



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO CON
RECEPTOR ALETADO PARA USO RESIDENCIAL

Tesis que presenta

JAVIER ENRIQUE BARRÓN DÍAZ

En opción al título de

DOCTOR EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida, Yucatán, México

2021



DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____


Javier Enrique Barrón Díaz

Mérida, Yucatán, México, a 07 de septiembre de 2021

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.

POSGRADO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Javier Enrique Barrón Díaz titulado **Modelado y construcción de un concentrador parabólico compuesto con receptor aletado para uso residencial** ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~ fue realizado en la unidad de Energía Renovable, Sistemas híbridos del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza y del Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda

Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 07 de septiembre de 2021

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca con numero 250809 otorgada para lograr la realización de este trabajo de investigación en el área de Energía Renovable, así mismo al CICY por la facilidad del uso de sus instalaciones y servicios.

Al laboratorio de cómputo avanzado del CICY por los equipos y softwares de simulación que se emplearon en el desarrollo de este proyecto.

A mis directores de tesis el Dr. Gonzalo Carrillo y el Dr. Emmanuel Flores por su apoyo, dedicación, tolerancia y guía, así como sus retroalimentaciones que ayudaron a la culminación satisfactoria de este trabajo y a mi formación académica. Que sin ese apoyo no se hubiera podido lograr.

A los miembros de mi comité evaluador, Dr. David Patiño, Dr. Bassam Ali, Dra. Beatriz Escobar, Dr. Manuel Flota, que con sus críticas constructivas y observaciones ayudaron a tener un trabajo de tesis más profesional.

Mi agradecimiento al equipo de trabajo de mis asesores, a Francisco Koh, a Danny Chan quienes dieron parte de su tiempo para lograr sacar adelante el proyecto, así como portaciones de sus conocimientos para hacer de este proyecto más completo.

También reconocer el apoyo de mi esposa e hijos que estuvieron siempre conmigo incondicionalmente en las altas y las bajas, así como a mis padres que siempre me dieron sus consejos y me transmitieron serenidad para poder seguir adelante y culminar esta etapa de mi formación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1 ANTECEDENTES.....	3
1.1. Calentadores solares.....	3
1.1.1. Tipos de calentadores solares.....	3
1.1.2. Tipos de concentradores.....	5
1.1.3. Tipos de receptores.....	7
1.2. Colector Parabólico Compuesto (CPC).....	8
1.3. Normalización en México de calentadores solares.....	11
1.4. Trabajos de estudios de un CPC.....	11
1.4.1. Métodos de diseño y construcción de un CPC.....	12
1.4.2. Evaluación térmica y óptica de un CPC.....	17
1.4.3. Evaluación mediante simulaciones de CPC.....	22
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	30
1.6. HIPOTESIS.....	31
1.7. OBJETIVO GENERAL.....	31
CAPITULO 2 MARCO TEORICO.....	32
2.1. Transferencia de calor.....	34
2.1.1. Conducción.....	34
2.1.2. Convección.....	35
2.1.3. Radiación.....	35
2.2. Propiedades físicas de los materiales.....	36
2.2.1. Absorbancia.....	36
2.2.2. Reflectancia.....	37
2.3. Eficiencia térmica de un CPC.....	37
2.4. Balance de Energía en el calentador solar.....	38
2.5. Trazado de rayos.....	39
2.6. Método del elemento finito.....	40
2.6.1. Dinámica de Fluidos Computacional.....	41
CAPITULO 3 METODOLOGIA.....	44

3.1. Colector parabólico compuesto (CPC).....	44
3.2. Colector con receptor con aletas segmentadas.....	45
3.3. Medición de la radiación solar y temperatura.....	45
3.4. Monitoreo del colector CPC.....	47
3.5. Modelado del sistema CPC.....	47
3.6. Análisis de trazado de Rayos.....	48
3.8. Modelo acoplado FEM-CFD en Abaqus.....	52
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1. Resultados experimentales	56
4.2. Resultados numéricos.....	59
4.2.1. Análisis de trazado de rayos.....	59
4.2.1.1. Receptor tubular sin aletas.....	59
4.2.1.2. CPC con receptor tubular con aletas.....	62
4.2.1.2.1. CPC con aletas continuas.....	62
4.2.1.2.2. Aletas discontinuas.....	64
4.2.1.3. Modelos aletados propuestos.....	66
4.2.1.3.1. Receptor aletado de 13 mm y con forma en “V”	66
4.2.1.3.2. Receptor aletado en “V” discontinuo	66
4.2.1.3.3. Receptor aletado continuo de 13 mm perpendicular.....	67
4.2.1.3.4. Comparación entre los receptores aletados propuestos.....	67
4.2.1.3.5. Receptores propuestos con diferente diámetro.....	70
4.2.2. Análisis FEM-CFD.....	74
4.2.3. Efecto de la velocidad de flujo másico	79
4.2.4. Análisis Económico.....	80
4.2.4.1. Inversión inicial.....	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	86

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. CLASIFICACIÓN DE COLECTORES SOLARES [19].....	6
TABLA 3.1. RESUMEN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MEDIDA EN LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN EN 2017. ...	46
TABLA 3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y TÉRMICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CO-SIMULACIÓN FEM-CFD.	52
TABLA 4.1. DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA POR ESTACIÓN EN KJ DE UN RECEPTOR CPC SIN ALETAS A 32° DE INCLINACIÓN.....	60
TABLA 4.2. DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA EN KJ CPC ALETA CONTINUA.....	63
TABLA 4.3. DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA RECEPTOR CON ALETAS DISCONTINUAS EN KJ	64
TABLA 4.4. ENERGÍA CAPTADA EN CADA TIPO DE RECEPTOR A LAS 12:00 HORAS EN INVIERNO EN KJ.....	66
TABLA 4.5. COMPARATIVO DE ENERGÍA ENTRE CPC PROPUESTOS EN KJ.....	68
TABLA 4.6. ENERGÍA EN KJ CAPTADA POR CADA RECEPTOR EL 22 DE JUNIO.....	71
TABLA 4.7. CAPTACIÓN DE ENERGÍA EN KJ EN INVIERNO.....	73
TABLA 4.8. POTENCIA PROMEDIO (DE LAS 8 A.M. A LAS 5 P.M.) SOBRE LAS SUPERFICIES DE LOS DIFERENTES RECEPTORES A FINALES DE INVIERNO, PRINCIPIOS DE INVIERNO Y EN VERANO.	79
TABLA 4.9. RELACIÓN DE COSTOS (EN PESOS MEXICANOS) DEL MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN RECEPTOR TUBULAR SIN ALETAS.	81
TABLA 4.10. COSTO DE FABRICACIÓN ESTIMADO PARA COLECTORES CPCs Y UN COLECTOR DE PLACA PLANA Y COSTO EN EL MERCADO DE UN COLECTOR DE TUBOS DE VACÍO.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DIAGRAMA DE UN CALENTADOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO [11]	3
FIGURA 1.2. CALENTADORES SOLARES DE BAJA TEMPERATURA: (A) CALENTADOR TUBOS DE VACÍO; (B) CALENTADOR PLACA PLANA.....	4
FIGURA 1.3. CALENTADORES SOLARES DE MEDIA TEMPERATURA.	4
FIGURA 1.4. CALENTADORES SOLARES DE ALTA TEMPERATURA (A) SISTEMA DE COLECTORES PARABÓLICOS; (B) SISTEMA DE HELIOSTATOS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	5
FIGURA 1.5. TIPOS DE RECEPTORES PARA UN CPC [20].	8
FIGURA 1.6. PARTES BÁSICAS DE UN CPC [4].	9
FIGURA 1.7. DIAGRAMA DE UN CPC CON CÚSPIDE COMPLETA Y RECEPTOR CILÍNDRICO [19].	9
FIGURA 1.8. PERSPECTIVAS DEL PLANO ECLÍPTICO DE EQUINOCCIO Y EL PLANO ECLÍPTICO DEL SOLSTICIO DE INVIERNO [26].....	12
FIGURA 1.9. DISEÑO DE COLECTOR CONCENTRADO DE WINSTON [27].	13
FIGURA 1.10. (A) PERFIL CON RECEPTOR OVALADO; (B) PERFIL CON RECEPTOR CILÍNDRICO; (C) PERFIL CON RECEPTOR DE ALETA [28].	13
FIGURA 1.11. RUTAS DE FLUJO A TRAVÉS DE LOS COLECTORES. LAS ÁREAS SOMBREADAS EN LOS ABSORBEDORES SON LOS DE BAJA INTENSIDAD DE RADIACIÓN [30].	14
FIGURA 1.12. PERFIL DEL RECEPTOR PROPUESTO [31].	15
FIGURA 1.13. BOSQUEJO DEL COLECTOR CPC AL VACÍO ESTACIONARIO [6].	15
FIGURA 1.14. ESQUEMA DEL CPC PROPUESTO POR GUDEKAR ET AL. [32].	15
FIGURA 1.15. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CPC DISEÑADO PARA (A) UN RECEPTOR DE TUBO EN U SIN ALETAS, Y (B) UN HÍBRIDO DE RECEPTOR PLANO IRRADIADO BIFACIALMENTE Y UN RECEPTOR DE TUBO EN U [33].....	16
FIGURA 1.16. CUATRO CONFIGURACIONES DE RECEPTORES (A) RECEPTOR PLANO UNILATERAL; (B) RECEPTOR DE ALETA; (C) RECEPTOR DE CUÑA; (D) RECEPTOR TUBULAR [20].....	18
FIGURA 1.17. DIAGRAMA DEL COLECTOR PROPUESTO (A) SIMÉTRICO; (B) ASIMÉTRICO; (C) PERFIL DE LOS ABSORBEDORES [40].	19
FIGURA 1.18. SECCIÓN TRANSVERSAL Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LOS COLECTORES SOLARES CPC ESTUDIADOS. (A) COLECTOR CPC CON UNA UNIDAD ABSORBEDORA (MODELO CPC-S); (B) COLECTOR CPC CON TRES UNIDADES ABSORBEDORAS (MODELO CPC-T) [42].....	20
FIGURA 1.19. COLECTOR SOLAR INTEGRADO COMBINADO CON CPC [44].	20
FIGURA 1.20. SISTEMA DE CPC AL VACÍO: (A) SECCIÓN TRANSVERSAL DEL COLECTOR; (B) UN ACERCAMIENTO AL TUBO RECEPTOR DE COBRE CON ALETA [46].	21
FIGURA 1.21. (A) GRÁFICOS DE CONTORNO DE LA FRACCIÓN DE VOLUMEN DE VAPOR EN LA SECCIÓN DEL EVAPORADOR; (B) COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS MEDIDOS Y LOS SIMULADOS [51].	23
FIGURA 1.22. DISEÑO DE UN CPC EN LIGHTTOOLS [54]	24
FIGURA 1.23. TRAZADO DE RAYOS DE UN CPC CON ABSORBEDORES EN “V” CON ÁNGULOS DE INCIDENCIA DE (A) 0°, (B) 5°, (C) 10° Y (D) 15°. LAS CARACTERÍSTICAS DEL CPC SON $H = 20$ CM, $A = 19,6$ CM, $B = 2,5$ CM, $W = 5$ CM, $H_B = 0,7$ CM, $X_T = 2,3$ CM, $Y_T = 1,0$ CM Y $\Theta_M = 9$ GRADOS [55].	25
FIGURA 1.24. DISEÑO EN SOLIDWORKS DE UN CPC Y ESTUDIO DE CFD [56].	25
FIGURA 1.25. TRAZADO DE RAYOS (A) SIN RECEPTOR (B) CON RECEPTOR TUBULAR	26
FIGURA 1.26. (A) MODELO 3D DEL RECEPTOR ALETADO; (B) SIMULACIÓN DEL FLUJO TÉRMICO DEL SISTEMA [59].	27
FIGURA 1.27. GRÁFICA COMPARATIVA ENTRE EL PROTOTIPO EXPERIMENTAL Y EL RESULTADO ARROJADO POR LA SIMULACIÓN [60].	27
FIGURA 1.28. EVOLUCIÓN DEL SOMBREADO (A - E) Y MAPEO DE IMPACTO DE FOTONES (F-J) EN EL RECEPTOR PARA EL SOLSTICIO DE VERANO DE 8 A 14 HORAS [61].	28
FIGURA 2.1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN CPC [19].	32
FIGURA 2.2. TRUNCAMIENTO DE UN CPC SEGÚN EL CRITERIO DE RINCÓN [72].	33

