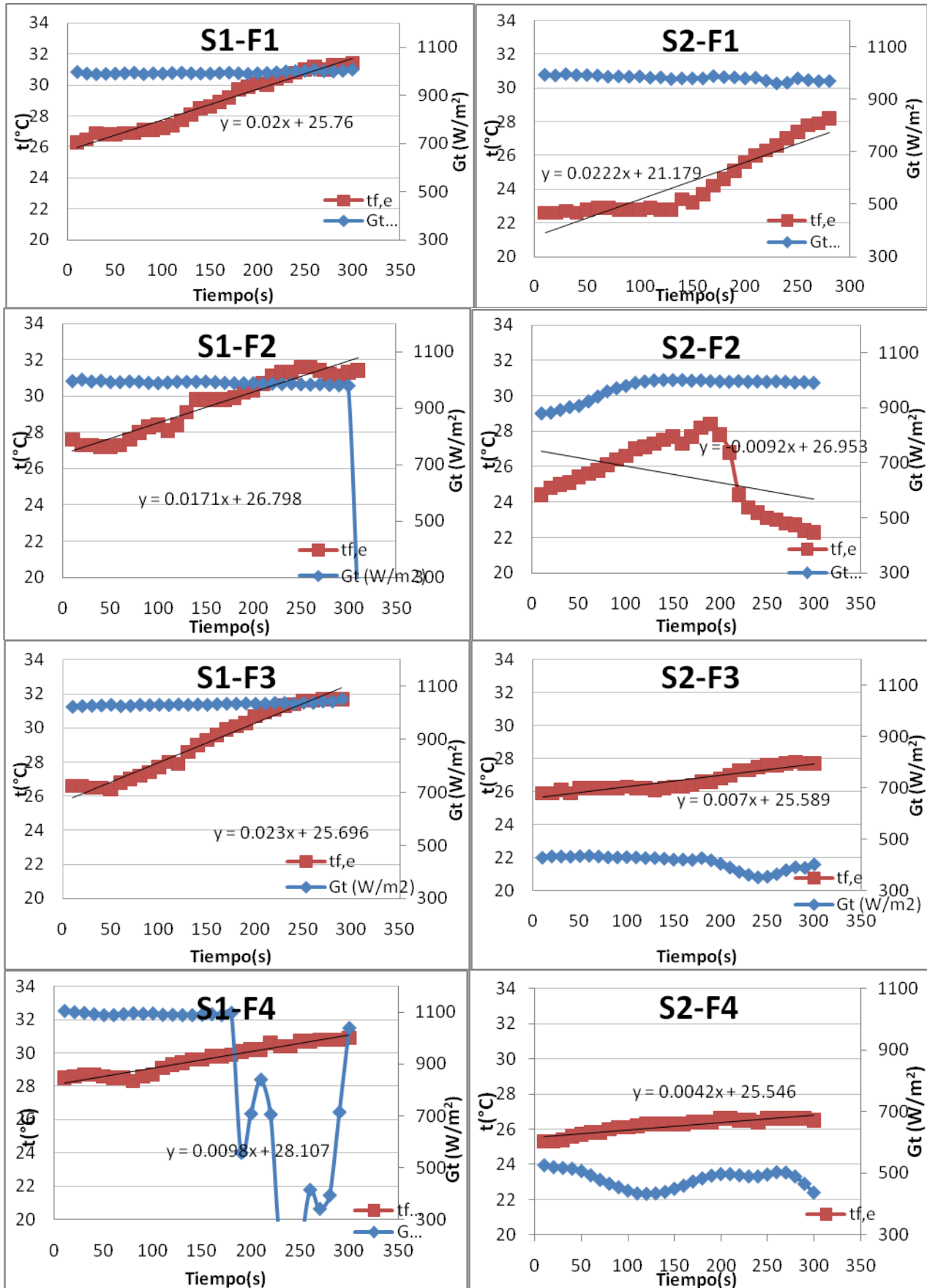
En las gráficas de la Figura 44 se muestran valores de temperatura e irradiancia a lo largo de las pruebas para los 7 distintos flujos; 1) **0.25 lt/min**, 2) **0.5 lt/min**, 3) **1 lt/min**, 4) **1.5 lt/min**, 5) **2 lt/min**, 6) **3 lt/min**, 7) **5 lt/min**. En este análisis se muestran del lado izquierdo los resultados para el acabado S1 y del lado derecho para S2.

Las pendientes de los cambios de temperatura son estimadas a partir de los resultados experimentales, con un ajuste lineal automático mostrado en la esquina inferior de cada una de las gráficas de las Figuras 44. De lo que se observa que los flujos F1, F3 y F4 son los que de manera gráfica presentan la razón de cambio más alta en pruebas de 5 min. Se observa que la razón de cambio de la temperatura tiene una variación con el flujo.

8.5 Flujo óptimo

Se realiza un comparativo para las temperaturas de respuesta del colector con un tiempo de prueba de 5 min, empleando 7 distintos flujos de agua. A partir de los datos experimentales mostrados en las Figuras 44 se construyen las gráficas 46.a) y 46.b). Se observa que el flujo mínimo, $F1=0.25$ L/min (diamantes) presenta una pendiente pronunciada y alcanza una mayor temperatura al tener un mayor tiempo de residencia en el colector, lo que le permite una mayor transferencia de calor. Para un flujo $F2=0.5$ L/min (cuadros) la temperatura final alcanzada es ligeramente menor que para F1, sin embargo la pendiente se observa más suave. En el caso del flujo $F3=1$ L/min (triángulos), la temperatura final alcanzada es menor que para F3 aunque la pendiente es similar. Para $F4=1.5$ L/min (cruces), la temperatura es ligeramente mayor que para F3, sin embargo la razón de cambio o pendiente es bastante pronunciada. Para el caso $F7=5$ L/min (asteriscos) se observa definitivamente una pendiente cercana a cero.

Es importante notar que las pruebas para los distintos flujos fueron realizadas de manera no simultánea ya que se realizaron consecutivamente, es decir, es normal observar un incremento en la temperatura ambiente, así como variaciones en los valores de irradiancia, a lo largo del día. Las temperaturas de entrada de agua al colector al inicio de la prueba se mantuvieron en un promedio de 27°C . Siendo la mínima de 25.6°C y la máxima de 29.3°C . Por mencionar un ejemplo en cuanto a las variaciones de radiación, se observa claramente la presencia de nubes pasajeras en la Figura 45 S1-F4 y S1-F5.



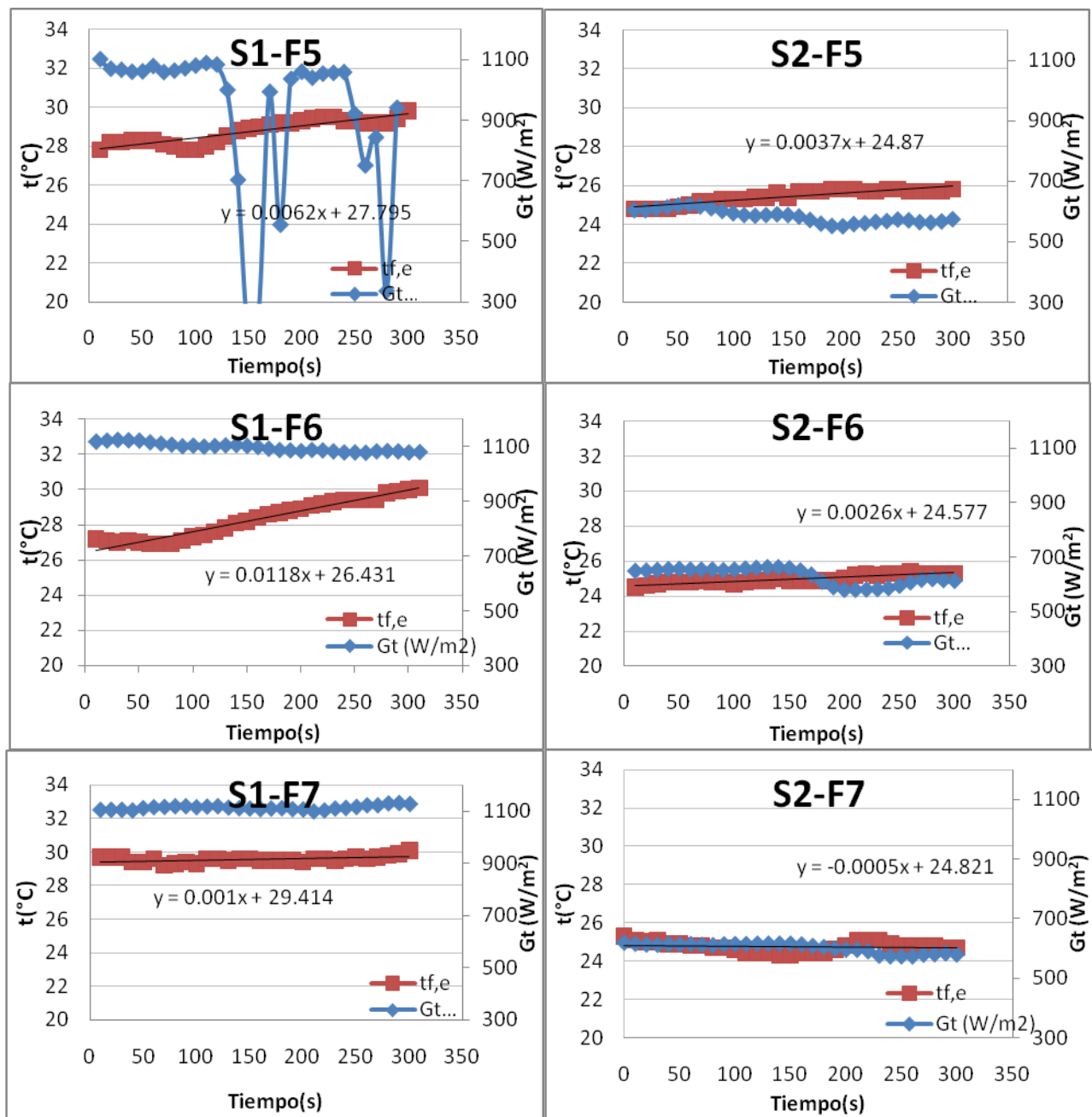


Figura 44. Irradiancia solar y temperatura de agua a la salida para distintos flujos. Temperatura de salida (cuadros) Irradiancia (diamantes) a)F1, b)F2, c)F3, d)F4, e)F5, f)F6 y g)F7

Definitivamente, la variación de la irradiación y de la temperatura de agua a la entrada del colector tiene un impacto importante. Y por consiguiente se indica que el interés se centra principalmente en el análisis de la razón de cambio de la temperatura y de las eficiencias calculadas para poder lograr un comparativo adecuado.

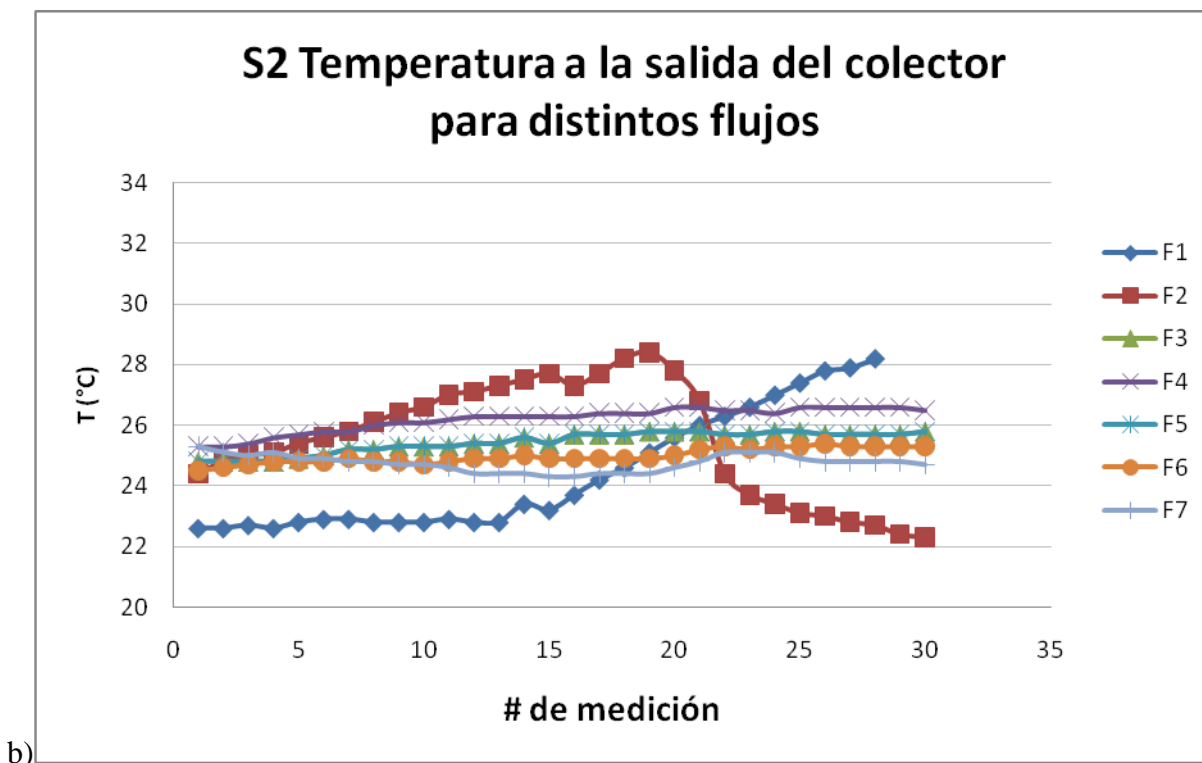
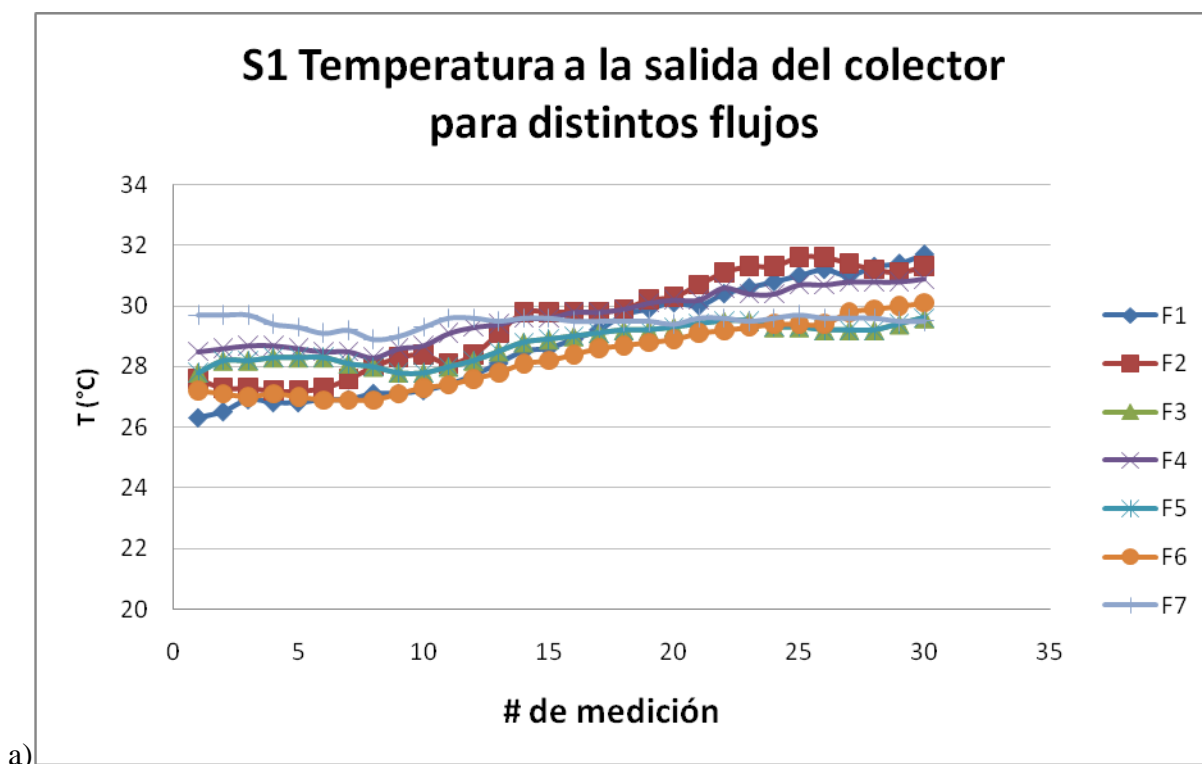