FIGURA 2.3. COMPORTAMIENTO DE LOS ÁTOMOS DURANTE EL MECANISMO DE CONDUCCIÓN [75].....	34
FIGURA 2.4. DIAGRAMA DE BALANCE DE ENERGÍA EN UN CALENTADOR SOLAR [81].	39
FIGURA 2.5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TRAZADO DE RAYOS DE UN CPC EN EL SOFTWARE TONATIUH [83].....	40
FIGURA 2.6. EJEMPLO DE MALLADO Y REPRESENTACIÓN DE LOS VOLÚMENES DISCRETOS.....	43
FIGURA 3.1. (A) VISTA TRASVERSAL DEL COLECTOR SOLAR CPC, (B) VISTA ISOMÉTRICA DEL COLECTOR SOLAR CPC [91].	44
FIGURA 3.2. (A) FOTOGRAFÍA DE LOS SISTEMAS CPC EXPERIMENTALES; (B) CPC CON RECEPTOR TUBULAR SIN ALETAS; (C) CPC CON RECEPTOR TUBULAR CON ALETAS SEGMENTADAS.	45
FIGURA 3.3. RECEPTOR TUBULAR CON ALETAS SEGMENTADAS DE COBRE [70].	45
FIGURA 3.4. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS INSTALADA EN CICY.	46
FIGURA 3.5. INTERFAZ EN LABVIEW DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LOS COLECTORES SOLARES DESARROLLADO EN EL CICY.	47
FIGURA 3.6. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA METODOLOGÍA NUMÉRICA PARA EL MODELADO DEL CPC: A) TRAZADO DE RAYOS EN EL SOFTWARE TONATIUH, B) PROCESAMIENTO DE DATOS EN EL MATLAB Y EXCEL; C) SIMULACIÓN DEL ANÁLISIS FEM-CFD EN EL SOFTWARE ABAQUS [91].	48
FIGURA 3.7. A) COLECTOR CPC CON ABSORBEDOR SIN ALETAS; B) COLECTOR CPC CON ABSORBEDOR CON ALETAS SEGMENTADAS; C) COLECTOR CPC CON ABSORBEDOR DE ALETAS CONTINUAS; D) SIMULACIÓN DE TRAZADO DE RAYOS DEL COLECTOR CPC CON ALETAS SEGMENTADAS; E) VISTA DE PRIMER PLANO.	49
FIGURA 3.8. MAPEO DE FOTONES IMPACTADOS EN EL RECEPTOR TUBULAR.....	50
FIGURA 3.9. ANÁLISIS EN EXCEL DE UN RECEPTOR SIMPLE: A) SEGMENTACIÓN DEL RECEPTOR; (B) DISTRIBUCIÓN DE FOTONES; (C) ENERGÍA EN W/m^2 PARA CADA SEGMENTO DE ÁREA.	51
FIGURA 3.10. MATRIZ DE CARGA TÉRMICA (W/m^2) APLICADA EN UN SEGMENTO EN PARTICULAR A LO LARGO DEL DÍA (12 HORAS, 43200 SEGUNDOS). ESTO SE HIZO PARA LOS 80 SEGMENTOS DE ÁREA MOSTRADOS EN LA FIGURA 3.9A.	51
FIGURA 3.11. A) MALLA DE MODELOS FEM Y CFD; B) CARGA TÉRMICA EN LA SUPERFICIE DEL ABSORBEDOR; C) MALLAS Y CONDICIONES LÍMITROFES DEL MODELO CFD DEL AGUA.	52
FIGURA 3.12. ASIGNACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS EN LA SUPERFICIE DEL RECEPTOR EN EL MODELO FEM.....	53
FIGURA 3.13. ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA Y VELOCIDAD INICIAL DEL FLUIDO EN EL RECEPTOR EN EL MODELO FEM.	54
FIGURA 3.14. MALLADO DE LAS DISTINTAS GEOMETRÍAS ANALIZADAS; (A) RECEPTOR SIN ALETAS, (B) RECEPTOR CON ALETAS SEGMENTADAS Y (C) RECEPTOR CON ALETAS CONTINUAS.	55
FIGURA 4.1. MEDICIONES DE LA TEMPERATURA DE ENTRADA Y SALIDA DEL RECEPTOR DE LOS CPCs EXPERIMENTALES, ASÍ COMO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE E IRRADIACIÓN GLOBAL REGISTRADAS EL 1 DE MARZO DEL 2020 PARA EL A) EL CPC CON RECEPTOR SIN ALETAS, B) EL CPC CON RECEPTOR CON ALETAS SEGMENTADAS. C) CAUDAL EN EL CPC CON EL RECEPTOR SIN ALETAS.	57
FIGURA 4.2. DIFERENCIA DE TEMPERATURA ΔT Y EFICIENCIA TÉRMICA η PARA LOS CPC'S CON RECEPTORES SIN ALETAS Y CON ALETAS SEGMENTADAS PARA EL 1 DE MARZO DE 2020	58
FIGURA 4.3. EFICIENCIA TÉRMICA h PARA LOS CPC SIN ALETAS Y CON ALETAS SEGMENTADAS PARA EL 1 DE MARZO DE 2020.	59
FIGURA 4.4. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LOS IMPACTOS DE FOTONES EN EL RECEPTOR SIN ALETAS DE LAS 8 A LAS 16 HORAS EN PRIMAVERA.	61
FIGURA 4.5. DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA EN UN CPC CON RECEPTOR SIN ALETAS.....	61
FIGURA 4.6. RECEPTOR TUBULAR CON ALETAS CONTINUAS DE 25 MM.....	62
FIGURA 4.7. ENERGÍA CAPTADA POR EL RECEPTOR CON ALETA CONTINUA DE 25 MM.	63
FIGURA 4.8. RECEPTOR TUBULAR CON ALETAS DISCONTINUAS DE 25 MM X 52 MM CON UN ESPESOR DE 3 MM.....	64
FIGURA 4.9. DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA POR ESTACIÓN CPC CON ALETAS DISCONTINUAS DE 25 MM X 52 MM.	65
FIGURA 4.10. RECEPTOR CON ALETAS DE 13 MM A 25° CON RESPECTO A LA HORIZONTAL DEL COLECTOR.....	66
FIGURA 4.11. RECEPTOR CON ALETAS DISCONTINUAS DE 25 MM X 52 MM EN POSICIÓN EN "V".	67
FIGURA 4.12. CPC CON ALETA PERPENDICULAR A LA INCLINACIÓN DE 32° DEL COLECTOR.	67
FIGURA 4.13. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE PROPUESTAS PARA EL 21 DE DICIEMBRE.	69

FIGURA 4.14. IMPACTO DE FOTONES POR CADA CPC PROPUESTO PARA EL 21 DE DICIEMBRE.	70
FIGURA 4.15. CPCs CON: A) RECEPTOR SIN ALETAS DE 1 1/4" DE DIÁMETRO; B) RECEPTOR SIN ALETAS DE 1" DE DIÁMETRO; C) RECEPTOR SIN ALETAS DE 1 1/2" DE DIÁMETRO.....	71
FIGURA 4.16. GRÁFICO COMPARATIVO DE RECEPTORES SIN ALETAS CON DIFERENTES DIÁMETROS EN VERANO... ..	72
FIGURA 4.17. MAPEO DE FOTONES EN LOS RECEPTORES CON DIÁMETROS DE 1 1/4" Y 1 1/2" EN VERANO.	72
FIGURA 4.18. GRÁFICO COMPARATIVO DE RECEPTORES SIN ALETAS CON DIFERENTES DIÁMETROS EN INVIERNO. ..	73
FIGURA 4.19. MAPEO DE FOTONES EN LOS RECEPTORES CON DIÁMETROS DE 1 1/4" Y 1 1/2" EN INVIERNO.	74
FIGURA 4.20. A) COMPARACIÓN ENTRE LAS TEMPERATURAS DE SALIDA EXPERIMENTALES Y LAS OBTENIDAS EN LAS SIMULACIONES FEM-CFD DEL RECEPTOR SIN ALETAS Y DEL RECEPTOR CON ALETAS, DEL 1 DE MARZO DE 2020; B) TEMPERATURAS DE SALIDA OBTENIDAS NUMÉRICAMENTE PARA LOS CPCs CON RECEPTORES SIN ALETAS, CON ALETAS SEGMENTADAS Y CON ALETAS CONTINUAS UTILIZANDO YA SEA UNA CARGA DE FLUJO DE CALOR MAPEADA O UNA CARGA DE FLUJO DE CALOR HOMOGÉNEA.	75
FIGURA 4.21. CONTORNO DE TEMPERATURAS EN LOS RECEPTORES DE LOS CPCs Y EN EL FLUIDO, Y SU RESPECTIVA SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA SALIDA DEL RECEPTOR A LAS 12 P.M. (MEDIODÍA) DEL 1 DE MARZO DE 2020: RECEPTOR SIN ALETAS (A, B); RECEPTOR CON ALETAS SEGMENTADAS (C, D); RECEPTOR CPC CON ALETAS CONTINUAS (E, F).	76
FIGURA 4.22. DIFERENCIA DE TEMPERATURA ΔT Y POTENCIA EN LA SUPERFICIE DEL RECEPTOR PARA LOS DIFERENTES COLECTORES CPC (IMAGEN IZQUIERDA) E IMAGEN DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LOS RAYOS SOLARES QUE IMPACTAN AL CPC AL MEDIODÍA PARA FINES DE LUSTRACIÓN (IMAGEN DERECHA): (A, B) FINALES DEL INVIERNO (1 DE MARZO DE 2020); (C, D) PRINCIPIOS DEL INVIERNO (15 DE ENERO DE 2021); (E, F) VERANO (9 DE JULIO DE 2020).	78
FIGURA 4.23. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES FEM-CFD PARA EL 1 DE MARZO DE 2020 CON UNA TEMPERATURA DE ENTRADA CONSTANTE DE 27 °C PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE RECEPTORES: A) DIFERENCIA DE TEMPERATURA MÁXIMA ΔT VERSUS EL CAUDAL MÁXICO m . B) EFICIENCIA TÉRMICA η_T VERSUS EL CAUDAL MÁXICO m ,.....	80

RESUMEN

El agua caliente constituye un consumo energético importante en una casa ya que tiene diversos usos como la higiene personal de quien habita la vivienda y la limpieza del hogar. En el estado de Yucatán, según datos del INEGI, en el 2015, el 21.5% de las viviendas ya contaban con un sistema de calentamiento de agua (boiler), ya sea de gas o eléctrico, sin embargo, el uso de sistemas fototérmicos aún no ha tenido tanto impacto. Los colectores solares son soluciones atractivas para diferentes usos energéticos incluyendo el calentamiento de agua. Los colectores parabólicos compuestos (CPC) solares por lo general son empleados para procesos industriales, donde se ha llegado a documentar registros de temperatura entre los rangos de 200 °C y 400 °C. Esto hace imperante el estudio de estos sistemas por su potencial de generación de agua caliente, y su adecuación para su uso doméstico. El uso del modelado numérico de sistemas hidrotérmicos, ya sea matemático o de simulación computacional, es hoy en día una herramienta común en la innovación de tecnología, ya que esto permite visualizar diferentes escenarios de cómo estos sistemas se comportarían una vez construidos y puestos en marcha bajo condiciones específicas; ahorrando tiempo y recursos en la evaluación del arreglo con mejor desempeño. En el presente trabajo se propone estudiar mediante el modelado computacional, un sistema con colector CPC orientado hacia el uso residencial, realizando propuestas de diseño que permitan identificar las condiciones más favorables para optimizar su eficiencia y costo, lo cual significaría una innovación importante si se logra implementar masivamente. Complementariamente, se contempla desarrollar el prototipo experimental del sistema virtual más atractivo para su validación. Con este estudio teórico-experimental se espera encontrar un diseño de un CPC, específicamente un receptor, que permita obtener un mayor aprovechamiento de la radiación solar, sin perder el enfoque de un sistema compacto y económico, con el potencial de ser transferido para su aprovechamiento en el uso de casa habitación.