Figura 45. Temperatura del agua a la salida del colector para distintos flujos a) S1 y b) S2

8.6 Determinación de la Constante de tiempo

Un aspecto importante es la determinación de la constante de tiempo del colector. La cual es definida como el tiempo requerido por el fluido saliendo del colector para cambiar su temperatura $1 - \frac{1}{e} = 0.632$ de su estado inicial, en estado estable, después de un cambio abrupto el suministro de la fuente de energía o la temperatura del fluido de entrada.

El colector se opera en condiciones lo más cercanas posibles a flujo estable con temperatura de entrada de fluido lo más cercana a la temperatura ambiente, después la irradiancia es abruptamente interrumpida, tapando el colector y la temperatura de salida del colector es monitoreada como función del tiempo⁸.

El tiempo al que la igualdad de la ecuación 30 es alcanzada es el valor de la constante de tiempo del colector. Donde $t_{f,e}$ es la temperatura de salida del agua del colector al tiempo T y $t_{f,e,initial}$ es la temperatura de salida del agua del colector al iniciar la prueba.

$$\frac{t_{f,e} - t_{f,i}}{t_{f,e,initial} - t_{f,i}} = \frac{1}{e} = 0.368 \quad (30)$$

La Figura 46.a) muestra el comportamiento de la prueba experimental para determinar la constante de tiempo del colector con acabado S1. En este caso se emplea un flujo máximo (arriba de 10 L/min). Se observa la caída abrupta de la radiación (eje secundario) al iniciar la prueba, la temperatura de entrada se mantiene relativamente constante y se indica el punto (diamante) en la variación de la temperatura en el que la ecuación 32 es alcanzada. **El valor obtenido de la constante de tiempo es de 120 s.**

De forma similar se estima el tiempo de respuesta del colector una vez que la irradiancia es interrumpida, de igual forma que en el caso anterior, de manera abrupta. Resultados experimentales para el colector con acabado S2 son mostrados en la Figura 46.b). Se observa que una vez que la irradiancia es interrumpida la temperatura del agua a la salida del colector sigue incrementándose, de 28.3°C a 30.3°C. Una vez que alcanza su máximo valor empieza a disminuir la temperatura. Este valor, indicado en la gráfica (cuadro), en donde la temperatura empieza a disminuir es el valor considerado como **tiempo de respuesta, el cual corresponde a 130 s.**

a)

b)

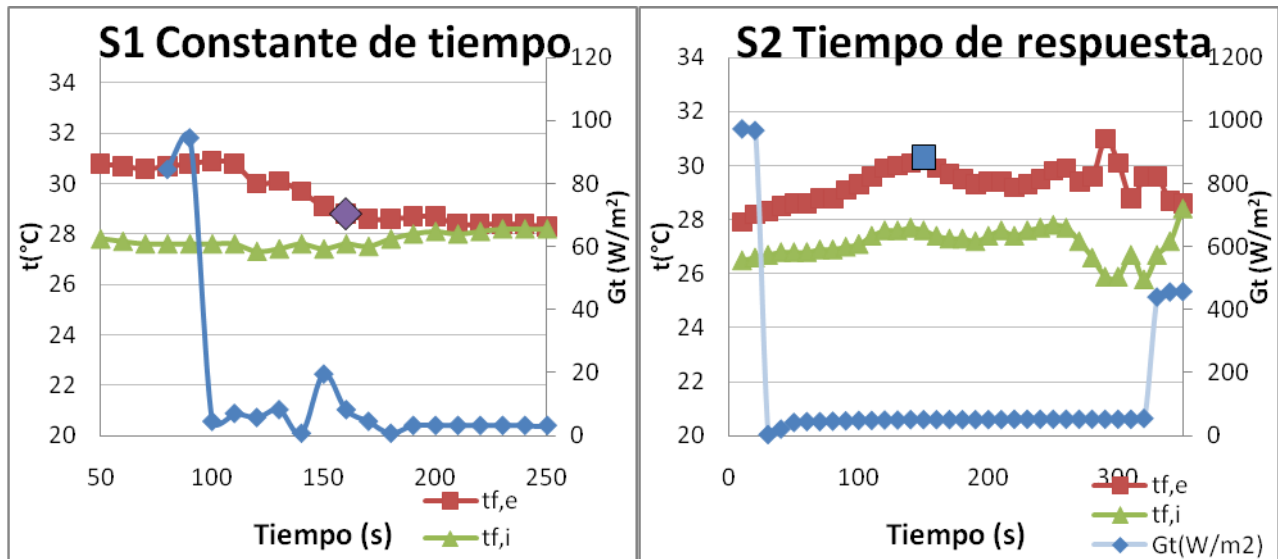


Figura 46. a) Constante de tiempo a flujo máximo para S1 b) Tiempo de respuesta para S2

8.7 Eficiencia entregada

Para obtener curvas de eficiencia en función de la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura ambiente se realiza un análisis del conjunto de información mostrado con anterioridad, sobre temperatura e irradiancia, tomado en días con niveles de irradiancia distintos en pruebas de 300 s (5 min).

La Figura 47.a) y 48.a) muestra la curva de eficiencia térmica en función de x donde

$$x = \frac{t_{f,i} - t_a}{G_t} \quad (31)$$

Y la eficiencia es calculada a partir de la siguiente relación

$$\eta = \frac{\int_0^{10} \dot{m} C_p \Delta t dT}{\int_0^{10} G_t A_c dT} \quad (32)$$

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p \Delta t \sum_0^{10} T}{G_t A_c \sum_0^{10} T} \quad (33)$$

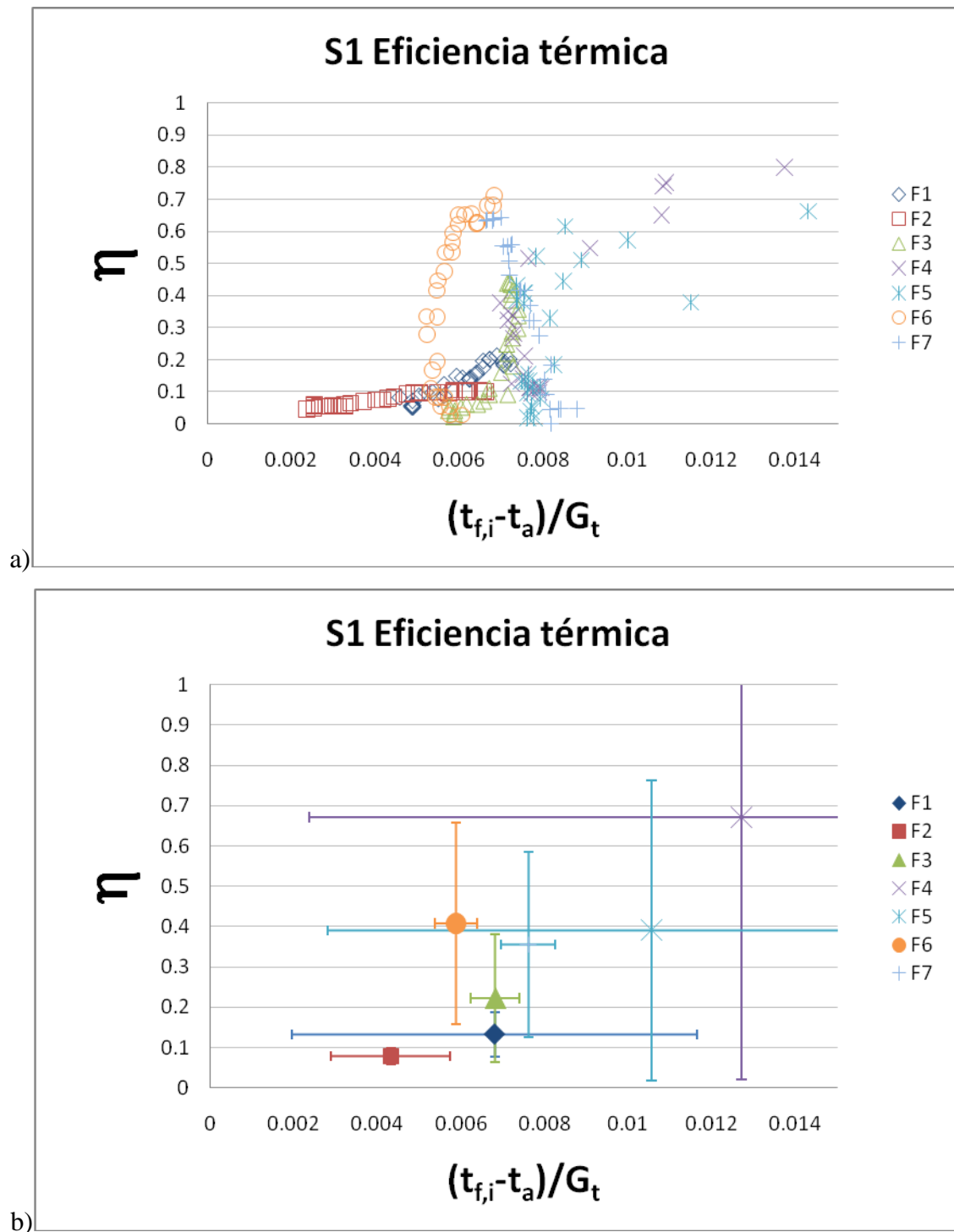


Figura 47. a) Eficiencia térmica en función de x b) Eficiencia térmica en función de x valores promedio con desviación estándar

En la Figura 47.b) se agrupan en un valor promedio los datos experimentales de la Figura 47a) para los 7 distintos flujos. Se grafica la desviación estándar tanto en el eje x como en el eje y para cada valor promedio calculado. Se puede apreciar que la confiabilidad de estos resultados no es alta,

debido principalmente a la dispersión mostrada. **Se observan valores promedio de eficiencia entre 0.05 y 0.67.** Una tendencia real no es apreciada, sin embargo si se excluyen los resultados para F4 y F5 debido a su alta dispersión, se notaría que los datos podrían ser agrupados, sin tener ningún argumento matemático hasta el momento.

Como se ha mencionado con anterioridad, unos de los problemas principales de la energía solar, y en particular del cálculo de eficiencia de colectores, es la gran dispersión existente debido a todas estas fuentes de variación involucradas.

En estos grupos de datos es importante considerar todas las posibles variaciones debido a pérdidas en el colector, nubes pasajeras, pruebas realizadas en distintos días, distintas horas del día para la experimentación, variación del equipo de instrumentación, etc. Se concluye así, que es necesario mejorar las condiciones en el momento de tomar muestras experimentales, ya que se observa el impacto de la acumulación de errores en la reproducibilidad de los datos. Debido a que, finalmente la gran variación en las mediciones es algo inherente a esta tecnología y además es parte del aprendizaje, este conjunto de datos es considerado en el estudio. Sin embargo, mejoras para reducir este tipo de errores son incorporadas en la sesión experimental para evaluar el colector con el acabado S2. Los resultados, con mejoras en el sistema experimental son mostrados en la Figura 48 a) y b) para el colector con el acabado S2.

Se observa claramente en la Figura 48.b) que el control en las pruebas de operación, sobre todo en el control de la temperatura a la entrada del colector, la mejora en la instalación dentro del sistema del equipo de monitoreo de temperatura, el empleo de flujos de enfriamiento entre prueba y prueba para que se reduzca la temperatura del colector en general, y un mejor registro de la temperatura ambiente impacta en la confiabilidad de las muestras tomadas.

A estos datos obtenidos se les aplica una aproximación lineal para obtener una tendencia general del colector solar. Es importante hacer notar que la consideración del empleo de los distintos flujos no está excluida en este análisis. Se sabe de la teoría, que cada flujo representaría ‘un colector diferente’ ya que son distintas las condiciones de operación. Una familia de curvas componen la zona de operación del colector. Así, el empleo de este ajuste lineal es obtenido a partir de distintos puntos que caen en distintas curvas de esta zona de operación. Con esto lo que se busca es el

planteamiento de una ecuación que describa el comportamiento del colector incluyendo los diversos factores de error.

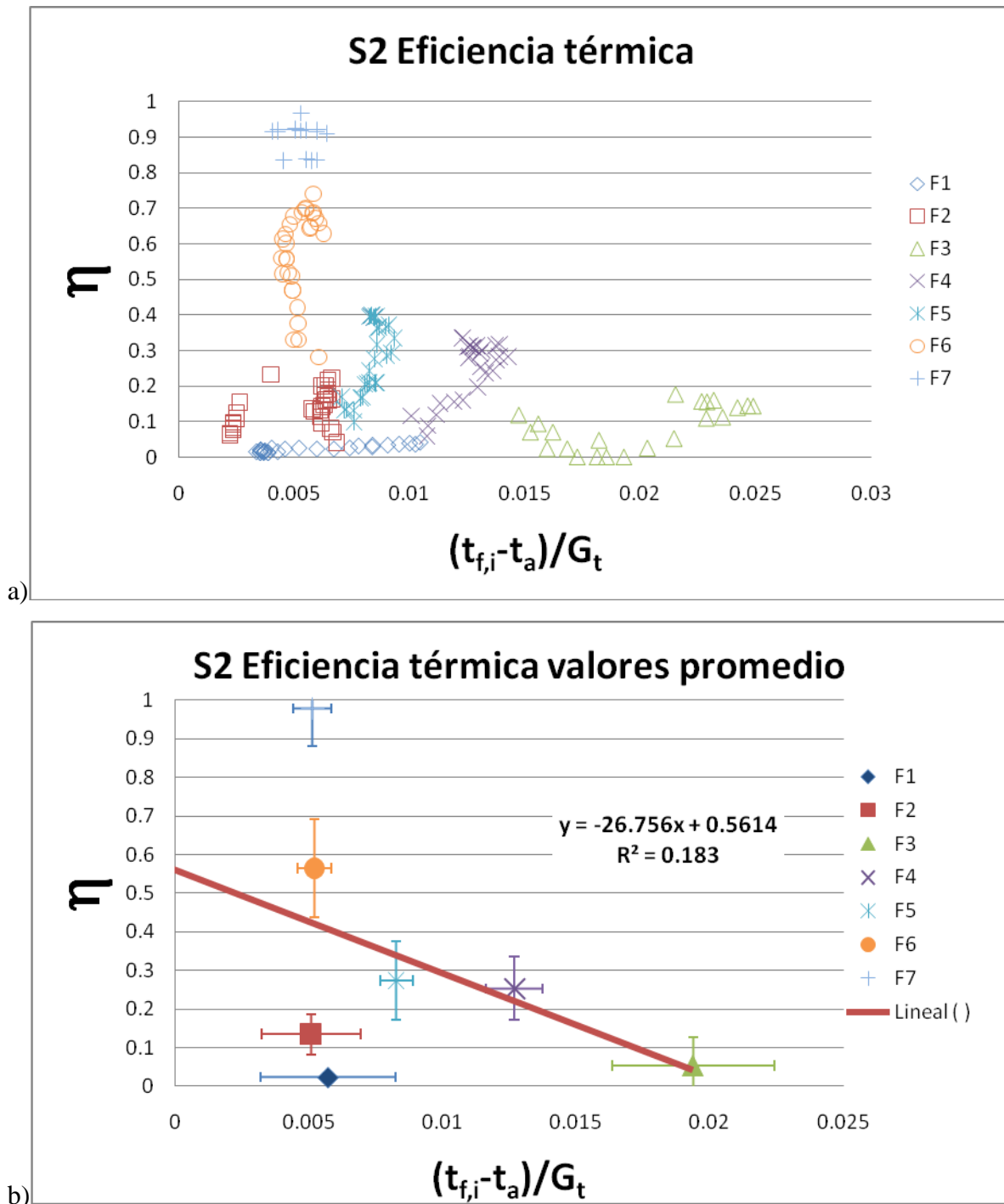


Figura 48. a) Eficiencia térmica en función de x b) Eficiencia térmica en función de x valores promedio con desviación estándar

La ecuación de este ajuste lineal se observa en la Figura 48 b), en la que la ordenada al origen representa la eficiencia máxima del colector que disminuye con el tiempo y la pendiente es la razón de cambio de la temperatura del fluido a la entrada con respecto a la temperatura ambiente. Con esta estimación, **se obtendría una eficiencia hipotética máxima de 0.5614.**

De acuerdo a la teoría, es posible tener una estimación para los factores de pérdidas globales de un colector en específico. Y de hecho éstos no siempre siguen un comportamiento lineal. En este caso, es importante mencionar que el aislamiento en el sistema no fue perfecto, lo que impacta desfavorablemente en los cambios de temperatura. Un ajuste polinomial de segundo orden puede brindar una mejor estimación del comportamiento en eficiencia de un colector solar como el empleado en este trabajo. La expresión matemática de este ajuste es mostrado en la Figura 49, en **que la eficiencia máxima estimada es de 0.7052.**

Finalmente, para tener un comparativo adimensional del desempeño del colector, se realiza un análisis de la eficiencia de los colectores para los distintos flujos. En la Figura 50 son mostrados los valores de eficiencia obtenidos empleando, nuevamente, la ecuación (33) para los dos tipos de acabados S1 y S2 en pruebas de 5 min. La tendencia observada aproximadamente se conserva, los cálculos muestran que el flujo $F6=3$ L/min es el que presenta los mejores resultados para el colector con pintura negra mate y cubierta transparente de vidrio templado. Y, para el colector con el acabado de coloreado electroquímico el valor máximo de eficiencia se encuentra para $F7=5$ L/min.

De manera teórica se espera que a mayores flujos, las pérdidas de calor se vean reducidas, debido principalmente a que los incrementos de temperatura no son altos. De la sección anterior se observa que los menores flujos, F1 (diamantes) y F2 (cuadros), presentan las pendientes más pronunciadas y con esto, las temperaturas más altas. Sin embargo, en las Figuras 47 a) y 48 a) se observa que las eficiencias son las más bajas.

Tanto para las pruebas con S1 y S2 se observan que los flujos F6 (círculos) y F7 (cruces) presentan los valores más altos de eficiencia, y en definitiva F7 presenta los valores más altos. Respecto a esto es importante mencionar que un flujo de 5 L/min, a pesar de sus beneficios en eficiencia, difícilmente será alcanzado empleado sistema de termosifón. En adición, altos flujos también representan otros problemas significativos en un sistema hidráulico.

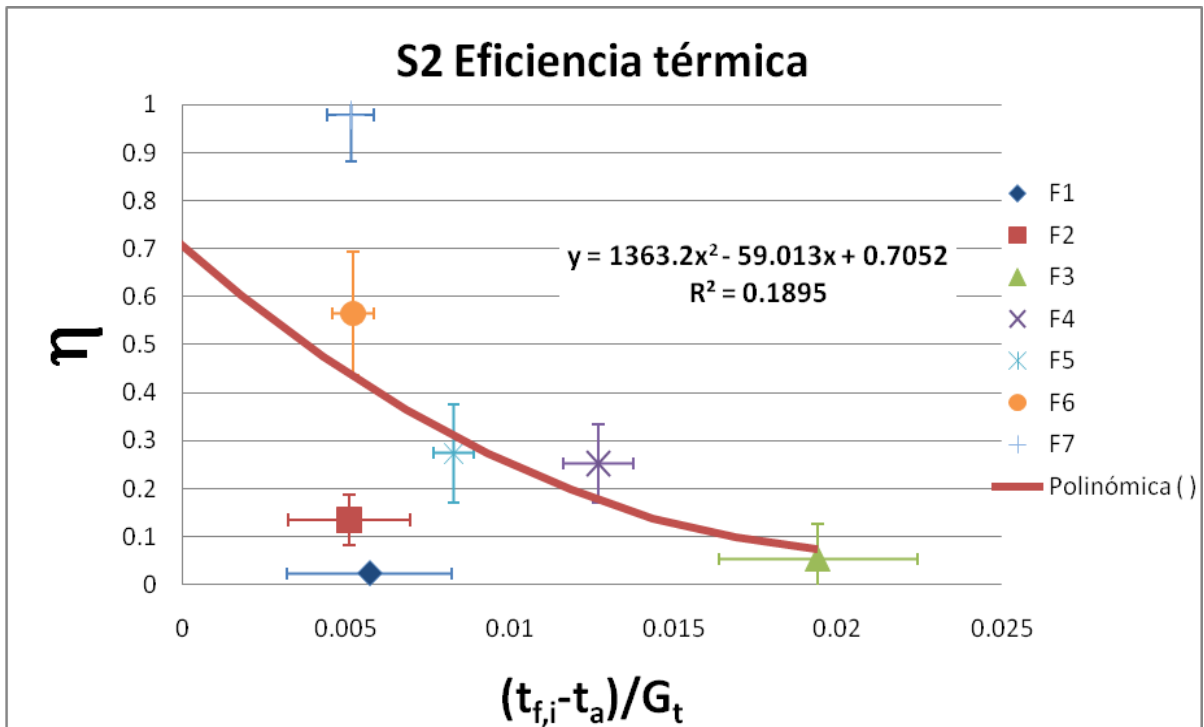


Figura 49. Ajuste polinomial de la Eficiencia térmica en función de x

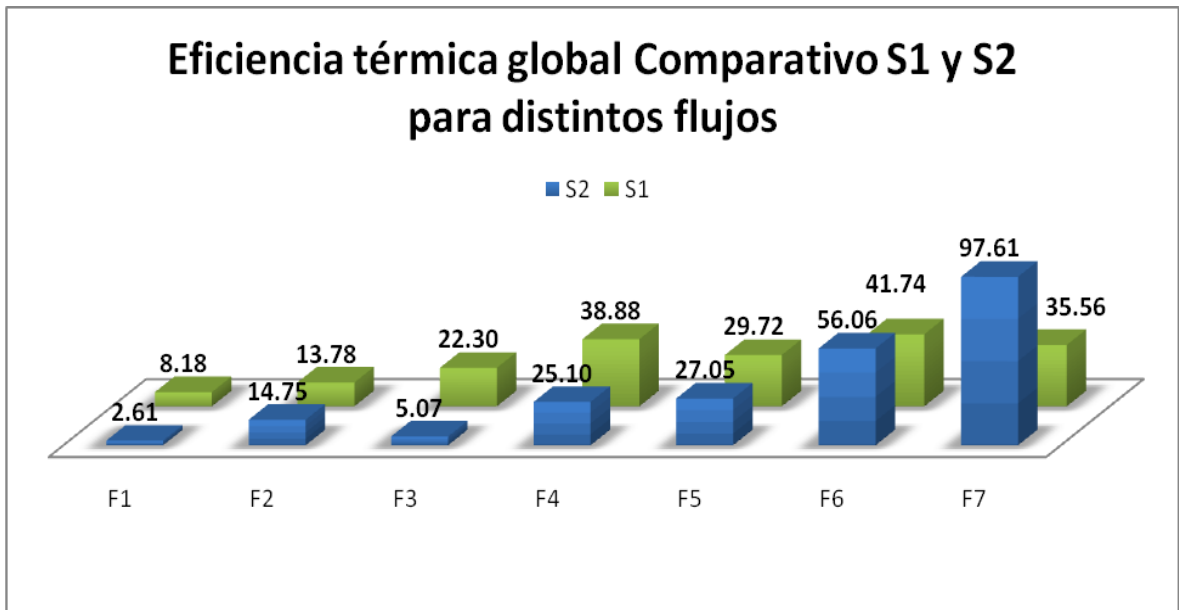


Figura 50. Comparativo de Eficiencia para distintos flujos

9. Diseño final propuesto

Los resultados operativos del diseño del colector prototipo, construido a lo largo de este proyecto, muestran un rendimiento favorable. A continuación se presenta un análisis sencillo de costos, así como algunas ventajas del costo de la materia prima empleada. Sin embargo, finalmente, se identifican algunas mejoras aplicables en el proceso de manufactura que implicarían también una reducción de costos. Se muestran resultados del costo de estos prototipos, los cuales son usados como una estimación de partida para una proyección de costos de producción.

9.1 Análisis de costos

El colector solar diseñado presentará los costos inherentes a la fabricación a nivel prototipo. Esta investigación se llevo a cabo en una institución educativa, por lo que se cuenta con parte del material requerido.

En la Tabla 26 se citan datos del porcentaje del costo total de una instalación solar doméstica. Con lo que se aprecia que los colectores y las tuberías son lo que representan un mayor porcentaje.

Costo del componente	Rango de porcentaje
Colectores	15-30
Instalación	5-10
Estructura de soporte del colector	5-20 ⁱ
Tanque de almacenamiento	5-7
Tubería y conexiones	10-30
Bombas	1-3
Intercambiadores de calor	0-5 ⁱⁱ
Misceláneo	2-10
Instrumentación	1-3
Aislamiento	2-8
Subsistema de control	4-9
Electricidad	2-6
	ⁱ Para colectores montados directamente en un techo con la inclinación adecuada ⁱⁱ Para sistemas sin intercambiadores de calor

Tabla 26. Porcentaje del costo total del sistema por componente⁴²

La incorporación de las placas de intercambiador Tranter™ es una aportación importante ya que es una adaptación e integración de una tecnología ya existente, ofreciendo diversas ventajas, principalmente en la parte económica.

Una de las ideas que da sustento a este proyecto es permitir la accesibilidad de costos finales contemplando a su vez el tiempo de vida útil. Se han mencionado las diversas ventajas técnicas que ofrece el empleo de acero inoxidable, sin embargo la idea generalizada de su elevado costo lo ha hecho poco aceptable para esta industria. En esta sección se muestra un comparativo del costo de distintas materias primas para las fechas mostradas en la Tabla 27, correspondientes al inicio y final de la realización de este proyecto.

Se muestra en la Tabla 28 un comparativo de los precios (US \$/ton) de láminas de distintos tipos de aceros inoxidables. Cabe mencionar que una de las diferencias principales entre los precios de la Tabla 27 y los precios de la Tabla 28 es que los precios por lámina incluyen un costo de proceso y la Tabla 28 considera únicamente el metal primario.

Precios oficiales en la Bolsa de Metales de Londres (LME- London Metal Exchange)		
Metal Primario	Precio “al comprador” [US \$/ton]	
	28 de julio de 2008	25 de nov 2010
Cobre grado A	5,610	8,289
Zinc (especial alto grado)	1,704	2,118
Níquel primario	16,990	26,605
Plomo estándar	1,773	2,220
Acero Inoxidable (444)	3,009^a	

Tabla 27. Comparativo 2 días Precios oficiales en la Bolsa de Metales de Londres (LME- London Metal Exchange) ^acosto tomado de la Tabla 29 a modo comparativo

Tipo de Acero	Acabado	
	2B	BA
304	\$3,267	\$3,559
316L	\$4,203	\$4,494
430	\$2,055	\$2,261
434	\$2,662	\$2,867
439	\$2,332	\$2,537
441	\$2,435	\$2,641
444	\$3,009	\$3,214

Tabla 28. Precio de láminas de acero inoxidable(US \$/ton) ⁴³

Dentro de los aceros de la serie 300 se observa que en definitiva el acero 304 se encuentra por debajo del acero de bajo carbón 316L. Los costos de los aceros serie 400 tienen un menor valor debido, principalmente, a la ausencia de níquel en su aleación. En el diseño de aplicaciones con los aceros ferríticos se tiene que considerar que a grandes rasgos: son ligeramente menos dúctiles, presentan una mejor conductividad térmica y en adición son magnéticos.