ABSTRACT

Hot water availability is very important in a household because it has various uses such as the personal hygiene of the people living in the house and the cleaning of the house. In the state of Yucatan, according to INEGI data, in 2015, 21.5% of the houses already had a water heating system (boiler), either gas or electric; however, the use of photothermal systems is still not widely used. Solar collectors are attractive solutions for different energy applications including water heating. Compound parabolic collectors (CPCs) are usually used for industrial processes, where temperatures in the range of 200 °C to 400 °C have been documented, and thus, it is important to study these systems for their potential to generate hot water for residential use. The use of numerical modeling of hydrothermal systems, either mathematical or computational simulation, is now an important tool in technology innovation, as this allows to visualize different scenarios of how these systems would behave under specific conditions, saving time and resources in evaluating the best performing arrangement. In this work it is proposed to study through computational modeling a system with a CPC collector, generating design proposals that allow to identify the most favorable conditions to optimize its efficiency and cost, and apply it in residential use, which would be an important innovation if it can be implemented. In addition, it is envisaged to develop an experimental prototype of the most attractive virtual system, for validation. With this theoretical-experimental study it is expected to find a design of a CPC, specifically, an absorber, that allows to obtain greater solar radiation, without compromising the features of a compact and economical system, with the potential to be employed in residential applications.

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico de sistemas para el calentamiento de agua a diferentes temperaturas mediante el uso de energías renovables, ha ido en incremento, no sólo en países desarrollados, sino también en países subdesarrollados o en vías de desarrollo [1]. El agua caliente constituye un consumo energético importante en una casa teniendo diversos usos como la higiene personal de los que habitan la vivienda y usos diversos de limpieza como lavandería. A nivel internacional existen algunos estudios de medida de este consumo; en general se considera que un consumo medio típico es del orden de los 40 litros por día por persona [2]. En los países en desarrollo este consumo de agua caliente constituye entre el 30-40% del consumo de energía de un hogar, y normalmente se utilizan sistemas ineficientes como los calentadores eléctricos que consumen una gran cantidad de energía eléctrica o por medio de la quema de combustibles fósiles que de igual manera se traduce en un gasto por la adquisición del combustible. En los países desarrollados, las pérdidas de energía anual para producir agua caliente sanitaria (ACS) mediante calentadores eléctricos con tanque de almacenamiento es de alrededor del 25% [2, 3].

Una alternativa interesante que utiliza energías renovables son los calentadores solares. Muchos diseños han sido establecidos para los colectores solares, los cuales pueden ser reflectores o refractores, cilíndricos o superficies de revolución, y pueden ser continuos o segmentados. Los receptores pueden ser convexos, planos o cóncavos y pueden ser cubiertos o descubiertos. Los factores principales que incrementan el flujo de radiación en un colector solar de concentración son área de la abertura del colector y el área del receptor, las cuales varían según la geometría del colector [4]. Dentro de los sistemas de mayor demanda en el uso residencial y/o comercial, son el tipo de placa plana y de tubos de vacío. En ubicaciones geográficas como en la que se encuentra la ciudad de Mérida, Yucatán, estos sistemas comerciales llegan a registrar temperaturas máximas en el agua de entre 60-90 °C aproximadamente. Sin embargo existe otro tipo de colector, el cual se investiga en este proyecto, el cual es colector parabólico compuesto (CPC), utilizado más comúnmente en áreas industriales, como es la metalurgia o la generación de electricidad, obteniendo rangos superiores a los 250 °C [5]. Al re-escalar este tipo de sistema, se reduce la temperatura de uso adaptándola al requerimiento residencial, pudiendo obtener como resultado un sistema compacto, resultando más atractivo que los colectores tradicionales para este fin.

Sobre este tipo de colectores, los denominados CPCs, existen trabajos que registran en sus prototipos, temperaturas de entre los 120 – 150 °C, como el presentado por Buttinger et al. [6]; este prototipo presentó un área de apertura de 2 m², expuesto a una radiación de 1000 W/m², a temperatura ambiente de alrededor de 20 °C, donde la novedad es que utilizaron un gas inerte para mitigar las pérdidas de calor dentro del colector. En otro trabajo experimental, presentado por Okoronkwo et al. [7], se evaluó la capacidad de transferencia de calor en el colector CPC para una aplicación residencial, donde se registraron temperaturas de hasta 80 °C, lo cual arrojó como resultado su aprobación como colector eficiente. Los autores explican que esto fue gracias al uso de reflectores internos, los cuales hicieron que el área del colector se reduzca, lo cual a su vez redujo las pérdidas de calor.

Además del trabajo experimental de laboratorio, existen varios métodos que ayudan a que el avance tecnológico se realice con mayor velocidad, como por ejemplo las simulaciones computacionales, que hacen que el diseño de piezas y de sistemas completos puedan ejecutarse en un medio virtual, arrojando resultados muy aproximados a los que se obtendrían mediante la elaboración de prototipos experimentales. Entre estas herramientas existe el Método del Elemento Finito (FEM, por sus siglas en inglés) con el cual se pueden simular la resistencia de materiales, flujo de fluidos, torsión, deformación en materiales, transferencia de calor, por mencionar algunas capacidades.

En este trabajo se emplea el análisis FEM y la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para hacer más eficiente un colector CPC. Con estas herramientas se realizarán propuestas de diseño que permitan identificar las condiciones más favorables para optimizar su eficiencia, analizando el flujo de calor del sistema, la respuesta térmica y el comportamiento del fluido. Complementariamente se desarrollará el modelo experimental más atractivo para su validación y una propuesta final.

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

En la última década, el desarrollo de diferentes tecnologías en el área de las energías renovables ha ido en aumento, debido a que en el mundo existe una nueva perspectiva política y económica de la sustentabilidad [8]. Este tema en el desarrollo de los colectores térmicos solares no es la excepción. Los colectores solares, ya sea un calentador de agua, de aire o un secador, han tomado fuerza en el mercado, debido a que son sistemas que captan una gran cantidad de radiación solar y el aprovechamiento de esta es mayor. Estos colectores trabajan con una alta eficiencia a la temperatura deseada, son duraderos y solo necesitan un mantenimiento sencillo, además de ser económicos en relación a su vida útil [9].

1.1. Calentadores solares

Los calentadores solares son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía térmica. Estos dispositivos absorben la radiación solar, la convierten en calor interno, el cual se transfiere a un fluido (usualmente aire, agua o aceite) que pasa a través del colector [10].

Los calentadores solares constan de tres partes principales (ver Figura 1.1): el colector solar, que se encarga de capturar la energía del sol y transferirla al agua; el termo tanque, donde se almacena el agua caliente; y el sistema de tuberías por donde el agua circula [11].

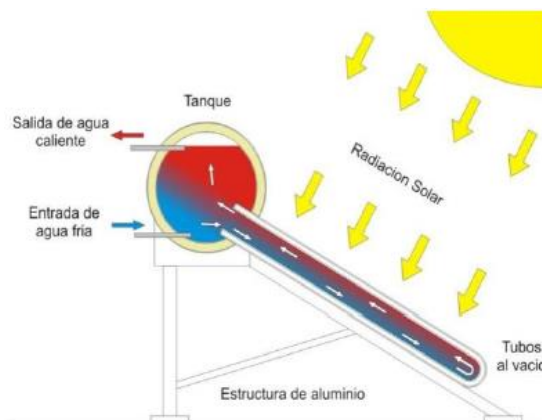


Figura 1.1. Diagrama de un Calentador Solar de Tubos de Vacío [11]

1.1.1. Tipos de calentadores solares

Los calentadores solares se clasifican de acuerdo con el nivel de temperatura que pueden alcanzar y se dividen en:

Baja temperatura. Generan temperaturas menores a los 100 °C. Son ideales para calentar piscinas, uso doméstico de agua y actividades industriales en las que la temperatura del proceso no sea mayor a 60 °C (pasteurización, lavado, etc.). En la Figura 1.2 se muestran dos ejemplos de los calentadores solares más comunes que se encuentran en el mercado. Uno de ellos es el colector de tubos de vacío (Figura 1.2a) y el otro es un sistema de placa plana (Figura 1.2b). Ambos sistemas emplean una circulación por termosifón y son utilizados en su mayoría para viviendas.

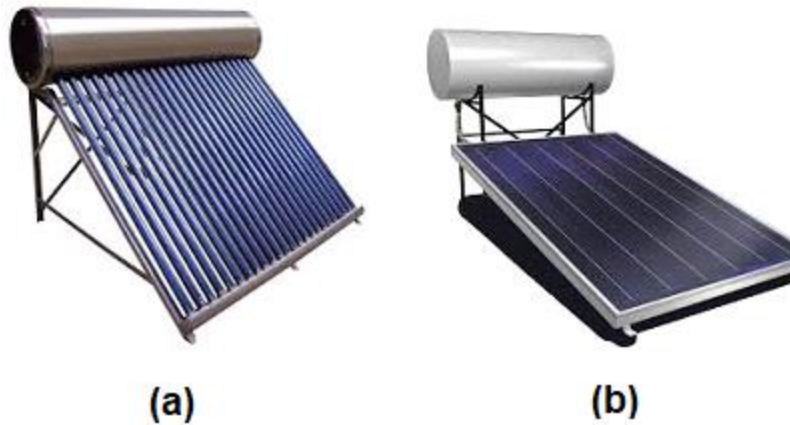


Figura 1.2. Calentadores solares de baja temperatura: (a) Calentador tubos de vacío; (b) Calentador placa plana.

Media temperatura. Generan temperaturas de entre los 100 °C y 300 °C. Este tipo de colectores son utilizados en procesos industriales, como en la industria textil, y en lavado o teñido de la ropa. Los más comunes son los concentradores parabólicos que se muestran en la Figura 1.3.



Figura 1.3. Calentadores solares de media temperatura.