El acabado del acero inoxidable depende del número de operaciones y de las herramientas empleadas para el terminado final deseado. De manera general, el costo del acabado 2B es menor para todos los casos de acero inoxidable comparado con BA, el cual es más terso y brillante. Se hace notar que cada hoja en ese calibre 24 (0.61 mm o 0.024 in. De espesor) pesa 18.358 kg. Por lo que hay 54.47 hojas por tonelada. Las dimensiones de las hojas de lámina son de 4 x 10 pies.

Estos valores comparativos en cuanto al costo de la materia prima empleada para la construcción del colector, sitúan la propuesta como una alternativa viable principalmente si es comparado con el material más común empleado que es el cobre. En adición, el tiempo de vida, mantenimiento, estética e higiene del acero inoxidable brinda un valor agregado al producto.

En la Tabla 29 se brinda, finalmente, una estimación del costo del desarrollo del colector prototipo, el cual siempre será mucho mayor que el costo de producción. Es importante notar que se especifica el tipo de costo pagado; los costos a menudeo siempre impactarán en el costo de este colector.

En la siguiente fase de este proyecto, a través de lo aprendido se propone plantear un modelo incorporando las posibles mejoras, como una alternativa a futuro. El modelo final, de acuerdo a los objetivos planteados, tenderá a la reducción de costos y procesos.

En cuanto al costo del soporte y tanque de almacenamiento en la Tabla 30 se reporta el costo de los materiales usados en la instalación para evaluar el prototipo. Aún es posible aplicar muchas mejoras en relación costo/eficiencia del tanque de almacenamiento, conexiones y soporte del colector ya que el estudio y mejora de estos dispositivos no era parte del objetivo de este proyecto.

Un módulo de colector solar capacidad de 1 persona, 55°C						
Componentes principales	Cantidad	Unidad	Costo individual	Costo en el colector	Tipo de costo	Descripción
Absorbedor						
Placa Tranter	6	pieza	\$321.70	\$1,930.20	Menudeo	Placa de intercambiadores de calor Tranter AISI304 GA.25
	2	unidad	\$5.00	\$10.00	Indirectos (e.)	Corte para adaptar las dimensiones (incluye mano de obra)
Aislante						
	1	placa	\$67.90	\$67.90	Menudeo	Lana mineral 1in
Cubierta transparente						
C1	1		\$800.00	\$800.00	Menudeo	Vidrio templado
empaquete						
Silicón	1	paquete	\$62.00	\$62.00	Menudeo	Paquete de 300ml
Conexiones						
Tubing	0.5	metro	\$1,226.0	\$613.00		
	6	Unidad	\$30.00	\$180.00	Indirectos (e.)	Corte
Soportes laterales						
Mordaza fijabarra	6	pieza	\$17.30	\$103.80	Menudeo	De hierro al carbón de 3/8 x 3/4 in
Cuña	4	metro	\$17.30	\$69.20	Indirectos	Cuña cold roller cuadrada de 1/4 in
Uniones						
Proceso de soldadura	24	in	\$50.00	\$1,200.0	Preferencial (e.)	De acero inoxidable (incluye material y mano de obra)
Tornillería	6	pieza	\$3.25	\$19.51	Menudeo	De acero inoxidable
Tuercas	6	pieza	\$4.78	\$28.68	Menudeo	De acero inoxidable
Superficie selectiva						
S1	1	bote	\$85.00	\$85.00	Menudeo	Pintura negra mate high heat™ (T>130°C)
			TOTAL=	\$5,169.29		
S2	0.05	unidad	\$3,608.00	\$180.40	Mayoreo	Reactivos
	1		\$50.00	\$50.00	Indirectos	Mano de obra
	3		\$0.90	\$2.70	Indirectos	Tiempo de inmersión (estimación de kWh)
	6		\$0.90	\$5.40	Indirectos	Calentamiento baño (kWh)
			TOTAL=	\$5,322.79		

Tabla 29. Costo para un modulo de colector solar S1, capacidad de 1 persona 55°C. (e.) estimado

Componentes adicionales	Cantid ad	Unid ad	Costo individual	Costo en el colector	Tipo de costo	Descripción
Soporte del colector						
Base	1	unidad	\$800.00	\$800.00	Menudeo	Soporte para 3 colectores de 1.2*.9 m de aluminio
Termo-tanque						
Termo	1	pieza	\$629.52	\$629.52	Menudeo	Termo comercial de 38.2 L
Tubería						
Manguera	4	metro	\$13.80	\$55.20	Menudeo	Kelos Rudo 5/8 in 16 mm
Conexiones	6	pieza	\$11.30	\$67.80	Menudeo	hembra para manguera
TOTAL=				\$1,552.52		

Tabla 30.Costo de los componentes adicionales

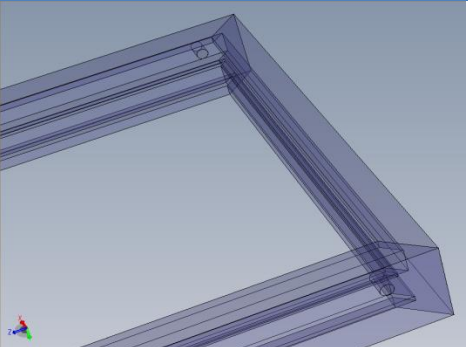
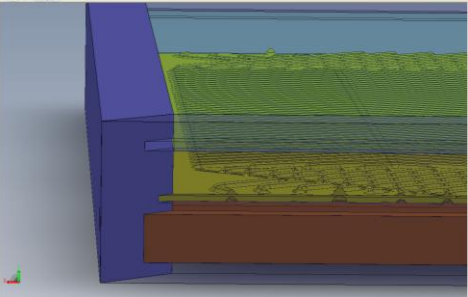

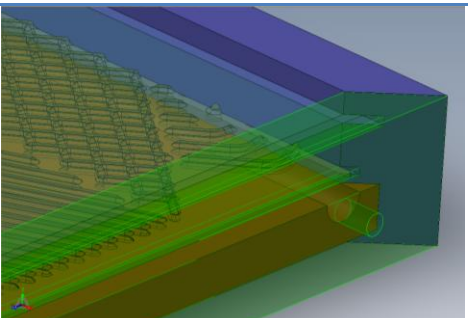
9.2 Proceso de manufactura

La visión de este proyecto contempla una proyección del diseño con mejoras incluidas tanto en el colector como en el proceso de fabricación del mismo, lo cual nuevamente impacta en una disminución de costo y un incremento de eficiencia térmica.

La idea inicial es proponer un colector de manufactura factible, sin profundizar demasiado en el diseño de logísticas para procesos de manufactura, se realiza un análisis de áreas de oportunidad. A través del desarrollo de este proyecto se observó también que existían mejoras aplicables lo cual resulta en la propuesta de un colector con un diseño mejorado a partir del prototipo mostrado en este trabajo. Esta propuesta final busca dar solución a los problemas presentados con anterioridad, sin embargo siempre será posible aplicar mejoras.

La Tabla 31 esquematiza áreas de oportunidad identificadas a lo largo de este proyecto. También se muestran propuestas de solución, así como el impacto de los costos en determinadas partes del proceso. **El resultado final, en perspectiva, sería un colector ligero, integrado, sencillo, de bajo costo de producción aunque de alto costo de inversión inicial.**

Los moldes tanto de inyección como de extrusión de plástico tienen un costo elevado, en el costo por pieza en alta producción es donde se visualiza el beneficio económico. De manera similar, el costo de la prensa y de las herramientas de punzonado para trabajar el acero inoxidable requieren de una alta inversión en activo fijo.

Componente	Mejora	Imagen complementaria
Caja colectora	Se contribuye al reciclaje. La materia prima contendrá al menos 40% de plástico reciclado.	
Caja colectora (laterales)	<p>Se proponen huecos ya que pueden ser usados diversos materiales como aislantes de relleno.</p> <p>En adición esto representa una disminución tanto en peso como en materia prima.</p>	
Caja colectora (laterales)	Las hendiduras permiten el deslizamiento tanto de la placa como del cristal. El problema de la dilatación térmica es resuelto mediante la geometría ya que las uniones no son las responsables de evitar fugas	
Placa de absorción	Únicamente se emplea una placa de acero inoxidable, reduciendo el costo	
Soldadura	No es requerida. El problema de la transferencia de calor no es dependiente de la soldadura	
Aislante	Es integrado a la caja colectora	
Cabezales	<p>Los cabezales están integrados a la caja colectora. El molde requerido considera el acanalamiento en la parte final de la caja colectora de modo tal que las entradas y salidas de flujo son perpendiculares al flujo</p> <p>Las conexiones son adaptadas con entradas incluidas en el molde de inyección o extrusión</p>	
Trabajo del acero inox.	El troquel puede ser diseñado para usar placas de aceros ferríticos 444 o 441, reduciendo con esto el costo	

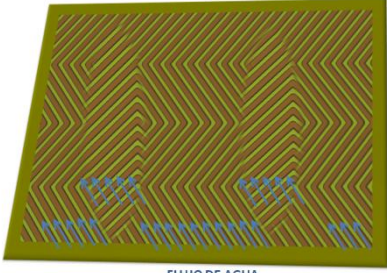
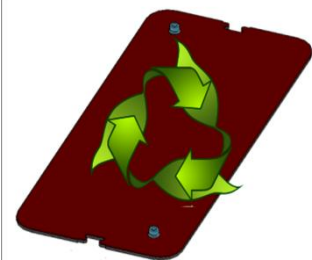
Patrón de flujo	<p>Un bosquejo de nuevo patrón de flujo es propuesto. Sin embargo una caracterización de su eficiencia más a detalle es requerida.</p> <p>Sobre este tema se brinda la oportunidad de estudio y mejora para el molde de plástico que reproducirá este patrón.</p>	
Acabado	<p>El baño electroquímico con compuestos de cromo la hace poco amigable con el medio ambiente.</p>	

Figura 54. Bosquejo patrón de flujo

Figura 55. Acabado ecológico

Tabla 31. Mejoras propuestas para el nuevo proceso de manufactura del colector

El costo del tratamiento de acabado de la placa de absorción en realidad es bajo, ya que a pesar de que, como se menciona en la Tabla 31 es una solución no tan amigable con el medio ambiente, ésta es empleada para más de 1 colector ya que puede ser regenerada al añadir agua. Con lo anterior se observa que tanto el costo como el impacto ambiental de esta solución es, por colector fabricado, muy baja. Además, como se observó en la sección anterior el empleo de aceros ferríticos también impactaría en la reducción de costos, e incrementaría la resistencia a la corrosión para ciertas condiciones.

Al proponer mejoras en el producto, de manera natural se identifican mejoras aplicables al proceso de manufactura. En adición, es importante mejorar el orden del proceso, es decir ahora iniciar con darle el acabado deseado a la placa, aplicar el baño electroquímico y luego trabajar el acero inoxidable con el troquelado para que no se presenten problemas de geometría a través de las etapas de transformación del colector y con esto evitar costos de re trabajo de las piezas. Por otro lado, siempre es posible mejorar los sellos de un sistema hidráulico, así que en esta parte el costo se vería incrementado. En la Figura 56 se muestra la propuesta inicial del mapa de proceso para la construcción de colector solar.

**Mapa de proceso
Para el armado de 1 colector**

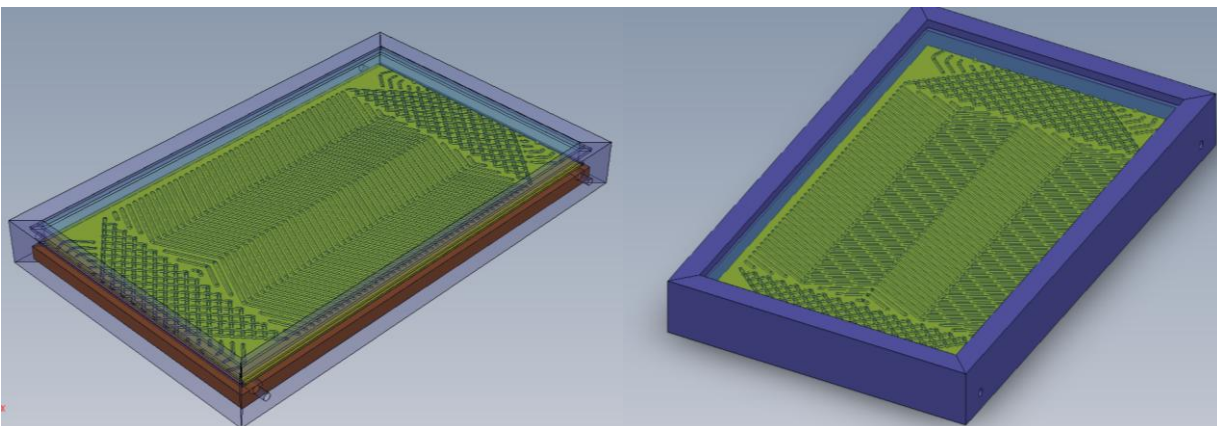
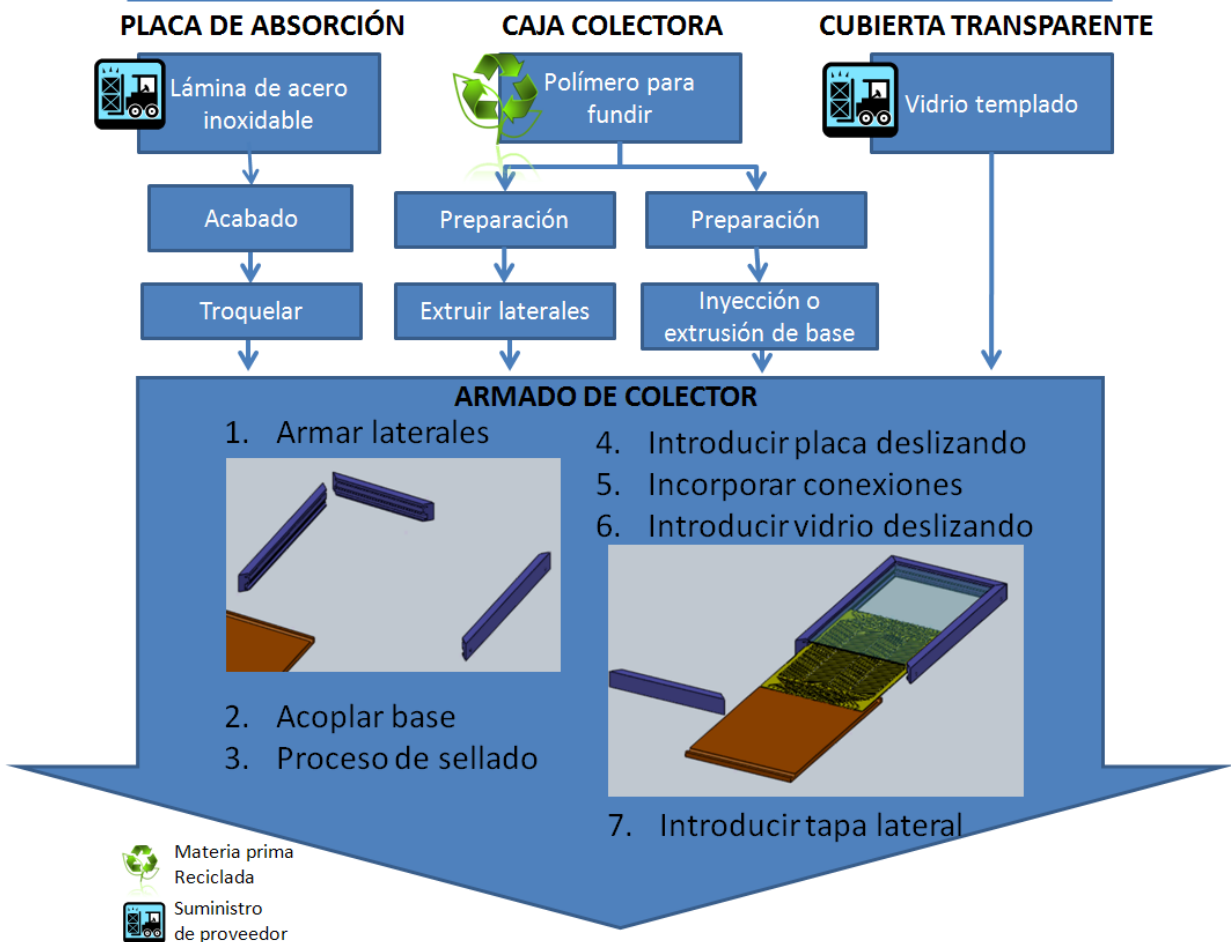


Figura 56. Mapa de proceso del colector propuesto

10. Conclusiones

Los objetivos e hipótesis se cumplen, ya que en la práctica, los resultados de este trabajo muestran comportamientos favorables, los cuales se describen a continuación:

Se establece un modelo matemático de simulación de la transferencia de calor en la placa de absorción, el cual es aplicado a la geometría en específico propuesta. Al ser validado con los distintos resultados de este trabajo, puede ser empleado más adelante tanto para tener un mejor entendimiento del colector como para profundizar en el estudio de la variación de geometrías y el impacto que tienen en la transferencia de calor por los distintos mecanismos.

El uso de acero inoxidable brinda la oportunidad de que el colector solar sea empleado en otras aplicaciones distintas a la del calentamiento de agua. Debido a su resistencia a la corrosión y acreditación para ser empleado en la industria alimenticia y médica, puede estar en contacto con una amplia gama de fluidos de trabajo, lo cual es uno de los valores agregados de este material para ser empleado en la industria solar. Aunado a esto, el coloreado electroquímico del acero inoxidable lo oxida incrementando aún más la resistencia a la corrosión, y dándole un aspecto estético.

En cuanto al desempeño del colector, a lo largo de la parte experimental se mostraron los distintos cálculos para el colector solar con placas de acero inoxidable de tres módulos incluidos. **Los resultados del prototipo indican que el colector solar, con buenas condiciones de irradiancia, presenta una eficiencia máxima promedio de 69 a 73% empleando el acabado S2 coloreado de acero inoxidable.**

El sistema termosifón que emplea acero inoxidable de acabado S1 presenta una eficiencia de 55.2% durante 6.5 h considerando una irradiancia promedio de 800 W/m^2 que aumenta la temperatura de 50 L de agua hasta 65.5°C a partir de la temperatura ambiente promedio (20°C). Por otra parte, con el acabado S2 se logra una eficiencia de 55.9% y temperatura máxima de 71.2°C . Las diferencias en cuanto a eficiencia debido al acabado de la superficie de absorción no se observan significativas.

Esto se estima que es debido a que, a pesar de tratar de reproducir las condiciones, finalmente se obtuvieron dos colectores distintos, evaluados en distintos tiempos y con variaciones en la fabricación. **Sin embargo, los resultados en cuanto al desempeño del diseño en general del colector son aceptables.**

Se observó que la eficiencia del colector depende las condiciones específicas de operación para cada caso, las cuales son altamente variables, por lo que se necesita una medición del desempeño del colector a plazos largos. Debido a que los objetivos de esta experimentación se tenían que alcanzar en 24 meses, se utilizó una metodología que permite proyectar el desempeño de los diferentes colectores diseñados en amplios tiempos de uso.

Respecto al diseño planteado se concluye que aún son necesarias diversas acciones para mejorar la evaluación del desempeño de este colector, por ejemplo: a) aplicar mejoras en el sistema hidráulico y el tanque de almacenamiento ya que una parte importante del buen funcionamiento, así como del costo del colector, corresponde al sistema de almacenamiento, b) realizar un análisis de la dilatación térmica del colector, c) hacer pruebas de degradación e intemperismo acelerado a muestras de acero inoxidable con el coloreado propuesto en este trabajo, d) mejorar las condiciones del proceso de coloreado en cuanto a distribución de corriente y temperatura e) además, ya que a pesar de que la solución del baño electroquímico puede ser reutilizada varias veces, contiene cromo, el cual se encuentra restringido y determinado como contaminante.

Por otro lado, **se observa que el costo del prototipo del colector empleado en este trabajo aún es alto para la aplicación en una vivienda familiar. Por lo que aún se plantea una nueva iteración de diseño que permita la reducción de los costos e impactos ambientales.** El proceso de manufactura propuesto así como el empleo de materiales reciclables favorece los objetivos mundiales de ahorro y uso eficiente de energía.

El problema, en cuanto a suministro energético, se puede resolver al ser flexibles y empezar a modificar nuestras costumbres de uso tanto de cantidad de agua como la temperatura de confort. Esperamos que los dispositivos de tecnología verde suministren la energía necesaria, a dispositivos que históricamente hemos empleado, pero que presentan deficiencias en cuanto a eficiencia e interacción sustentable con el entorno. Los dispositivos de conversión de energía foto térmica no

serán aceptados en nuestra sociedad hasta que no modifiquemos nuestra comprensión del mundo que nos rodea.

Nomenclatura

Letra	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
A	Área	[m ²]
A_c	Área de la placa de absorción	[m ²]
A_a	Área de abertura es el área máxima, proyectada, a través de la cual la radiación solar no concentrada llega al colector.	[m ²]
C	El consumo de agua caliente a la temperatura especificada	[L/día]
C_p	Calor específico a presión constante	[KJ/kg K]
D	Dureza del agua	[mg _{caco3} /l]
e.	Valor estimado	
d	Espesor de flujo transversal	[m]
F	Flujo específico empleado en el sistema del colector solar	[kg/s],[L/min]
g	Gravedad	[m/s ²]
G_t	Irradiancia en la abertura del colector	[W/m ²]
H	Irradiación	[MJ/m ²]
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección	[W/m ² K]
h_a	Coefficiente de transferencia del calor del aire	[W/m ² K]
I_0	Constante solar $I_0=1367$	[W/m ²]
k_a	Conductividad térmica del agua	[W/m K]
k_p	Conductividad térmica del material (se considera constante)	[W/m K]
L	Largo	[m]
m	Masa	[kg]
\dot{m}	Flujo másico	[kg/s]
P	Presión	[Pa]
Pa	Presión atmosférica	[Pa]
pH	pH	
q_{opt}	Es la energía óptica recibida por el captador por unidad de área	[W/m ²]
$q_{\acute{u}til}$	Es el calor útil por unidad de área que es transportado hacia el fluido de trabajo	[W/m ²]
q_{perd}	Corresponde a las distintas pérdidas de calor que experimenta el colector por unidad de área	[W/m ²]
$q_{convección}$	Hace referencia al calor total transmitido por convección	[W/m ²]
$q_{conducción}$	Hace referencia al calor total transmitido por conducción	[W/m ²]
$q_{radiación}$	Hace referencia al calor total transmitido por radiación	[W/m ²]
Q_{s-c}	Calor emitido del sol hacia el colector	[W]
q_{s-c}	Calor por unidad de área emitido por el sol hacia el colector	[W/m ²]
q_{c-a}	Calor por unidad de área emitido por el sol hacia el medio ambiente/aire	[W/m ²]
R	Fracción de rayo reflejado interceptado por la placa de absorción	
Ra	Rugosidad media	[μ in]
Re	Número de Reynolds	
S	Sol (empleado como subíndice)	
S	Factor de sombra de absorción, fracción de la abertura del colector	
t_s^4	Temperatura del sol	[°C]

t_p	Temperatura de la placa de absorción	[°C]
$t_{p,sol}$	Temperatura de la placa en la superficie que recibe la energía solar	[°C]
$t_{p,agua}$	Temperatura de la placa en la superficie que está en contacto con el agua	[°C]
t_a	Temperatura ambiente.	[°C]
$t_{f,e}$	Temperatura del fluido a la salida del colector	[°C]
$t_{f,e,inic}$	Temperatura del fluido a la salida del colector	[°C]
$t_{f,i}$	Temperatura del mismo a la entrada del colector.	[°C]
t_{∞}	Temperatura de la corriente libre, alejado de las paredes del colector	[°C]
T	Tiempo	[s]
U_L	Coefficiente total de pérdidas de calor el cual no es un valor constante	[]
$\frac{du}{dT}$	Es la tasa de cambio con respecto al tiempo de la energía interna almacenada en el colector, el cual normalmente es despreciable	
$\vec{v}_{f,p} = 0$	Vector velocidad	[m/s]
\vec{v}_a	Velocidad del aire	[m/s]
\vec{v}_f	Velocidad del fluido	[m/s]
$\vec{v}_{f,i}$	Velocidad del fluido a la entrada del colector	[m/s]
$\vec{t}_p = (t_x, t_y, t_z)$	Campo de temperatura en la placa de absorción con componentes en x, y y z	[°C]
$\vec{t}_f = (t_x, t_y, t_z)$	Campo de temperatura en el fluido con componentes en x, y y z	[°C]
$\vec{v}_f = (v_x, v_y, v_z)$	Campo de velocidades del fluido con componentes en x, y y z	[°C]
V	Volumen	[m ³]
W	Ancho	[m]
Letras griegas	Descripción	Unidades
α	Absortancia espectral	
α_c	Absortancia de la placa de absorción	
β	Coefficiente térmico de expansión volumétrica	[°C ⁻¹]
Δ	Incremento	[°C]
ε_c	Emitancia del colector	
η_c	Relación entre la energía utilizada entre la energía suministrada	
η_0	Eficiencia óptica η_0 , o el producto de la transmitancia y absortancia de la cubierta y del captador $\eta_0 = \tau\alpha$	
λ	Longitud de onda	[nm]
λ_c	Longitud de onda crítica	[nm]
δ	Declinación solar	[°]
ρ_f	Densidad del fluido de trabajo	[kg/m ³]
ρ_λ	Reflectancia monocromática	
ρ_{es}	Reflectancia especular del espejo concentrador	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$	[W/m ² K ⁴]
τ_t	Transmitancia de cubierta transparente	
τ	Tensor de esfuerzo cortante	[kgf/m ²]
δ_a	Espesor de la capa de aire	[m]

μ	Viscosidad dinámica	$[\text{N s/m}^2]$
ν	Viscosidad cinemática	$[\text{m}^2/\text{s}]$
Simbología	Descripción	
°	Grados	
±	Más, menos	
%	Por ciento	
hr	Hora	
IR	Espectro electromagnético infrarrojo	
μm	Micrómetro	
mm	Milímetro	
Min	Mínimo	
Max	Máximo	
nm	Nanómetro	
NIR	Espectro electromagnético del cercano infrarrojo	
prom	Promedio	
US	Estados Unidos de América	
VIS	Espectro electromagnético visible	
s.n.m.	Sobre el nivel del mar	
TM	Trade Mark, no se cuenta con derechos de autor por lo que únicamente se hace mención de este producto de manera genérica	
:	Producto escalar o producto de doble punto de dos tensores	
.	Producto tensorial o producto de punto simple de dos tensores	

Apéndice

A.1. Naturaleza de la radiación solar

A.1.1 Radiación electromagnética

La radiación solar se compone de ondas electromagnéticas, que viajan a la velocidad de la luz y son transmitidas a través del vacío del espacio, provenientes del Sol. El cual, a una temperatura superficial de ~5500 K, es considerado como un cuerpo negro, esta misma temperatura debería de alcanzarse teóricamente en la superficie de la Tierra. Sin embargo, con el objeto de poder aprovechar esta energía solar incidente, la máxima temperatura lograda es de alrededor de 4000 K mediante el uso de concentradores solares.

La cantidad de radiación que pasa a través de un área específica es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente de energía. Así, se tiene un efecto sobre la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo como el Sol al ser evaluada sobre la superficie de la Tierra. Este modelo es llamado la ley de cuadrado inverso.⁴⁴

La cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación, a la distancia media del Sol a la Tierra, se define como la constante solar I_s , cuyo valor es 1367 W/m^2 .⁴⁵

La energía de la constante solar I_s está compuesta de un amplio espectro de ondas electromagnéticas definidas por su longitud de onda. En la Figura A.1 se observa bajo distintas curvas, indicadas con flechas, de distribución el espectro de la radiación teórica de un cuerpo negro a 5500 K, de la radiación solar al tocar con la atmósfera de la Tierra y la radiación recibida finalmente al nivel del mar.

No toda la radiación solar extraterrestre que intercepta a la Tierra llega a la superficie de la misma, aun en condiciones de cielo despejado. La radiación recibida al nivel del mar corresponde al 95.19% de la constante solar, es decir, 1301 W/m^2 .

Así, mediante el análisis de bandas de absorción, se deduce que la radiación solar es reflejada, dispersada y absorbida por distintos componentes de la atmósfera, tales como O_2 , CO_2 , O_3 , N_2 , H_2O , polvo, vapor de agua, etc.

El ozono proveniente de las reacciones $\text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}$ y $\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$ absorbe alto porcentaje de la radiación ultravioleta de longitud de onda inferior a $0.35 \mu\text{m}$. El vapor del agua absorbe fuertemente la radiación solar en las bandas infrarrojas. Para $\lambda > 2.3 \mu\text{m}$, la transmisión en la atmósfera es muy baja debido a la alta absorción de energía por el vapor de agua y el dióxido de carbono.