Alta temperatura. Generan temperaturas mayores a los 300 °C, la cual se puede usar para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica. Estos se instalan en regiones donde la posibilidad de días nublados es mínima [12], y por lo general en lugares con grandes extensiones para evitar obstáculos o elementos que puedan producir sombra. En la Figura 1.4 se pueden observar dos ejemplos de este tipo de colectores solares. La Figura 1.4a muestra un sistema a gran escala de colectores parabólicos y la Figura 1.4b muestra un concentrador tipo de

heliostatos, el cual es un conjunto de espejos que se encargan de redirigir la radiación solar a un punto focal. En ambos casos se genera vapor que mueve turbinas para la generación de energía eléctrica.



Figura 1.4. Calentadores solares de alta temperatura (a) Sistema de colectores parabólicos; (b) Sistema de heliostatos para generación de energía eléctrica.

1.1.2. Tipos de concentradores

Hoy en día, los sistemas solares de calefacción de agua se utilizan para viviendas, edificios de apartamentos, escuelas, lavado de coches, hospitales, restaurantes, granjas agrícolas e industrias [13]. Para escoger un calentador de agua solar, se debe seleccionar cuidadosamente el tipo de colector para proporcionar la temperatura del fluido requerida para la aplicación particular prevista [14]. Estos son diferenciados como intercambiadores de baja, media o alta temperatura. Las altas temperaturas se obtienen por medio de la reflexión, concentrando la irradiación solar [15]. Además, son clasificados de acuerdo con el radio de concentración C que está definido por:

$$C = \frac{A_{ap}}{A_{abs}} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

En donde A_{ap} es el área de apertura del colector y A_{abs} es el área absorbente. Para $C=1$, se tiene un colector de placa plana y cuando $C>1$, se tienen colectores concentrados. El uso de colectores de placa plana o de tubos al vacío, es adecuado para obtener energía térmica para aplicaciones domésticas, mientras que los colectores solares parabólicos compuestos (CPC) por lo general son empleados para procesos industriales [16] donde se requieren temperaturas más altas.

Algunas ventajas que tiene un sistema concentrador sobre un sistema de placa plana se mencionan a continuación [17]:

- La eficiencia es superior, se tienen registros de estudios donde esa eficiencia llega a ser 20% superior que los colectores planos.
- Se reduce la ocupación de área y por lo consiguiente ciertos costos.
- Menor problemática por disponibilidad de material, ya que estos son comunes en la mayoría de sus partes.

Los calentadores también se clasifican de acuerdo con el tipo de concentrador, es decir, reflector o refractor. El primero utiliza una superficie reflejante para concentrar la radiación solar en un receptor que absorbe la energía, mientras que el segundo lo hace mediante superficies que ocasionan la refracción de la luz solar. Ambos tipos de calentadores tienen la finalidad de dirigir la radiación solar a un punto focal sin importar el ángulo de incidencia, aprovechando así la mayor cantidad de radiación posible, lo cual incrementa la energía térmica disponible que el receptor puede transmitir al fluido de trabajo. Los concentradores cilíndricos o lineales enfocan la energía sobre una línea, mientras que los que tienen superficies de revolución o circulares, enfocan sobre un punto. Finalmente, se puede hacer una clasificación a partir de la geometría del receptor, así como al tipo de sección que presente el concentrador (ver Tabla 1.1). Los más comunes son de sección parabólica, sección esférica y de sección plana [18], en donde dependiendo del tipo de aplicación, así como la ubicación de instalación, se puede seleccionar el perfil que mejor se adapte.

Tabla 1.1. Clasificación de Colectores Solares [19]

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de Absorbedor	Radio de concentración	Rango indicativo de Temperatura (°C)
Estacionario	Colector de placa plana (FPC)	Plano	1	30 a 80
	Colector de tubos al vacío (ETC)	Plano	1	50 a 200
	Colector Parabólico Compuesto (CPC)	Tubular	1 a 5	60 a 240
Seguimiento en un eje	Colector Parabólico Compuesto (CPC)	Tubular	5 a 15	60 a 300
	Reflector lineal Fresnel (LFR)	Tubular	10 a 40	60 a 250

	Concentrador Cilíndrico Parabólico (PTC)	Tubular	15 a 45	60 a 300
	Concentrador Parabólico Combinado (CTC)	Tubular	10 a 50	60 a 300
Seguimiento a dos ejes	Reflector de Disco Parabólico (PDR)	Punto	100 a 1000	100 a 500
	Campo Colector de helióstatos	Punto	100 a 1500	150 a 2000

El radio de concentración, es la relación entre el área efectiva de apertura A_{ap} y el área del receptor A_{abs} [15] como se expresa en la Ecuación 1.1. El área efectiva de apertura se refiere al área proyectada no sombreada del sistema óptico. Este radio de concentración tiene un límite máximo que depende de si la concentración se hace con un concentrador circular como un reflector de disco parabólico o uno lineal como un concentrador CPC lineal parabólico [18].

En base a lo anterior y complementada a lo observado en la Tabla 1.1, entre más alta es la temperatura que se pretende alcanzar, más alto debe ser el radio de concentración, por lo consiguiente más precisos deben ser los componentes ópticos tanto del concentrador y del receptor, así como el mecanismo de seguimiento del sol para los sistemas donde aplique.

1.1.3. Tipos de receptores

El receptor como se mencionó anteriormente es la parte donde la energía solar se convierte en calor. Este incluye el absorbedor y en ocasiones también las cubiertas y aislante. Los tipos de receptores pueden ser cóncavos, convexos, planos, hemisféricos, cilíndricos, o elípticos (ver Figura 1.5). Cada uno de estos puede ser lineal o puntual [18], y dependerá de la aplicación que se le dé al colector. Debido a que el receptor debe tener la capacidad de absorber la mayor cantidad posible de radiación solar, la mayoría son construidos con metales aprovechando su conductividad térmica para conducir eficientemente el calor absorbido al fluido de transferencia de calor.

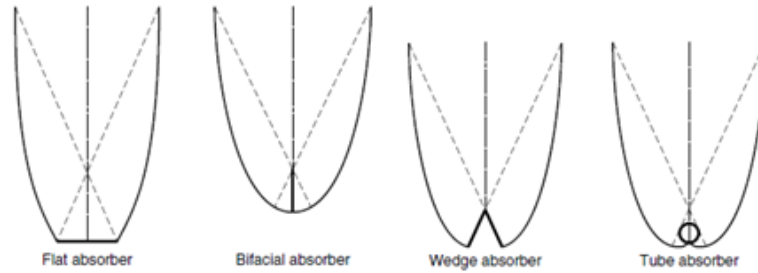


Figura 1.5. Tipos de receptores para un CPC [20].

1.2. Colector Parabólico Compuesto (CPC)

Un Colector Parabólico Compuesto (CPC) es un tipo de concentrador anidólico, es decir, tienen la capacidad de reflejar al receptor toda la radiación incidente sobre la abertura en rangos de ángulos de incidencia dentro de límites amplios. Originalmente fueron considerados como una modificación del detector de partículas de Cherenkov, el cual fue diseñado para estudiar el efecto de la radiación producida por el paso de los rayos cósmicos en la atmósfera. Dicho estudio le otorgó a Cherenkov el Premio Nobel a la Academia Rusa de Ciencias en 1958 [21].

El CPC consiste en un sistema de dos reflectores parabólicos en los dos extremos (izquierdo y derecho) de un absorbedor (ver Figura 1.6). La ventaja principal del CPC 2-D, es decir, CPC con perfil de dos dimensiones, es que puede recibir la radiación que llega con una extensión angular grande y la concentra en receptores lineales de ancho transversal pequeño [22], garantizando la máxima concentración posible para cualquier aceptación angular [23].

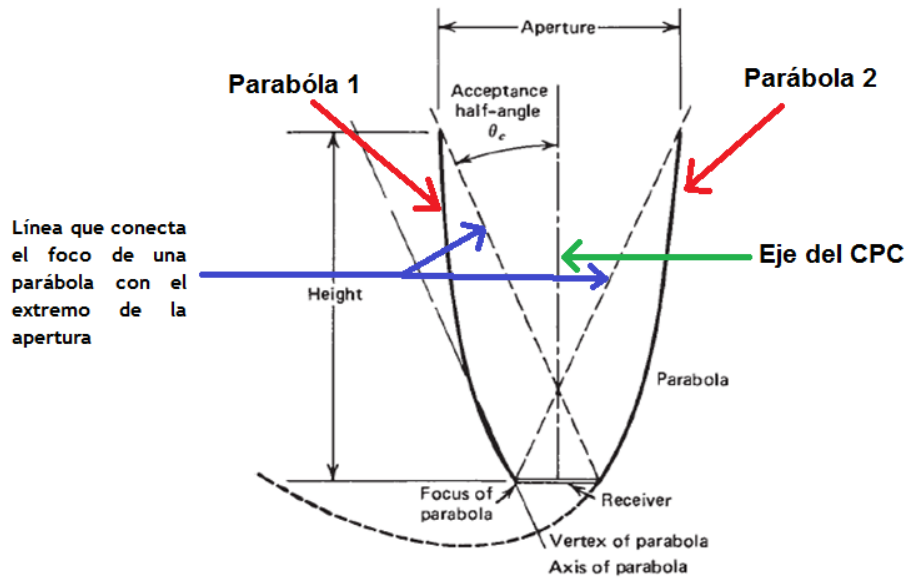


Figura 1.6. Partes básicas de un CPC [4].

Un concentrador de cúspide desarrollado para un receptor cilíndrico se muestra en la Figura 1.7. La curva particular ilustrada tiene un semiángulo de aceptación, θ_A , de 60° , o un ángulo de aceptación total, $2\theta_A$, de 120° . Cada lado de la cúspide tiene dos segmentos matemáticamente distintos unidos suavemente en un punto P relacionado con θ_A . El primer segmento, desde la parte inferior del receptor hasta el punto P es la involuta de la sección transversal circular del receptor. El segundo segmento es desde el punto P hasta la parte superior de la curva, donde la curva se hace paralela al eje y [19].

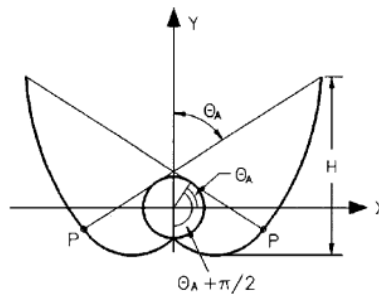


Figura 1.7. Diagrama de un CPC con cúspide completa y receptor cilíndrico [19].

En el análisis de este tipo de sistemas con receptor cilíndrico, se hacen algunas suposiciones:

1. Se supone que el CPC es ideal y libre de errores de fabricación. Esto permite que la relación de concentración geométrica del CPC se exprese como:

$$C = 1/\sin \theta_A \quad \text{Ecuación 1.2}$$

2. La radiación redirigida por el reflector parabólico es tomada en cuenta por la reflectancia aparente ρ_m^n . En estos análisis, n representa el número de reflexión, y se toma como una constante.
3. La dirección de la radiación solar incidente sobre varios componentes en el colector se puede considerar a través de la geometría. Cualquier reflexión de estos componentes, particularmente multi-reflexiones desde el reflector parabólico, provocará una reorientación de los rayos en el sentido de que el patrón de reflexión se vuelve difícil de seguir sin depender de un trazado de rayos detallado. Para facilitar el análisis, estas reflexiones son tratadas como difusas, y su energía se tiene en cuenta en términos de reflectividades difusas. Los procesos sucesivos de absorción y transmisión dentro del CPC también son difusos y se tienen en cuenta en términos de propiedades difusas.
4. Se supone que las propiedades físicas de los materiales y las propiedades ópticas del material son independientes de la temperatura [24].

Tomando en cuenta las anteriores suposiciones, podemos entonces declarar las ecuaciones de balance de energía [25] de cada sección del colector solar CPC.

Para la cubierta transparente:

$$M_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = q_c(t) + h_T(T_e + T_c) - h_{e/a}(T_c - T_a) - h_{r2}(T_c - T_s) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Para la envoltura:

$$M_e C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = q_e(t) + h_{r3}(T_r - T_e) - h_T(T_e + T_c) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Para el receptor:

$$M_r C_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = q_r(t) - h_{r3}(T_r - T_e) - q_u \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Para el fluido:

$$M_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = -C_{pf} m \frac{\partial T_f}{\partial x} + 2r_r \pi q_u \quad \text{Ecuación 1.6}$$

donde M_c , M_e , M_r , M_f son la masa (kg) de la cubierta, envoltura del receptor, receptor y fluido respectivamente; $q_c(t)$, $q_e(t)$ y $q_r(t)$, son respectivamente, la radiación solar incidente sobre la cubierta y absorbida por ella, la radiación solar absorbida por la envoltura del receptor y la

radiación del haz, absorbida por el receptor; h_{r2} , h_{r3} se definen como coeficientes de transferencia de calor. T_a , T_s , T_c , T_e , T_r , T_f son la temperatura ambiente, dentro del colector, cubierta, envoltura del receptor, receptor y fluido respectivamente; C_c , C_e , C_r , C_f , C_p es el calor específico de la cubierta, envoltura, receptor, fluido y fluido con presión constante respectivamente; m es el caudal másico, $h_{e/a}$ se define como coeficiente convectivo y h_T como el coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta del colector y la envoltura del receptor.

1.3. Normalización en México de calentadores solares

En el 2002 la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) publicó el “Anteproyecto de Normalización de colectores solares planos con cubierta y sin cubierta, pruebas mecánicas y pruebas térmicas” (ANM-ANES 2002) para evaluar el comportamiento térmico de colectores solares planos, que utilizan agua como fluido, tomando como base principalmente las normas internacionales ISO 9806-1 e ISO 9806-3 y la norma internacional ANSI/ASHRAE 93-1986. Los tipos de colectores solares que pueden ser evaluados son aquellos que trabajan con bajas temperaturas (45 °C) y medianas temperaturas (80 °C).

En el año 2005 se publicó en el Diario Oficial de la Federación, por parte de la Sociedad de Normalización y Certificación S.C. (NORMEX), el aviso de consulta pública del proyecto de la norma PROY-NMX-001-NORMEX-2005 para evaluar el rendimiento térmico y las características de funcionalidad de los colectores solares que utilizan agua como fluido de trabajo y que se comercializaban en el país. Este proyecto de norma fue elaborado por el Subcomité de Calentadores Solares, del Comité Técnico de Normalización Nacional para Energía Solar NESO-13, tomando como base principalmente, la norma internacional ISO 9806-1, la norma FSEC-CP-5-80, y la norma internacional ANSI/ASHRAE 93-1986 referente a métodos de pruebas para determinar el desempeño térmico y funcionalidad de los colectores solares. Los tipos de colectores que pueden ser evaluados son: 1) colector solar metálico con cubierta, 2) colector solar metálico descubierto, 3) colector solar de plástico cubierto, 4) colector solar de plástico descubierto y 5) cualquier colector solar que presente cualquier innovación tecnológica propuesta.

1.4. Trabajos de estudios de un CPC

Con el paso del tiempo han existido varios estudios relacionados con los colectores solares del tipo CPC, enfocados en la evaluación de desempeño de estos, desde una perspectiva de diseño,

propiedades ópticas, de eficiencia de térmica, mediante distintos métodos incluyendo métodos experimentales y numéricos.

1.4.1. Métodos de diseño y construcción de un CPC

En 1958 Tabor H. empleó espejos para concentrar la radiación solar en un colector estacionario. Él definió un ángulo en la geometría solar denominado altitud de oscilación EWV (Figura 1.8), y mostró que un espejo parabólico cilíndrico Este-Oeste sin movimiento diurno puede producir una relación de concentración de tres. Esto quiere decir de acuerdo con la Tabla 1.1, el rango de temperatura de operación del sistema es de 60 a 240 °C. La relación de concentración se puede aumentar hasta aproximadamente cuatro con la ayuda de un pequeño espejo auxiliar (fijo) para proporcionar una segunda etapa de concentración óptica [26].

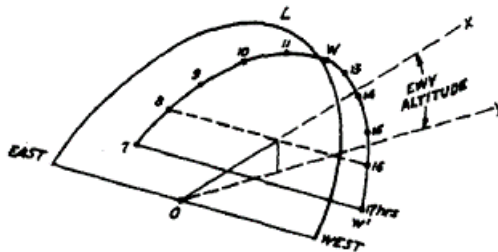


Figura 1.8. Perspectivas del plano eclíptico de equinoccio y el plano eclíptico del solsticio de invierno [26].

En 1974 Roland Winston desarrolló un colector solar basado en la detección de la radiación de Cherenkov en experimentos de física de alta energía (Figura 1.9). Dicho colector es un canal luminoso de pared reflectante en forma de cubeta que concentra la energía radiante en la cantidad máxima permitida por la conservación del espacio de fase. Este colector obtuvo una aceptación más amplia para la luz difusa que los colectores de concentración que utilizan la óptica de la proyección de imagen. La eficiencia de este tipo de colector de radiación concentrada, en comparación con un colector de placa plana, es recíproca al factor de concentración [27].

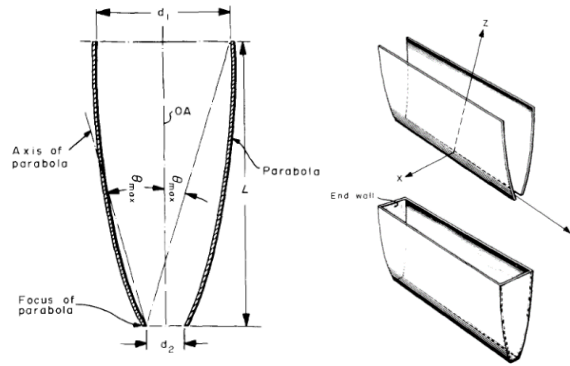


Figura 1.9. Diseño de Colector Concentrado de Winston [27].

En 1975 Winston y Hinterberger implementaron tres tipos de receptores, uno ovalado, uno cilíndrico y uno plano (Figura 1.10). Ese trabajo dio una prescripción para diseñar un espejo cilíndrico para concentrar la radiación en un tubo de forma general, aunque menciona que este diseño no es aplicable a espejos rotatoriamente simétricos (forma de cono). El diseño puede ofrecer ventajas sobre el espejo compuesto parabólico cilíndrico propuesto en 1974 por Winston [28].

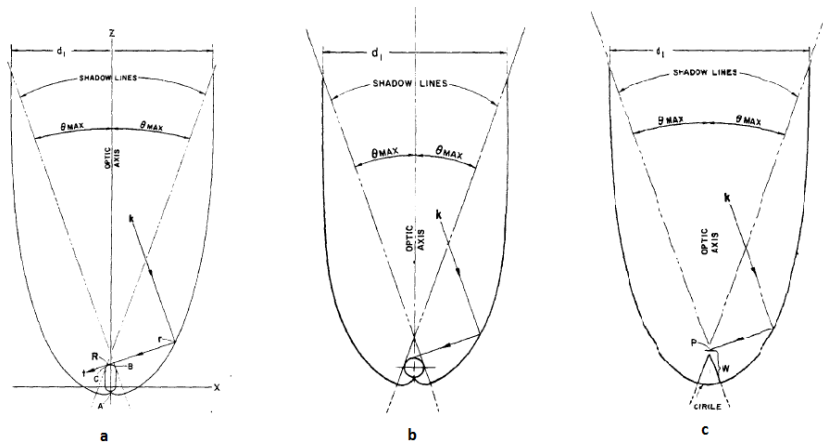


Figura 1.10. (a) Perfil con receptor ovalado; (b) Perfil con receptor cilíndrico; (c) Perfil con receptor de aleta [28].

En 1979 Goodman N. y Winston R., presentaron un trabajo de cómo tratar los problemas en los diseños presentados en el trabajo documentado de Rabl et al. en 1979. Entre las propuestas estuvo el agregar una cubierta de vidrio alrededor del receptor, abordar el efecto de falsos reflejos y desalineamiento del receptor y tomar en cuenta el efecto de la diferencia de temperatura entre fluido y la placa absorbadora [20].

McIntire en 1980 desarrolló un diseño de reflector que elimina la pérdida de la radiación solar a través del espacio entre el absorbedor tubular y el reflector. El nuevo diseño proporcionó una mayor eficiencia óptica al eliminar las pérdidas de espacio y mejorar la absorción neta de los tubos del receptor [29].

En 1991 Kéita et al. presentaron una propuesta de colector solar, implementando lo que ellos llamaron un concentrador segmentado, el cual consistió en interconectar cuatro receptores en serie (Figura 1.11). En este estudio se presentó el comparativo de un CPC con dos receptores y el propuesto, y sus resultados mostraron un incremento del 13% de la eficiencia térmica en el CPC segmentado [30].

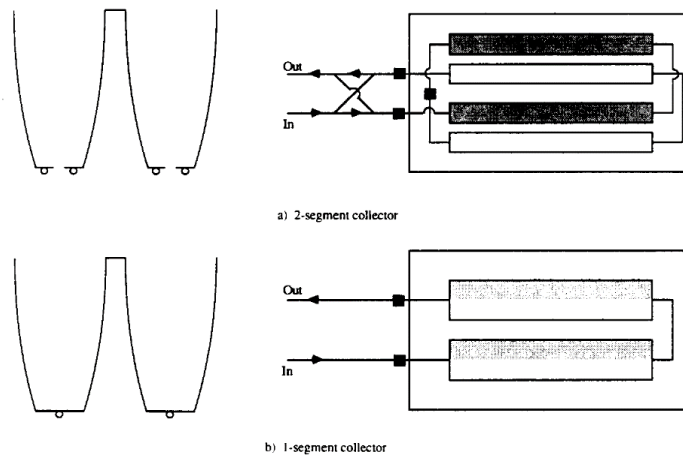


Figura 1.11. Rutas de flujo a través de los colectores. Las áreas sombreadas en los absorbedores son los de baja intensidad de radiación [30].

En 1995 Carvalho et al. presentaron un CPC con un receptor en forma de una “V invertida” (Figura 1.12), que fue concebido para dar cabida a un mayor espacio entre el receptor y el reflector, así también implementaron una doble cubierta con una película de teflón y un aislante transparente tipo panel. Esto dio como resultado que las pérdidas de calor en el colector se redujeran en aproximadamente un 30% mediante la adición de tales dispositivos de supresión de convección. También se calculó el promedio de rendimiento anual y en comparación con la energía suministrada por otros tipos de colectores (colectores de placa plana y de tubos de vacío). Se observó que, a 100 °C, el colector propuesto superaba en la eficiencia térmica a los demás y tenía un costo que lo hacía atractivo [31].