De esta forma la radiación solar extraterrestre adquiere valores significativos entre $\sim 0.29 \mu\text{m}$ y $2.3 \mu\text{m}$ mientras atraviesa la longitud, variable e indeterminada, de masa gaseosa estratificada de aire hasta llegar a la superficie terrestre. La radiación fuera de este intervalo es dispersada o absorbida de inmediato. Así, las aplicaciones prácticas de la energía solar comprenden únicamente la radiación solar en este mismo rango de longitudes de onda.¹¹

La radiación global es la suma de las componentes directa y difusa. Se define como radiación directa aquella que no experimenta cambios en su dirección, la radiación difusa es la que sufre dispersión en la atmósfera y no tiene una dirección única y preferente. En el caso de una superficie horizontal sobre un punto en la Tierra, la radiación global está constituida por la suma de la componente vertical de la radiación directa y la radiación difusa que proviene de distintas direcciones.

A.1.2 Medición de la radiación

El uso y transformación de la energía solar está condicionado a la intensidad de radiación solar incidente sobre un área determinada, por lo que es necesario contar con registros de radiación confiables.

Actualmente se disponen de mapas de radiación solar, en donde se presentan los valores promedio de radiación solar diaria, mensual o anual. Lo cual, es importante para determinar las zonas geográficas que tienen un alto potencial solar para su aprovechamiento.

Para la medición de la radiación solar se definen algunos conceptos. La irradiancia I , es la densidad del flujo de energía de radiación es decir, el valor instantáneo es la energía que llega por cada unidad de tiempo y por cada unidad de área. El valor de la energía que llega durante un período de tiempo por cada unidad de área se conoce como irradiación y se denota por H . Si el período de tiempo corresponde a un día esta cantidad se denomina insolación. Las unidades que se usan comúnmente para G_t son $[\text{W}/\text{m}^2]$ y para H son $[\text{MJ}/\text{m}^2]$ y $[\text{kWh}/\text{m}^2]$.

Para determinar la insolación o irradiación total diaria se suman n mediciones de irradiancia tomadas en un día y se multiplican por el intervalo de tiempo. El intervalo mínimo entre mediciones recomendado para evaluar la irradiación total diaria es de 1 hora.³⁹

La forma más común para conocer la radiación solar es mediante su medición y los instrumentos utilizados para medir la irradiancia se clasifican principalmente en tres tipos:

Los heliógrafos son aparatos que sirven para medir la duración de la luz solar y determinar con ello los periodos del día durante los cuales la intensidad de la radiación solar directa es superior a un

cierto umbral, 120 W/m^2 , el cual está establecido por normas internacionales. Ejemplos de estos aparatos son el heliógrafo de Campbell-Stokes y el heliógrafo de Denis–Jordan.

Los pirheliómetros son aparatos que sirven para medir la radiación solar directa. El pirheliómetro recibe energía sólo del disco solar y de un estrecho anillo de cielo contiguo, a través de un tubo largo; además, este aparato está dotado de un dispositivo automático de seguimiento de la trayectoria aparente del sol. Su ángulo de apertura es de 5.7° . Entre los más comunes se encuentran los pirheliómetros de termopila y el pirheliómetro de disco de plata de Abbot.

Los piranómetros sirven para medir radiación global y difusa, así como indirectamente la radiación directa. Los más usuales basan su principio de operación en termopilas o en foto-celdas. En los primeros, la diferencia de temperaturas entre una superficie negra de absorción de la radiación y una superficie blanca produce un voltaje en el instrumento, el cual se mide. Estos aparatos deben estar protegidos del viento mediante una doble semiesfera de vidrio, para suprimir los fenómenos de convección. Los detectores del segundo tipo se basan en el voltaje generado en la foto-celda al ser iluminada. Dentro de los sensores más usuales están los piranómetros de las marcas Kipp & Zonen y EppleyTM. Estos instrumentos generalmente determinan el valor de la radiación solar a partir de un valor de voltaje dado por la diferencia de potencial entre dos elementos. Los constructores de estos instrumentos tienen la obligación de determinar, mediante el uso de normas mundiales, tanto la constante de calibración del instrumento como de la respuesta.³⁵

A.1.3 Ángulos solares

La particularidad de la energía solar comparada con otras fuentes de energía es debida al movimiento relativo de la fuente de radiación, el Sol, con respecto a la Tierra, a través del tiempo. De este modo un cuerpo captador sobre la Tierra recibirá mayor o menor radiación solar durante el año debido a que la distancia Sol-Tierra varía. Es importante notar que el valor de la constante solar de 1367 kW/m^2 incluye este efecto al considerar un promedio anual de esa distancia.

Suponiendo que la Tierra está fija en el espacio y que el sistema de coordenadas se encuentra situado en el punto de interés situado en la Tierra, cada día, el Sol describe un movimiento virtual alrededor de esta, alcanzando un punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno transcurre y llega el verano.

Así, su posición queda descrita por dos variables angulares: la altura solar α y el azimut solar γ .⁹ La primera define el ángulo que la visual al Sol forma con el horizonte, en tanto que la segunda define

la desviación que tienen los rayos del Sol con respecto al sur verdadero. El cálculo preciso de estas variables depende de la latitud del lugar φ , la declinación δ y el ángulo horario ω .

La latitud φ queda definida mediante el ángulo que determina el lugar de interés sobre la Tierra, con respecto al plano del ecuador. Este ángulo es positivo hacia el norte del ecuador y negativo hacia el sur.

La declinación δ define la posición angular del Sol al mediodía solar, el momento en que el Sol está más alto en el firmamento, es decir al plano a los hemisferios que se crea con respecto al Ecuador. En otras palabras, la declinación es un índice del alejamiento que experimenta el Sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador. Este parámetro que depende de n =día del año, puede calcularse mediante la relación aproximada:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left\{ \frac{(284 + n)}{365} 2\pi \right\} \quad (1)$$

El ángulo horario ω es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes.

Una vez determinados la latitud, la declinación y el ángulo horario, la altura α y el azimut γ pueden calcularse por medio de las siguientes relaciones trigonométricas

$$\operatorname{sen} \alpha = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta \quad (2)$$

$$\operatorname{sen} \gamma = \cos \delta \frac{\operatorname{sen} \omega}{\cos \alpha} \quad (3)$$

Donde la altura solar α , el azimut solar γ , la latitud del lugar φ , la declinación δ y el ángulo horario ω quedan geoméricamente relacionados.

A.2. Otros tipos de colectores

A.2.1. Concentradores y no concentradores de energía

Los concentradores solares surgen para satisfacer el hecho de que no es posible obtener una mayor transferencia de energía térmica, si la energía captada no alcanza mayores temperaturas. Lo cual se logra reduciendo el área en la cual la pérdida de calor sucede, es decir, el área del captador, con respecto al área de apertura.. La relación del área de apertura con respecto al área del captador es llamada la relación de concentración.

A.2.2. Colector solar de tubos al vacío

Los colectores solares tubulares conocidos como tubos al vacío, usan el mismo principio básico que los colectores planos. En lugar de la placa de absorción convencional, usan un tubo de absorción, recubierto con una superficie selectiva, por donde circula el fluido de intercambio. Dado este arreglo, es posible introducir la mejora de la generación de vacío minimizando así las pérdidas de calor por conducción y convección entre dos tubos concéntricos (cubierta transparente y el captador), cabe mencionar que se han obtenido presiones del orden de 10^{-6} bar. Un corte transversal se aprecia en la Figura A.1

El colector de vacío es más estable ante variaciones de la temperatura ambiente o en la radiación solar incidente, lo cual permite obtener temperaturas entre 100°C y 200°C . Algunas variaciones de arreglos posibles usando tubos al vacío son mostradas en la Figura A.2:

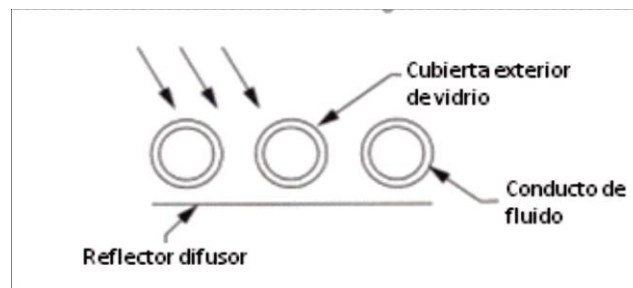


Figura A. 1 Colector básico de tubos al vacío⁹

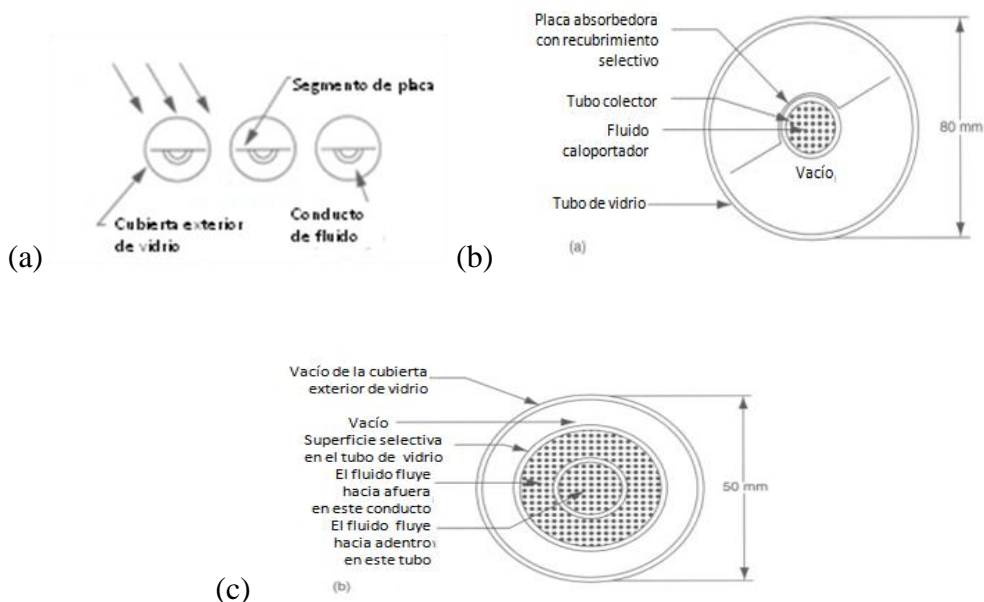


Figura A.2. Diseños de colectores de tubos al vacío⁴⁶.

Las Figuras A.2. (a) y (b) consisten en diseños que usan el símil a un pequeño colector solar plano adaptado ya sea al tubo (o la mitad del tubo) colector conteniendo el líquido para ser calentado a

través de él. La Figura A.2. (c) es un arreglo de vidrio, con el tubo de absorción recubierto por una superficie selectiva. El fluido después de ser calentado, pasa por el tubo interior y luego regresa al tubo de absorción por otro compartimiento concéntrico.

Los tubos al vacío colectan tanto la radiación directa como la radiación difusa, además no requieren seguir la posición del Sol. El vidrio es muy frágil y la dificultad de unirlo con el metal debido a su expansión térmica son algunas de las desventajas de este tipo de colectores. Los colectores disponibles en nuestro país son de importados de China por lo que el soporte suele tener una inclinación estandarizada en 45 grados; por lo cual se desaprovecha parte de la energía solar en regiones tropicales, como México, sin embargo en países de regiones templadas, este problema no existe.

A.2.2.1. Generación de vacío

La mejora que aportan los colectores de tubo de vacío consiste en evitar las pérdidas por conducción y convección, ya que la transmisión de calor por estos mecanismos necesitan de la materia para poder llevarse a cabo. Si se pierde menos calor, habrá más calor disponible para calentar el fluido que necesitamos, obteniéndose así más rendimiento para la misma cantidad de energía del Sol.

El uso de la placa de absorción en el interior de un tubo, en el que se ha hecho el vacío, evita las pérdidas por estos métodos sólo perdiéndose el calor por radiación, que se transmite en el vacío. Sin embargo, debido a la forma cilíndrica de los tubos del colector se producen más reflejos de la luz del Sol que en los colectores de placa plana con lo que la ganancia de la energía del Sol es menor. No obstante esta forma se balancea, ya que se deja de perder más energía por el vacío de la que se deja de ganar por los reflejos.

Como se definió con anterioridad, la transferencia de calor por convección se debe a una superposición de dos transportes de energía, uno por el movimiento aleatorio de las moléculas, conducción, y el otro por el movimiento global del fluido.

A.2.3 Concentradores compuestos parabólicos

El concentrador compuesto parabólico consiste en dos reflectores parabólicos que dirigen la radiación de la apertura al captador, en vez de concentrarlo.

Las mitades derecha e izquierda de dos diferentes parábolas (de aquí el nombre compuesto) cuyos focos son los extremos del de absorción, son los principales componentes. En ciertas orientaciones

del dispositivo la radiación que incide en la apertura, llegará al captador mientras que para otras orientaciones los rayos serán reflejados. Figura A.3.a)

Los concentradores compuestos tienen bajas relaciones de concentración y en el eje este-oeste pueden ser operados como dispositivos fijos a lo largo del año o al menos con pequeños ajustes estacionales. Estos pueden ser diseñados como dispositivos de baja concentración con largos ángulos de aceptación o como de alta concentración con ángulos de aceptación pequeños. Aunque usualmente trabajan a temperaturas relativamente bajas $<100^{\circ}\text{C}$.⁹

Estos concentradores a diferencia de otros son ideales para cualquier tipo de radiación, ya que pueden coleccionar toda la radiación directa y gran parte de la radiación difusa. Además no requieren de superficies altamente especulares y pueden tolerar el polvo y la degradación. Un módulo típico de estos colectores es mostrado en la Figura A.3.b), aunque es poco común encontrar colectores de este tipo en el mercado nacional.