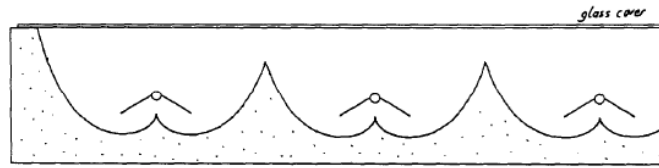


Figura 1.12. Perfil del receptor propuesto [31].

En el 2010 Buttinger et al. desarrollaron un prototipo de colector solar CPC al vacío y adicionando un gas inerte, para aplicarlo en procesos de calor. Dicho prototipo fue probado en Munich, Alemania, y contaba con una superficie de apertura de 2 m² mostrando eficiencias de alrededor del 50% para el criptón como gas utilizado con una presión de 0.01 bar a una temperatura de 150 °C y con una radiación de 1000 W/m² [6].

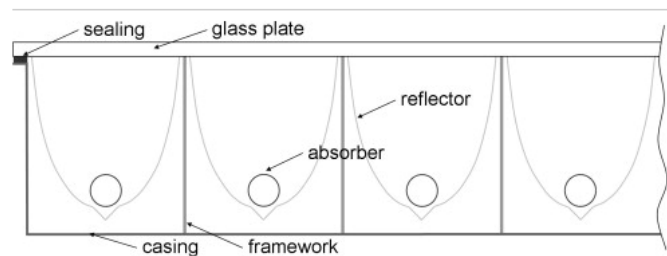


Figura 1.13. Bosquejo del colector CPC al vacío estacionario [6].

En el 2013 Gudekar et al. desarrollaron un modelo de trabajo de un sistema CPC para la generación de vapor (Figura 1.14). El análisis de rendimiento del sistema mostró una mejora en la eficiencia térmica de hasta un 71%. En virtud de su geometría, el sistema de CPC propuesto requiere un área de espejo mucho menor cuando se le compara con el diseño de CPC convencional y requiere un ajuste de inclinación simple por día para una operación diaria de 6 horas [32].

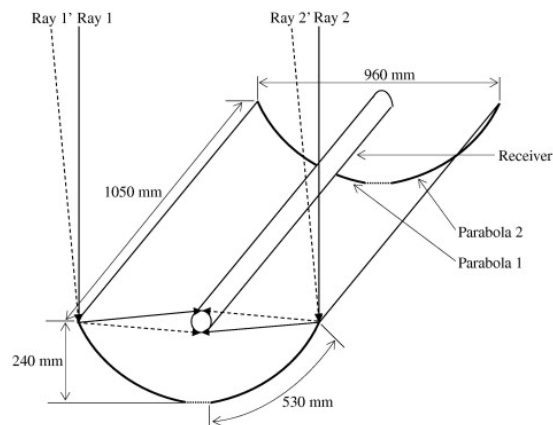


Figura 1.14. Esquema del CPC propuesto por Gudekar et al. [32].

En el 2015 Karwa et al. presentaron un estudio donde proponen un nuevo diseño de receptor para un CPC que es un híbrido de un receptor tubular en forma de U y un receptor plano irradiado bifacialmente (Figura 1.15). Para mantener el área del receptor constante, las aletas se incrementan en anchura a medida que disminuía el diámetro del tubo. En el régimen transitorio laminar-turbulento lograron la máxima eficiencia térmica efectiva [33].

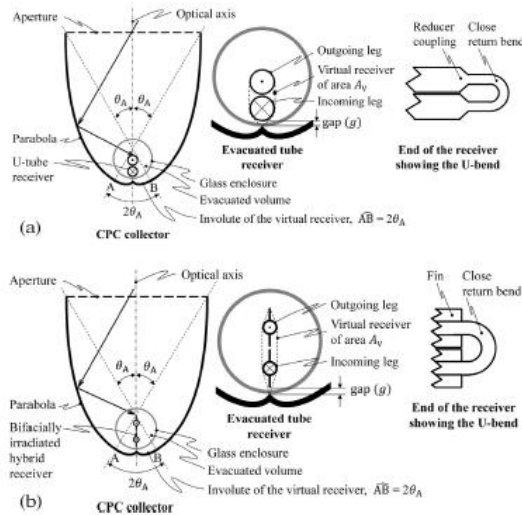


Figura 1.15. Sección transversal de un CPC diseñado para (a) un receptor de tubo en U sin aletas, y (b) un híbrido de receptor plano irradiado bifacialmente y un receptor de tubo en U [33].

En el 2016, Balashanmugam y Balasubramanian [34], presentaron un trabajo que se centró en el proceso de conversión de energía del colector plano al fluido de trabajo. Esto se logró mediante el uso de un agitador en el tubo ascendente para aumentar la transferencia de calor, y añadiendo al embalaje de la superficie del colector virutas de acero inoxidable para una mayor captura y retención de calor.

En el 2021, Lara et al. [35] presentaron un estudio donde se compararon dos sistemas de CPC, uno convencional con receptor cilíndrico y uno con aletas en “V” invertidas. Para ambos casos se agregó un sistema de seguimiento solar, basándose principalmente en un análisis numérico por simulación de trazado de rayos, con los sistemas orientados Norte-Sur, escogiendo una inclinación de 0° y 32° . Los resultados mostraron que un CPC que utiliza un receptor tubular con un sistema de seguimiento solar y una inclinación de superficie de 32° , alcanzando niveles de irradiación solar mayores que un CPC con un receptor con aletas. Esto demostró que el receptor tubular es más factible cuando se usa un sistema de seguimiento solar, en contraste con un CPC con receptor con aletas, que tuvo mejor viabilidad en arreglos que no incluyen seguimiento solar.

En el mismo 2021, Deng y Chen [36] propusieron un CPC empotrado en una pared para ser instalados en edificios, con la finalidad de aprovechar la radiación solar que llega en las fachadas de los edificios. Los modelos ópticos de haz y radiación difusa se construyeron para el modelo físico diseñado, que se basó en el método numérico y de trazado de rayos de Monte Carlo. Los resultados de la evaluación presentaron que la ganancia de calor anual en las cuatro diferentes latitudes (Kunming, Chengdu, Xi'an y Beijing, en China), fueron de 825.17, 447.84, 655.77 y 441.38 MJ/m², respectivamente. Concluyeron que el sistema podría satisfacer la demanda de energía térmica en aplicaciones residenciales y al mismo tiempo ser amigable con el medio ambiente, además de mitigar significativamente el consumo de energía del edificio.

1.4.2. Evaluación térmica y óptica de un CPC

Rabl en 1976 realizó un estudio donde determinó las propiedades térmicas y ópticas de un concentrador CPC. En este trabajo se calculó la transferencia de calor por convección y radiación a través del CPC y se presentaron las fórmulas para la evaluación del comportamiento de colectores solares basados en este principio. Se desarrolló una técnica analítica simple para calcular el número medio de reflexiones de la radiación pasante a través del CPC, lo cual fue conveniente para calcular las pérdidas ópticas [23].

En 1980 Rabl et al. investigaron experimentalmente colectores CPC sin vacío desarrollados desde 1974 y observaron una pérdida de calor considerablemente alta a través de los reflectores debido a que estos funcionaban como aletas disipadoras, las cuales se encontraban en contacto directo con el tubo absorbedor [37]. En dicho trabajo se mostró el análisis de los diseños ya presentados por el mismo autor previamente (Rabl et al. 1979) (ver Figura 1.16).

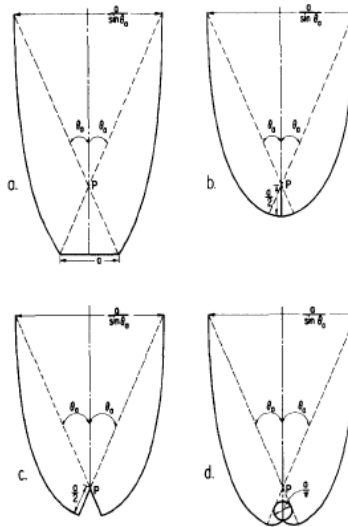


Figura 1.16. Cuatro configuraciones de receptores (a) receptor plano unilateral; (b) receptor de aleta; (c) receptor de cuña; (d) receptor tubular [20].

En 1981 Hsieh desarrolló fórmulas matemáticas para estudiar procesos térmicos en un colector CPC. El sistema estudiado consistió en una cúspide CPC provista de un tubo doble concéntrico evacuado como absorbedor. Se propusieron cuatro ecuaciones no lineales simultáneas para predecir el intercambio de calor entre los distintos componentes del sistema. Las ecuaciones de eficiencia del colector se desarrollaron siguiendo el formalismo de Hottel-Whillier-Woertz-Bliss. Los resultados de la prueba indicaron que, debido a la alta resistencia térmica entre la cubierta del receptor y el colector, el rendimiento del colector fue bastante estable y casi independiente de muchos parámetros probados [38].

En 1987 Fasulo et al. realizaron un estudio realizado donde presentan un balance energético de un CPC de 0.5 m^2 de superficie, construido con parábolas de vidrio. Ellos determinaron experimentalmente las pérdidas térmicas totales del CPC y posteriormente encontraron sus componentes conductivos, convectivos y radiantes, para temperaturas en el rango de $60\text{-}150 \text{ }^\circ\text{C}$. Con el fin de apreciar mejor los efectos de los dos últimos tipos de pérdidas, usaron diferentes receptores. Con cada uno de ellos se midió el rendimiento del CPC bajo radiación solar y luego se realizó el balance energético. Se apreció una importante mejora en el rendimiento del CPC, ya que se obtuvo una eficiencia térmica igual a 0.16 para una temperatura media de $126 \text{ }^\circ\text{C}$, para el fluido en el colector a una temperatura ambiente de $11 \text{ }^\circ\text{C}$ [39].

En 1996, Tripanagnostopoulos y Yianoulis realizaron un estudio con colectores solares estacionarios CPC con espejos simétricos y asimétricos (Figura 1.17). Ellos realizaron un análisis

óptico y pruebas experimentales en colectores de 2, 4 y 6 canales absorbentes. Ellos reportaron que el de cuatro canales absorbentes resultó ser el más eficiente para temperaturas en el rango de 100-200 °C, registrando eficiencias térmicas del 30% al 40% [40].

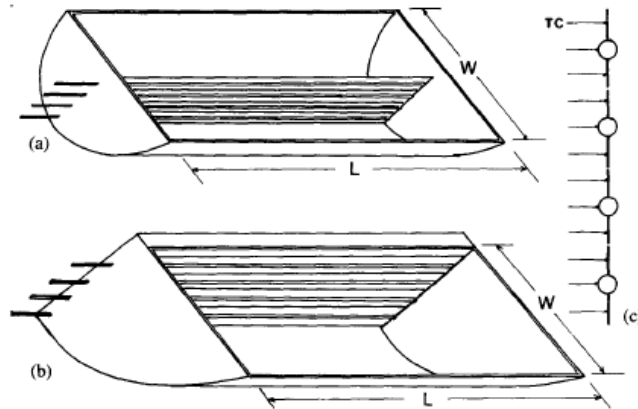


Figura 1.17. Diagrama del colector propuesto (a) simétrico; (b) asimétrico; (c) perfil de los absorbedores [40].

En 1998 Khalifa y Al-Mutawalli implementaron un sistema de seguimiento solar a dos ejes en un CPC y lo compararon con un sistema CPC estacionario. Los resultados mostraron que el CPC con seguimiento tenía un mejor rendimiento con un incremento en la energía colectada, de hasta un 75% en comparación con el mismo colector fijo. Dicha mejora se logró cuando el caudal estaba en el rango de 25 a 45 kg/h [41].

En el 2000 Tripanagnostopoulos et al. realizaron un estudio en donde presentan un diseño de colector con absorbedores planos. El colector propuesto se basa en un reflector asimétrico truncado del CPC. Se presentaron dos prototipos de estos colectores (ver Figura 1.18). Los resultados experimentales mostraron que el colector CPC-T propuesto podría alcanzar una eficiencia máxima de 0.71 y una temperatura de estancamiento de unos 180 °C además de ser más práctico [42].

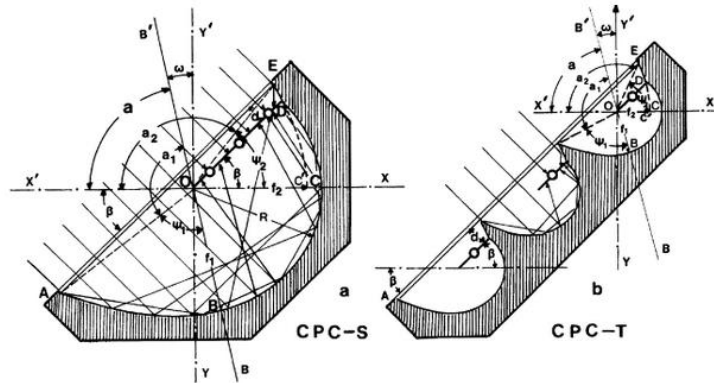


Figura 1.18. Sección transversal y parámetros geométricos de los colectores solares CPC estudiados. (a) colector CPC con una unidad absorbadora (modelo CPC-S); (b) colector CPC con tres unidades absorbadoras (modelo CPC-T) [42]

En el 2008, Kim et al. [43] presentaron un trabajo en donde se enfocaron en mejorar el rendimiento térmico de un sistema de media temperatura CPC al vacío con absorbedor cilíndrico. En este trabajo desarrollaron un modelo matemático y fue validado con mediciones experimentales, haciendo una comparación entre un sistema estacionario y uno de seguimiento. El sistema de seguimiento obtuvo un incremento en la eficiencia de un 14.94% debido al ajuste que hace este para estar alineado con el sol. Sin embargo, el tener este sistema de seguimiento lo hace económicamente inviable.

En el 2011 Souliotis et al. presentaron un colector solar integrado combinado con un colector asimétrico CPC (Figura 1.19). Los resultados experimentales mostraron que el colector solar integrado es tan eficaz durante la operación diaria como durante la noche [44] derivado a que por su material aislante permite mantener la temperatura del agua incluso si no hay la presencia del sol.

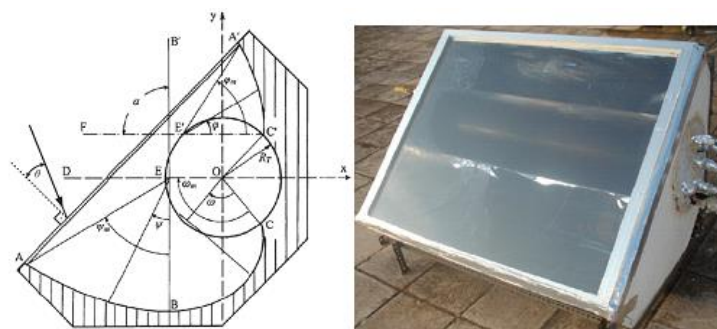


Figura 1.19. Colector solar integrado combinado con CPC [44].

En el 2012 Pei et al. reportaron un sistema experimental de calentador de agua solar tipo CPC con una tubería en forma de U, y se evaluó su rendimiento en cada una de las distintas

temperaturas significativas. Los experimentos se llevaron a cabo en diciembre en Hefei (31°53' N, 117°15' E), en la región oriental de China. Los resultados del estudio experimental y del análisis exergético del sistema del calentador solar, de los cinco experimentos realizados, mostraron una eficiencia térmica superior al 49% (alcanzando una temperatura del agua de 95 °C) y una eficiencia exergética superior al 4.62% en el tanque [45].

En el 2014 Gu et al. propusieron un nuevo colector solar térmico para proporcionar calor de reacciones químicas endotérmicas. Este diseño de colector puede convertir más del 78% de la radiación solar incidente en calor con una relación de concentración de 1.75, lo que permite una alta eficiencia solar en reacciones químicas. Este estudio establece los modelos ópticos y térmicos necesarios para predecir el desempeño de este tipo de colector. Los resultados muestran que el colector se estanca a muy altas temperaturas (hasta 600 °C) y puede proporcionar calor solar en la forma de un pequeño colector para una variedad de aplicaciones portátiles, como por ejemplo, reformar metanol que requiere temperaturas de alrededor de 250 °C [46] (Figura 1.20).

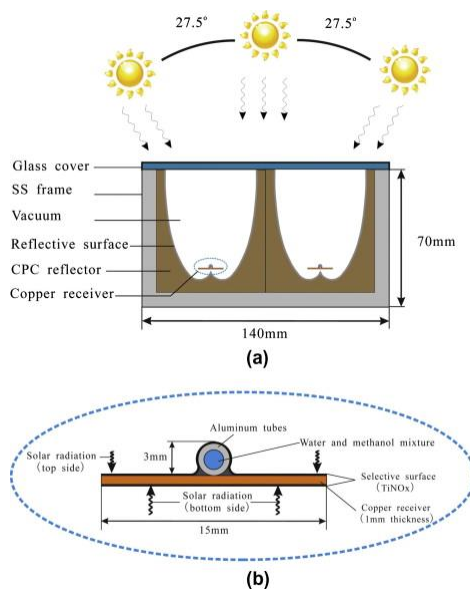


Figura 1.20. Sistema de CPC al vacío: (a) sección transversal del colector; (b) un acercamiento al tubo receptor de cobre con aleta [46].

Hoigebazar y Valder [47] fabricaron en el 2020 un CPC para recolectar energía para una cocina solar tipo caja, e implementaron dos configuraciones de CPC, una con un área de apertura de 0.43 m² y con un medio ángulo de aceptación de 30° sin truncar, y la otra con un área de apertura de 0.38 m² con un medio ángulo de aceptación de 45° truncada, arrojando como resultado que

el primer CPC fue más eficiente debido a una mayor área de apertura, más área de superficies reflectantes y, por lo tanto, una mejor concentración.

Xia y Chen [48] en el 2020 presentaron un trabajo en donde se implementó en la parte posterior del tubo de vacío solar un mini concentrador parabólico compuesto (mini-CPC). Las características térmicas del sistema presentado se analizaron teórica y experimentalmente. Se estableció un modelo matemático de transferencia de calor para el sistema de acuerdo con la conservación de energía, y se resolvió mediante cálculo iterativo basado en el lenguaje de programación C desarrollado por ellos. El resultado experimental reveló que la eficiencia térmica del sistema propuesto aumenta entre 24.3% y 29.2% en comparación con un sistema de tubo de vacío sin el mini CPC, considerando diversas condiciones climáticas.

En el 2021, Carrillo et. al [49] desarrollaron una metodología económica y de precisión para la fabricación de un CPC, debido a la complejidad de curvar y mantener el perfil de CPC en su lugar, así como la inexistencia de moldes estandarizados. Para la validación de la metodología, se implementó un análisis de fotogrametría. Los resultados del análisis óptico mostraron que con esta técnica se logra un alto grado de precisión y homogeneidad en la forma de la superficie reflejante del CPC.

1.4.3. Evaluación mediante simulaciones de CPC.

En el 2004 Grass et al. presentaron un prototipo de CPC que consistía en un tubo-colector al vacío con seguimiento, con un espejo concentrador de tipo cubeta. Ellos realizaron simulaciones de trazado de rayos con un ángulo de aceptación de aproximadamente 5.7° con una relación de concentración geométrica de 3.2. Ellos mostraron que las pérdidas de los colectores de tubos al vacío están dominadas por las pérdidas de radiación del absorbedor [50].

Alizadehdakhel et al. modelaron en el 2010 un flujo de dos fases (gas/líquido) y los fenómenos simultáneos de evaporación y condensación en un termosifón. En dicho trabajo utilizaron la técnica de volumen de fluido (VOF) para modelar la interacción entre estas fases y CFD para las fases. Al comparar los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente, se observaron muchas similitudes (Figura 21) [51], por lo que su modelo fue validado experimentalmente y usado para explicar el flujo y la transferencia de calor en el termosifón.

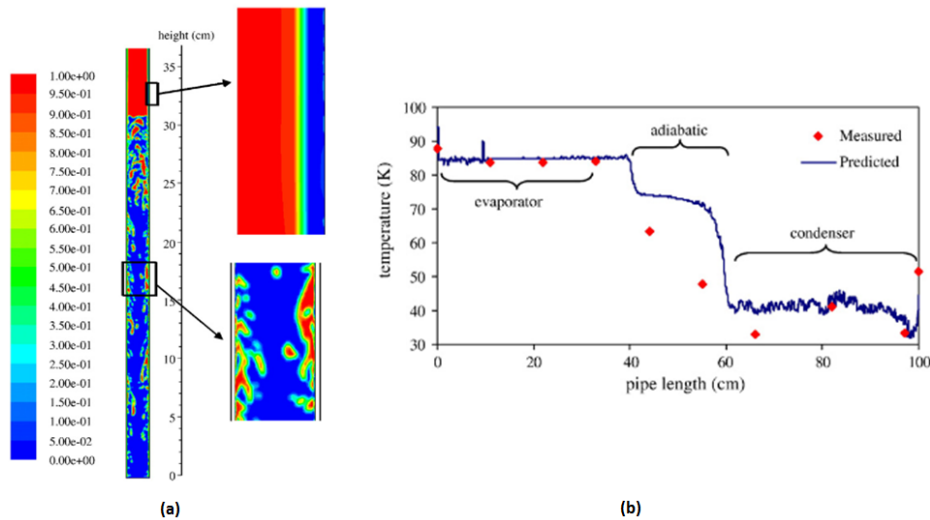


Figura 1.21. (a) Gráficos de contorno de la fracción de volumen de vapor en la sección del evaporador; (b) Comparación entre los datos medidos y los simulados [51].

En el 2013 Chaabane et al. [52] presentaron un trabajo donde buscaron mejorar los resultados obtenidos en el trabajo de Chaouachi y Gabsi (2006), equipando el tanque de almacenamiento con aletas radiales de perfil rectangular. El análisis se realizó numéricamente usando CFD en el software Fluent. Se determinó que el calentador basado en el tanque de almacenamiento mejorado tuvo una temperatura del agua más alta y un coeficiente de pérdidas térmicas reducido durante el período diurno. Sin embargo, durante la noche, los resultados sugieren que este sistema presenta mayores pérdidas térmicas.

En el 2014 Tijani y Roslan mostraron un trabajo donde describieron las pérdidas de calor (radiación y convección) asociadas con el elemento de recolección de calor (HCE) de un Colector Solar Parabólico (PTC), y el efecto de diferentes velocidades del viento y el caudal másico del fluido de transferencia de calor (HTF) sobre las pérdidas térmicas. Esto lo hicieron por medio de un análisis de CFD. Se observó una temperatura favorablemente baja en la envolvente de vidrio en comparación con la temperatura del absorbedor. La convección y la pérdida de calor de radiación al entorno se calculó por medio de la temperatura resultante de la envolvente de vidrio del modelo [53].