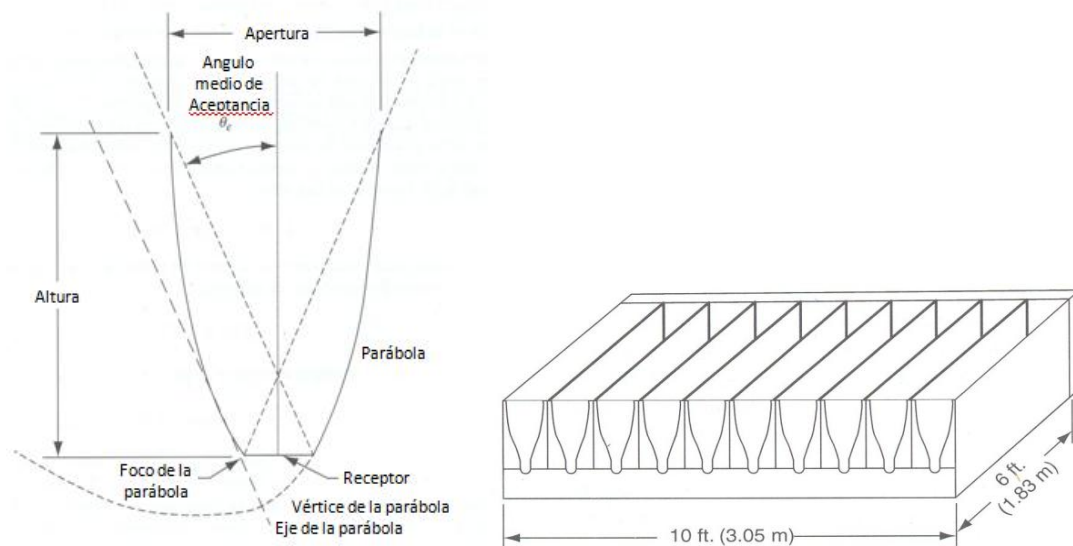


Figura A. 3. a) Sección transversal de un Concentrador Compuesto Parabólico simétrico y b) Módulo de concentradores compuestos parabólicos⁹

La superficie del captador es colocada en el fondo de ellos, a su vez, una cubierta de vidrio puede ser usada para encapsular el módulo entero. Estos colectores muestran ventajas para calentamiento de agua cerca del punto de ebullición y para aplicaciones de vapor de baja presión.⁹

A.3. Pérdidas por convección

Si el captador no tiene cubierta de vidrio, el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada puede adquirir un valor considerable. A presión atmosférica y teniendo aire como fluido alrededor del colector, se ha encontrado⁴⁷ que para convección natural de tubos horizontales

$$h_c = 1.5(t_c - t_a)^{1/3} \quad (8)$$

En la Tabla A.1, se muestran valores de coeficientes de transferencia de calor h_c estimados. Por otro lado, mediante la aplicación de un vacío ‘ligero’ ($\sim 10^{-3}$ bar) se puede conseguir, esencialmente, la eliminación de las pérdidas por convección, mientras que es necesario un vacío ‘fuerte’ (inferior a 10^{-6} bar), si se desean eliminar también las pérdidas por conducción. El vacío no sólo contribuye a la reducción de pérdidas, sino también a minimizar la influencia de las condiciones climáticas (condensación, humedad, etc.) en los materiales empleados, evitando su rápido deterioro y mejorando así la durabilidad y el rendimiento global del sistema⁴⁸.

Debido a la presión atmosférica, que produciría fuerzas muy grandes al aplicarse a toda la superficie de la cubierta y a los problemas técnicos relacionados con el sellado de la carcasa del colector, la construcción de un colector de vacío con la forma de uno de placa plana, representa gran dificultad.

Tipo de convección y fluido	$h(\text{W/m}^2\text{K})$
Vacío	0
Convección natural, aire	5-25
Convección natural, agua	20-100
Convección forzada, aire	10-200
Convección forzada, agua	50-10000
Agua en ebullición	3000-100000
Vapor de agua en condensación	5000-100000

Tabla A. 1. Valores de coeficientes de transferencia⁴⁰

A.4. Propiedades ópticas

La espectrofotometría es la medición de la reflectancia, transmitancia o absortancia de un material en función de la longitud de onda de la luz incidente. De manera más específica, estas propiedades son la reflectancia espectral, la transmitancia espectral y la absortancia espectral.

En cuanto a los instrumentos de medición, normalmente los espectrofotómetros miden relaciones

con respecto a referencias ideales de las propiedades de los materiales y los espectro-radiómetros miden cantidades absolutas de energía desde una fuente de luz.

A.4.1. Reflectancia

La reflectancia espectral es la relación del flujo de energía reflejado por el mismo material entre el flujo reflejado por una superficie ideal blanca. Esta superficie perfectamente blanca es una suposición teórica hipotética. Realmente esta semejanza con la superficie ideal se lleva a cabo por calibración, no por el uso de una superficie real perfectamente blanca. Así para un material cerca de este valor se le asigna una reflectancia de 1.

La componente especular es la proporción de energía la cual es reflejada en la misma manera como sucedería en una superficie plana y de gran área. Así, la reflectancia especular correspondiente a cada componente se define como el cociente de intensidad monocromática reflejada a la incidente. La Figura A.4 mostrada, de acuerdo a Duffie&Beckman⁸ define los ángulos que se emplearan en el análisis de la reflexión y transmisión de la radiación especular.

El ángulo θ_i se conoce como el ángulo de incidencia, mientras que el ángulo θ_r corresponde al ángulo de refracción.⁸ Ambos están relacionados entre sí con los índices de refracción de los dos medios por la ley de Snell,

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_r}{n_i} = n \quad (9)$$

En donde n_i y n_r son los índices de refracción de cada una de las dos sustancias que forman la interfase, y n es el cociente de ellas. Debe destacarse que para la mayoría de las sustancias de interés en aplicaciones solares, el índice de refracción varía entre 1.3 y 1.6.

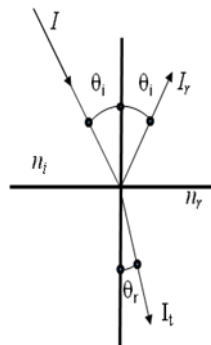


Figura A. 4 Haz de radiación incidente y reflejado en una interfase¹¹

A.4.2 Transmitancia

La transmitancia espectral es la relación del flujo transmitido con respecto a lo que transmitiría una superficie ideal transparente. En el caso de superficies opacas la suma de la absorptancia y la reflectancia debe ser igual a la unidad. Sin embargo, si la superficie es transparente a la radiación incidente, la suma de la absorptancia, la reflectancia y la transmitancia debe de ser igual a la unidad.

La teoría electromagnética permite predecir la reflectancia monocromática en la dirección especular de superficies pulidas que se encuentran física y químicamente limpias. La energía radiante que incide o emana de una superficie especular puede descomponerse en dos componentes de polarización: una paralela y otra perpendicular al plano de incidencia. Debe destacarse que para la mayoría de las sustancias de interés en aplicaciones solares, el índice de refracción varía entre 1.3 y 1.6. La Tabla A.5 muestra algunos valores de refracción y transmitancia para distintos materiales en el intervalo visible.

Para la cubierta de un colector se tienen dos interfases. Suponiendo la cubierta está en contacto aire por ambos lados y que la absorción es despreciable $(1 - \rho)$ del haz de radiación incidente en la cubierta llega a la segunda interfase. De esa cantidad, como se muestra en la Figura A.6 $(1 - \rho)^2$ pasa a través de la segunda interfase y $(1 - \rho)\rho$ se refleja de regreso hacia la primera.

Material	Índice de refracción
Aire	1.00
Vidrio (tipo para colector solar)	1.50 – 1.52
Plexiglas	1.49
Mylar	1.64
Tediar	1.45
Agua (líquida)	1.33
Agua (sólida)	1.31

Figura A. 5. Tabla de índices de refracción⁴⁹

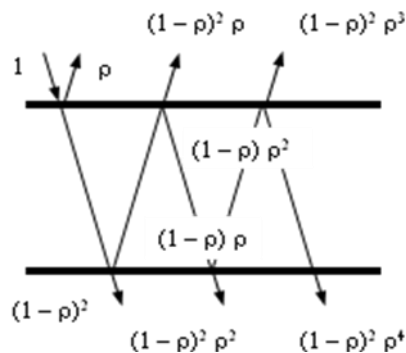


Figura A. 6. Transmisión a través de una cubierta⁸

El proceso continua para cada componente de polarización. Sumando los flujos de radiación que atraviesan una sola cubierta se obtiene que, para cada componente,

$$\begin{aligned}\tau_{r,1} &= (1 - \rho)^2 + (1 - \rho)^2 \rho^2 + (1 - \rho)^2 \rho^4 + \dots \\ &= (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1 - \rho)^2}{(1 - \rho)^2} \\ \tau_{r,1} &= \frac{(1 - \rho)}{(1 + \rho)}\end{aligned}\tag{10}$$

Mediante un análisis similar puede demostrarse que para n cubiertas

$$\tau_{r,n} = \frac{(1 - \rho)}{1 + (2n - 1)\rho}\tag{11}$$

En el análisis anterior se supuso que la absorción de radiación en la cubierta es insignificante. Sin embargo, la realidad es que cuando pasa a través de un medio parcialmente transparente como el vidrio, una fracción de la radiación incidente es absorbida. La disminución en intensidad puede describirse suponiendo que la atenuación es proporcional a la intensidad local en el medio. Si $G(x)$ es la irradiación después de que ha recorrido una distancia x en el medio, la ley de Bouger indica que,

$$-dG(x) = G(x)Kdx\tag{12}$$

En donde K es el coeficiente de extinción, el cual se supone constante. Integrando la expresión anterior entre 0 y L se obtiene,

$$\tau_a = \frac{G_L}{G_0} = e^{-KL}$$

En donde L es la longitud de la trayectoria que sigue la radiación en el medio y τ_a es la transmitancia considerando únicamente absorción.

Los efectos de la reflexión y la absorción sobre la transmitancia pueden tomarse en cuenta únicamente multiplicando las dos transmitancias τ_r y τ_a . Esto es,

$$\tau = \tau_a \tau_r\tag{13}$$

A.5. Acero inoxidable

A principios del siglo XX algunos metalurgistas descubrieron que adicionando poco más de 10% de cromo (Cr) al acero, éste no presentaba “herrumbre” bajo condiciones normales; la razón de ello es que el cromo suele unirse primeramente con el oxígeno para formar una delgada película transparente de óxido de cromo sobre la superficie del acero y excluye la oxidación adicional del acero inoxidable. En caso de que ocurra daño mecánico o químico, esta película es auto-reparable en presencia de oxígeno⁴⁶.

A.5.1. Designación y Clasificación de los aceros inoxidables

El acero inoxidable es esencialmente un acero de bajo carbono, el cual contiene un mínimo de aproximadamente 10% de cromo en peso. Existen varios grupos o familias de aceros inoxidables, y cada uno contiene un número específico de tipos con características distintas.

En el pasado, las designaciones de los aceros inoxidables se formularon bajo los lineamientos de American Iron and Steel Institute (AISI). Recientemente, cuando la AISI fue reemplazada por el Specialty Steel Institute of North America (SSINA), esas designaciones fueron substituidas por el código UNS (Unified Numbering System) formulado conjuntamente por la Society of Automotive Engineers (SAE) y por American Society for Testing and Materials (ASTM).

Con objeto de entender la nomenclatura, es necesario establecer que la estructura interna de los metales está compuesta de un arreglo entre los átomos que forma una red espacial y que para su estudio se ha llamado estructura cristalina. Considere el diagrama simplificado de fases del sistema binario hierro carbono, Figura A.7. El hierro existe en tres formas cristalinas que son: alfa, gama y delta en diferentes y específicas temperaturas, desde la temperatura ambiente y hasta el punto de fusión. Los límites específicos que definen estas formas alotrópicas varían con el contenido de carbono, y las estructuras cristalinas varían de acuerdo con su capacidad para disolver el carbono.

Ferrita es el cristal centrado en el cuerpo con una capacidad muy limitada de disolver carbono; austenita es la forma gama (γ -austenita) y es un cristal centrado en la cara con alta capacidad de disolver carbono. Ferrita cambia a austenita a temperaturas que disminuyen desde 910°C conjuntamente con el incremento de carbono y el enfriamiento lento permite un gradual y ordenado regreso a ferrita. Sin embargo cuando la aleación Fe-C es enfriada rápidamente, el carbono queda fuera de la solución y produce una estructura acicular llamada martensita, la cual es muy dura. Estos tres términos —martensita, ferrita y austenita— son también las descripciones de las tres principales familias de aceros inoxidables.

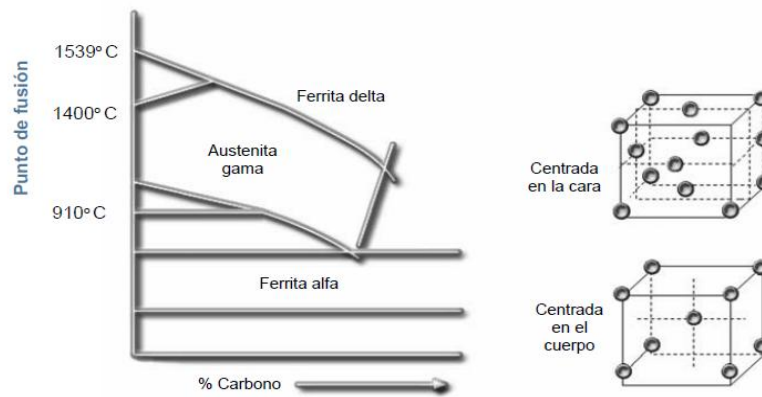


Figura A. 7. Diagrama simplificado de fases del sistema binario hierro-carbono ⁵⁰

Clase	Clasificación AISI	Ejemplos de especificaciones
I Martensíticos	SERIE	410, 420, 431
II Ferríticos	400	409, 430, 434
III Austeníticos	SERIES 200 y 300	304, 304L, 321, 316
IV Dúplex	Se usa el nombre comercial	329, 2205
V Endurecibles por precipitación		17-4 PH, 15-5 PH 17-7 PH, 15-7 MO

Tabla A. 2. Diagrama simplificado de fases del sistema binario hierro-carbono ⁴⁶

A.5.2. Familias de aceros inoxidables

El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco diferentes familias (Tabla A.2); cuatro de éstas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita, y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta familia son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.

Los aceros inoxidables de la serie 400 AISI mantienen su estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Como su nombre lo indica tienen una configuración metalográfica ferrítica con la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc) que se mantiene estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. El cromo inhibe la formación de austenita y promueve la formación de ferrita. Estos aceros son esencialmente aleaciones con cromo, cuyo contenido es usualmente del rango de 10.5 a 30%, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08% en relación con los martensíticos. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características.

Sus características son las siguientes:

- Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y en algunas aleaciones de molibdeno.
- Endurecidos moderadamente por trabajo en frío; no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.
- Las aleaciones ferríticas son magnéticas.
- Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se limitan las uniones por soldadura a calibres delgados.
- Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión
- Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío.

A.5.2.3 Aceros ferríticos y austeníticos

Los aceros inoxidable austeníticos comparten la mayor parte de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión que los ferríticos. Sin embargo, el contenido de Ni de los austeníticos hace que su costo sea variable y más alto comparado con el precio del cromo, el cual presenta un historial de relativa estabilidad.

Se cita el documento *La solución Ferrítica, guía esencial para los aceros inoxidable ferríticos* el cual indica lo siguiente: ‘Los ferríticos (...) con unas características técnicas impresionantes, están preparados para convertirse en un excelente material alternativo para muchas aplicaciones supuestamente “exclusivas de los austeníticos”⁵¹. Así mismo, promueve el uso del acero inoxidable ferrítico incluso en aplicaciones de energía solar, mostrando ejemplos eficientes de colectores solares.

En las Tablas A.3 y A.4 se enumeran algunos comparativos que se sustentan con los datos que se brindan en la siguiente con algunos valores representativos en cuanto a las propiedades de los aceros ferríticos vs. austeníticos. La estética, propiedades físicas, durabilidad e higiene del acero inoxidable lo hace un material adecuado para el aprovechamiento de la energía del sol.

A.5.3. Trabajo en frío del acero inoxidable

Se muestran datos en la Tabla A.5. Para los distintos materiales mostrando la facilidad para ser deformados en frío por un troquel. En donde se observa que el valor promedio de r para el 304 es más bajo comparado con 430, 439 y 444 sin embargo el valor promedio de n es mayor que los otros. Las descripciones de n y r aportadas por el IMINOX se presentan a continuación.

A.5.3.1. Valor r

La relación de deformación plástica r es la relación de deformación verdadera que ha ocurrido en la dirección perpendicular a la dirección de un esfuerzo de tensión aplicado y en el plano de la hoja, correspondiente a la dirección del espesor. Es un parámetro que indica la capacidad de un material para resistir adelgazamiento o engrosamiento cuando se somete ya sea a fuerzas de tensión o de compresión en el plano de la hoja. Es una medida de la anisotropía y está relacionado con la orientación cristalográfica preferencial de un metal policristalino. Por lo tanto el valor r se considera como una medida de la embutibilidad del material. Generalmente los metales presentan diferentes valores de propiedades mecánicas en las diferentes direcciones de ensayo por lo anterior se debe de tener un valor promedio de las r obtenidas a 0 , 45 y 90° . Generalmente a un alto valor de r , una mayor profundidad al embutido puede ser obtenida. Si $r > 1$ el material es apto para embutido.

A.5.3.2. Valor n

El exponente de endurecimiento por deformación n es la medición del incremento en la resistencia y dureza de un material debido a la deformación plástica. Nos ayuda a establecer qué material es más apto para soportar mayor cantidad de deformación plástica con una reducción de espesor considerable y sin que sufra fractura. A mayores valores de n mayor será la capacidad del material de soportar deformaciones severas y reducción de espesor considerable si fractura.

Características de los Ferríticos	Detalles
Presentan una dilatación térmica baja	Se dilatan menos que los austeníticos cuando se calientan
Ofrecen una excelente resistencia a la oxidación a altas temperaturas	Son menos propensos a la formación de escoria
Ofrecen mayor conductividad térmica	Transmiten el calor de manera más uniforme que los austeníticos
Los estabilizados con niobio ofrecen una excelente resistencia a la fluencia	Menor deformación frente a tensiones de larga duración
Son más fáciles de cortar y trabajar	
Ofrecen un mayor límite elástico	(similar al de los aceros al carbono habituales) que los austeníticos del tipo 304.
No sufren fisuración por corrosión bajo tensión	

Tabla A. 3. Comparativa de propiedades de aceros ferríticos vs. austeníticos

Acero	Coeficiente de dilatación térmica medio de 0°C a			Conductividad térmica	
	100°C ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	315°C ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	538°C ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	a 100°C (W/m.K)	a 500°C (W/m.K)
AISI 304	17,2	17,8	18,4	16,2	21,5
AISI 439	10,5	10,7	11,2	24,0	-
AISI 444	10,0	10,6	11,4	26,8	-
AISI 430	11,7	11,9	12,3	24,0	-
Acero	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (GPa)	Calor específico (J/kg.K)	Resistividad eléctrica (nW.m)	Permeabilidad magnética (aproximada)
AISI 304	8,0	193	500	720	1,02
AISI 439	7,7	215	793	617	-
AISI 444	7,8	200	420	620	-
AISI 430	7,7	193	620	620	-

Fuente : ASM SPECIALTY HANDBOOK – STAINLESS STEELS

Tabla A. 4. Propiedades físicas de aceros recocidos

Acero	$r_{90^{\circ}}$	$r_{45^{\circ}}$	$r_{0^{\circ}}$	$n_{90^{\circ}}$	$n_{45^{\circ}}$	$n_{0^{\circ}}$	r Prom.	n Prom.	$\square r$	$\square n$
304	0,82	1,16	0,84	0,394	0,390	0,417	0,995	0,398	-0,324	0,02
430	1,32	1,00	1,04	0,229	0,229	0,230	1,09	0,229	0,180	0,01
439	2,15	1,69	1,05	0,192	0,199	0,186	1,64	0,194	-0,09	-0,01
444	1,73	1,09	1,26	0,192	0,175	0,185	1,29	0,183	0,40	0,01

Tabla A. 5. Valores n&r de diversos aceros inoxidables. Nota: No se cuenta con información sobre los valores n y r para los grados 441 y 316⁵²

A.6 costo de la parte experimental

Experimental						
Molde de resina	cantida d	unidad	Costo unitario	Costo total		Descripción
Molde de placa	1	1 materia	\$315.50	\$315.50	Costo menudeo	Maylar, resina cristal, catalizador, película separadora, cera desmoldeante
Equipo de monitoreo de temperatura						
Cableado	12	mts	\$36.00	431.94	Costo menudeo	Cable RS232 comunicación PC Data Logger con conexiones
Varilla roscada	1	pieza	\$15.36	\$15.36	Costo menudeo	1/4-20*91cms
Cable para termopar	40	mts	\$43.13	\$1,725.00	Costo menudeo	Cable para termopar cal. 20 con forro de pvc tipo "k"
Soporte	1	pieza	\$1,932.00	\$1,932.00	Costo menudeo	Fabricación de caja de 60 x 35 cm, con placa calibre 16. de material y mano de obra
Termopar Data Logger	1	pieza	\$7,800.00	\$7,800.00	Costo menudeo	
Equipo de medición						
Manómetros()	2	pieza	\$0.00	\$0.00		Equipo experimental de laboratorio E.A. CIDETEQ
Flujómetro	2	pieza	\$0.00	\$0.00		Equipo experimental de laboratorio E.A. CIDETEQ
Piranómetro	1	pieza	\$0.00	\$0.00		Equipo experimental de laboratorio E.A. Cicata
Caracterización óptica						Equipo de caracterización CIDETEQ
instalación						
tubo	1	pieza	\$30.00	\$30.00	Menudeo	hidráulico cem 19mm 3mts
codo liso	4	pieza	\$4.58	\$18.32	Menudeo	codo 90 liso pvc 3/4
omega	6	pieza	\$1.39	\$8.34	Menudeo	conduit omega pared delgada
adaptador hebra	4	pieza	\$4.80	\$19.20	Menudeo	
adaptador macho	4	pieza	\$3.97	\$15.88	Menudeo	
Extras						
teflón	3	pieza	\$15.00	\$45.00	Menudeo	
brocas	1	pieza	\$50.00	\$50.00	Menudeo	5/32 titanium bit
cortador	1	pieza	\$220.00	\$220.00	Menudeo	cortador vertical 5/16" AF HSS
remaches	1	caja	\$45.61	\$45.61	Menudeo	remache pop 3/16in1/8in
Plastilina epóxica	4	paquete	\$57.50	\$230.00	Menudeo	
Pegamentos varios	1		\$300.00	\$300.00	Menudeo	
			TOTAL=	\$13,202.15		

Tabla A. 6 .Costo del material para la parte experimental

Referencias

- ¹ Ambriz García, José y Romero Paredes, H. (1993). Administración y ahorro de energía. Libros de Texto UAMI. México, 9706202633
- ² Torres Roldán, Francisco y Gómez Morales, Emmanuel (2001). Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. Secretaría de Energía (SENER). Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Centro Mario Molina, México.
- ³ Rincón Mejía, Eduardo, (2007). ¿Cuánto combustible fósil es posible ahorrar empleando calentadores solares de agua? ANES, México.
- ⁴ Programa Conae/ ANES/ GTZ, (2007). Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (Procalso). Forever Print S.A. de C.V., México.
- ⁵ Secretaría de Energía, (2005). Balance Nacional de Energía. SENER, México. Se considera una equivalencia de 38.1 MJ/m³ de gas natural y 3.8 MJ/barril de gas LP.
- ⁶ Rincón Mejía, Eduardo, (2008). Las Fuentes Renovables de Energía Como Base del Desarrollo Sostenible de México. ANES. México
- ⁷ ISSF International stainless steel forum, (2009). Case Study: The stainless steel solar façade of a highway maintenance building at Bursins, Switzerland. ISSF International stainless steel forum. US.
- ⁸ Duffie Jonh y Beckman, (2006). Solar Engineering of thermal processes. William John Wiley & Sons, Inc 3rd Ed US
- ⁹ Edited by Goswami, D. Yogi y Kreith, Frank, (2008). Energy conversion. CRC Press. Taylor&Francis Group. FL US
- ¹⁰ Short Notes on Heat Transfer and Heat Exchangers, (2008). Sustainable Energy Course Notes. KTH Royal Institute of Technology. Norway
- ¹¹ Manrique, José A., (1984). Energía Solar. Harla Harper & Row Latinoamericana. México
- ¹² Pilatowsky Figueroa, Isaac, (2007). Metodología de diseño de instalaciones solares para el calentamiento de agua. CIE-UNAM México, Notas para el 4o. Curso-Taller de Tecnologías Solares
- ¹³ Tabor, H. Harris, J. Weinberger, H. Doron, (1964). Further studies on selective black coatings. Conf. On new sources of Energy.
- ¹⁴ Cathro, Christie, K.J. y otros, (1975). Nickel black as Selective Absorbing Surface. Australia, Melbourne
- ¹⁵ Mc Donald, G. E., (1975) Spectral reflective properties of Black Chrome for use as a Solar Selective Coating. Solar Energy
- ¹⁶ García-Valladares, Octavio, (2009). Principios de la conversión térmica solar. Notas para el 4o. Curso-Taller de Tecnologías Solares CIE-UNAM, México.
- ¹⁷ Gupta, B.K. y Agnihotri, O.P., (1981). Solar selective surfaces. John Wiley, US.
- ¹⁸ Chowdhuty, Golam, (Jul 2000- Dec 2002). Selective Surface for efficient Solar Thermal Conversion, Vol.1, 2 & 3
- ¹⁹ CENSOLAR Central en España: Centro de Estudios de Energía solar Sevilla, ES
- ²⁰ Calentadores solares: Energía renovable en tu hogar. Campaña de Energía y Cambio Climático GreenPeace
- ²¹ Solarite, Instalaciones Técnicas Especializadas (ITE).
- ²² Han, Kyu-II y otros, (2002). A Study on the Improvement of Heat Transfer Performance in Low Temperature Closed Thermosyphon. KSME International Journal, Vol. 16 No. 9.
- ²³ Srimuang, W. y otros, (2009). Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon VFT. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23
- ²⁴ Strum, MJ (1995) Localized weld metal corrosion in stainless steel water tanks. US
- ²⁵ Determinación de dureza en agua. Método ASTM D 1126-92
- ²⁶ Compilación de 9 art. (2005). La ecología política en la cultura del agua de Querétaro. Abastecimiento de Agua. UAQ-MSU. México.
- ²⁷ Instituto Mexicano del Inoxidable, (2010). Módulo II Resistencia a la Corrosión de los Aceros Inoxidables. Manual del Programa Técnico Especializado en Acero Inoxidable. IMINOX, México.
- ²⁸ <http://app.eng.ubu.ac.th/~edocs/f20061122Suriya92.pdf>
- ²⁹ Paymal A. (1977). Absorber for a solar collector, Patent Number 4357933 Saint-Gobain Industries (Saint Germain-en-Laye, FR)
- ³⁰ Moore S. W. (1977), Structurally integrated steel solar collector, Patent Number 4010733. US
- ³¹ Instituto Mexicano del Inoxidable, (2010). Módulo IV Operaciones de transformación de los Aceros Inoxidables. Manual del Programa Técnico Especializado en Acero Inoxidable. IMINOX, México.
- ³² Karlsson, B. y Ribbing, C.G., (1978). Proc. Soc. Photo-Optical Eng. 161 (4)
- ³³ Smith, G.B.(1977). Metal Austral 204 (Septiembre 1977)
- ³⁴ Granziera, G., Metal Austral 211 (Septiembre 1977)
- ³⁵ Evans, T. E. y otros, (1972) Trans. Inst. Metal Finn 50
- ³⁶ Ruíz, Hugo y Pérez, Eduardo, (2009). Obtención de superficies selectivas negras de acero inoxidable series 400 y 300. CIDETEQ
- ³⁷ Serway. Sears, Z & Y, (2008). Physics for Scientists and Engineers. Física Universitaria, México.
- ³⁸ R. Bird, W. Stewart (2006). Fenómenos de transporte. Reverté, México.
- ³⁹ Montgomery, D., (2008) Diseño y Análisis de experimentos. Limusa, México

-
- ⁴⁰ ASHRAE 93-2010, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers ASHRAE, US.
- ⁴¹ NMX-ES-001-NORMEX-2005. Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C., ecuación 3, p.20
- ⁴² Active solar thermal design manual. Funded by U.S DOE, SERI and ASHRAE US De Mueller Associates US.
- ⁴³ (2010). Asesoría. IMINOX
- ⁴⁴ Course Notes, (2008). Flat Plate and Concentrating Collectors. Sustainable Energy Science and Engineering Center. Florida State University, US.
- ⁴⁵ Arancibia Bulnes, Camilo, (2008). Evaluación del Recurso Solar. Notas para el 4o. Curso-Taller de Tecnologías Solares. CIE-UNAM, México.
- ⁴⁶ De Charters, W. W. S. y Pryor T. L., (1982). An Introduction to the Installation of Solar Energy Systems. Victoria Solar Energy Council, Australia.
- ⁴⁷ Almanza Salgado, Rafael y Muñoz Gutiérrez, Felipe, (1994). Ingeniería de la energía solar. UNAM, México.
- ⁴⁸ Tubos al vacío. LANSOLAR Magazine <http://www.lansolar.com/paginas/revista/colectores%20tubo%20de%20vacio.pdf>
- ⁴⁹ García-Valladares, Octavio, (2009). Principios de la conversión térmica solar. CIE-UNAM. México, Notas para el 4o. Curso-Taller de Tecnologías Solares
- ⁵⁰ Pedraza, Víctor (Compilador), (2002). Acero Inoxidable Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable México
- ⁵¹ ISSF International stainless steel forum, (2009). La solución ferrítica. La guía esencial para los aceros inoxidables ferríticos. ISSF International stainless steel forum. US (www.worldstainless.org)
- ⁵² Torres Jaramillo, Pedro, (2010). Asesoría. IMINOX