En otro estudio Benrejeb et al. (2015) buscaron aumentar la cantidad de energía absorbida y mejorar las prestaciones ópticas y térmicas de un sistema de calentamiento de agua, presentando un nuevo diseño de un calentador con colector de almacenamiento integrado (ICS, por sus siglas en inglés Integrated Collector Storage) combinado con un CPC. En este estudio se desarrolló un

modelo de trazado de rayos para simular la reflexión de la radiación solar sobre los reflectores del CPC en diferentes ángulos de incidencia y fue calculada la distribución de radiación solar absorbida sobre la superficie del absorbedor. Los resultados obtenidos, comparados con un antiguo modelo experimental, mostraron una mejora significativa en la eficiencia óptica, la distribución de la energía absorbida en cuanto al ángulo de incidencia y el nivel de temperatura requerido.

En 2015 Gajic et al., realizaron un modelado de las pérdidas por reflexión de un colector CPC con una línea focal en un tubo de vacío, utilizando una simulación de trazado de rayos con el software LightTools (ver Figura 1.22). En este trabajo ellos utilizaron varios ángulos de incidencia en los planos longitudinal y transversal, con lo que se encontró que longitudinalmente la forma del CPC no contribuyó a la pérdida de reflexión y en el plano transversal la pérdida de reflexión fue aproximadamente constante hasta que se aproximó el ángulo de aceptación [54].

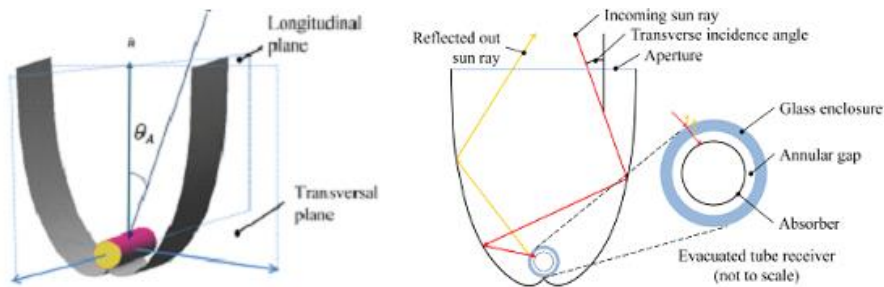


Figura 1.22. Diseño de un CPC en LightTools [54]

De igual manera en el 2015 Yurchenko et al. presentaron diversas simulaciones de trazado de rayos para la optimización de CPCs. Por medio de sus resultados de las simulaciones para un CPC con un absorbedor en forma de V, propusieron una gama de valores óptimos para el ángulo del vértice del absorbedor en forma de V para un colector CPC de diseño típico [55] (Figura 1.23).

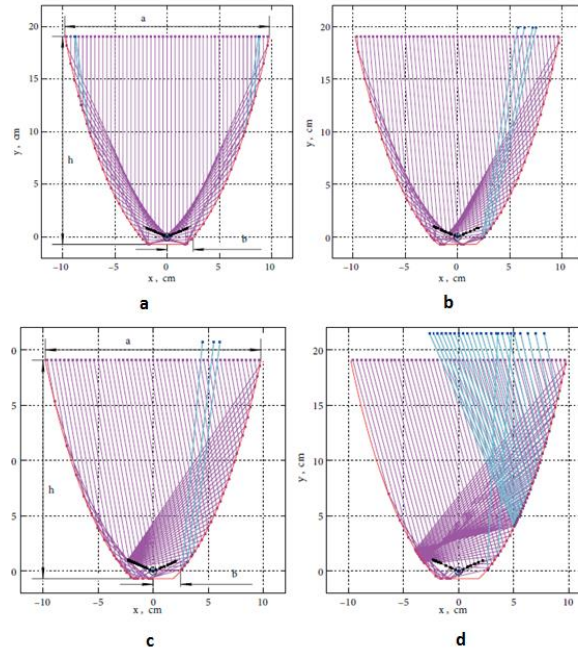


Figura 1.23. Trazado de rayos de un CPC con absorbedores en "V" con ángulos de incidencia de (a) 0° , (b) 5° , (c) 10° y (d) 15° . Las características del CPC son $h = 20$ cm, $a = 19,6$ cm, $b = 2,5$ cm, $w = 5$ cm, $h_b = 0,7$ cm, $x_t = 2,3$ cm, $y_t = 1,0$ cm y $\theta_m = 9$ grados [55].

Bellos et al. (2016), realizaron una simulación de CFD por medio de Solidworks, en donde analizaron los parámetros térmicos y ópticos del sistema de colector solar parabólico, optimizando la geometría del colector, así como variando los ángulos tanto longitudinal como transversal, para determinar las pérdidas de calor en cada caso. Ellos obtuvieron que el ancho de apertura para optimizar el sistema fue de 300 mm con un foco de 50 mm de distancia y con diámetro de 34 mm; la simulación también arrojó que si se modifica el ángulo transversal esto provoca que la eficiencia óptica del colector se vea reducida significativamente. El diseño del colector se muestra en la Figura 1.24 [56].

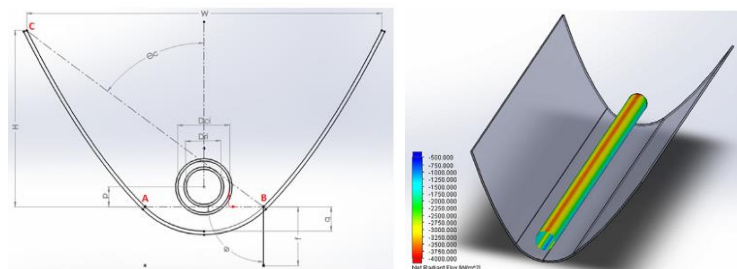


Figura 1.24. Diseño en Solidworks de un CPC y estudio de CFD [56].

En el 2016 Waghmare y Gulhane realizaron un análisis por medio del trazado de rayos de un CPC, para determinar el diámetro limitante (LD) del receptor tubular en el foco del CPC. También

determinaron la relación geométrica entre LD y el diámetro máximo [57], como se muestra en la Figura 1.25.

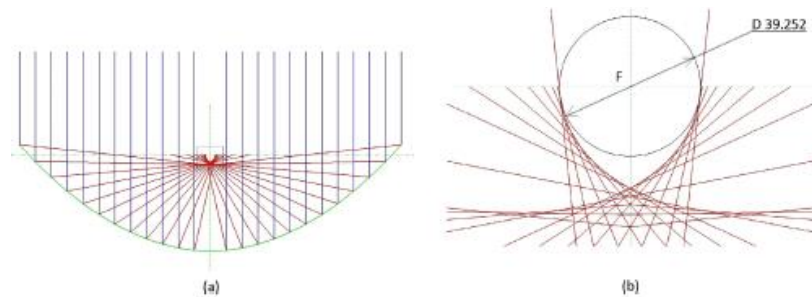


Figura 1.25. Trazado de Rayos (a) Sin receptor (b) Con receptor tubular

Antonelli et al. (2016) propusieron una metodología para estimar las pérdidas de calor térmico dentro de los colectores CPC. En ese estudio se llevaron a cabo varias simulaciones CFD (por sus siglas en inglés Computational Fluids Dynamic) en diferentes tipos de CPC, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo efectivas y la presencia de transferencia de calor radiactivo, así como la ausencia de paredes adiabáticas. El modelo de CFD fue validado considerando un trabajo previo descrito en la literatura [16].

En el 2017 Gong y Ding [58] presentaron un estudio sobre la importancia de calcular la energía útil diaria, para determinar el coeficiente de rendimiento térmico de un calentador de agua doméstico. Ellos realizaron una simulación numérica CFD en el programa Fluent. Las simulaciones numéricas solo tomaron en cuenta los efectos de la radiación solar y propusieron utilizar otros factores para trabajos a futuro.

Gunjo et al. (2017) evaluaron el rendimiento de sistemas de calefacción de agua solar de bucle abierto y bucle cerrado, mediante la realización de experimentos y utilizando el análisis computacional CFD tridimensional (Figura 1.26) para predecir la temperatura de la salida de agua y de la placa absorbente del calentador de agua solar y fue validado con los experimentos. Al comparar la simulación con los datos experimentales se reveló que el modelo podría predecir las temperaturas del agua de salida y de la placa absorbente dentro de un error relativo máximo de 5.4% y 2%, respectivamente [59].

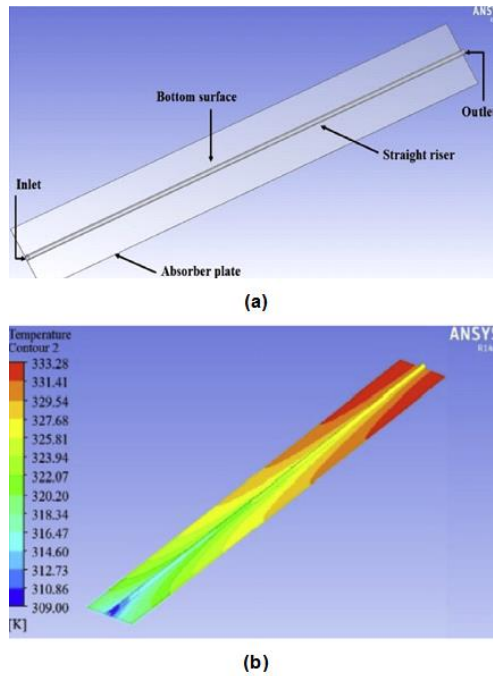


Figura 1.26. (a) Modelo 3D del receptor aletado; (b) Simulación del flujo térmico del Sistema [59].

En el 2017 Su et al. [60] presentaron un modelado por trazado de rayos aplicado a un sistema CPC. Los resultados fueron comparados entre su modelo y el arrojado por un programa comercial. Dicho modelo fue aplicado para el análisis de eficiencia térmica. El absorbedor era de un diámetro de 0.028 m con un medio ángulo de aceptación de 45° , donde de acuerdo con los resultados numéricos de eficiencia térmica en comparación a los medidos, el modelo desarrollado tuvo un error promedio de 5% en comparación de lo obtenido por el programa comercial (ver Figura 1.27).

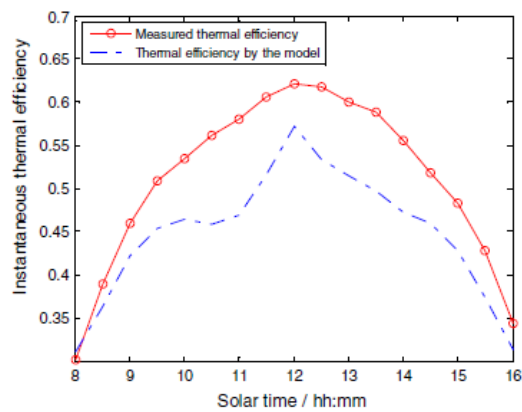


Figura 1.27. Gráfica comparativa entre el prototipo experimental y el resultado arrojado por la simulación [60].

En el 2018 Terrón et al. [61] presentaron un estudio de simulación de un CPC utilizando un análisis de trazado de rayos (ver Figura 28). Esta técnica permitió observar la interacción entre los rayos solares y el concentrador solar con la finalidad de cuantificar la cantidad de energía que incidía en el receptor en un momento determinado. Los resultados mostraron que para 21° , el CPC propuesto funcionó satisfactoriamente para las coordenadas de $20^\circ 58' N$ $89^\circ 37' O$. También encontraron que al realizar los ajustes angulares para las diferentes estaciones del año, la disponibilidad total de energía aumentó en un 22%, lo que resultó en una opción más eficiente.

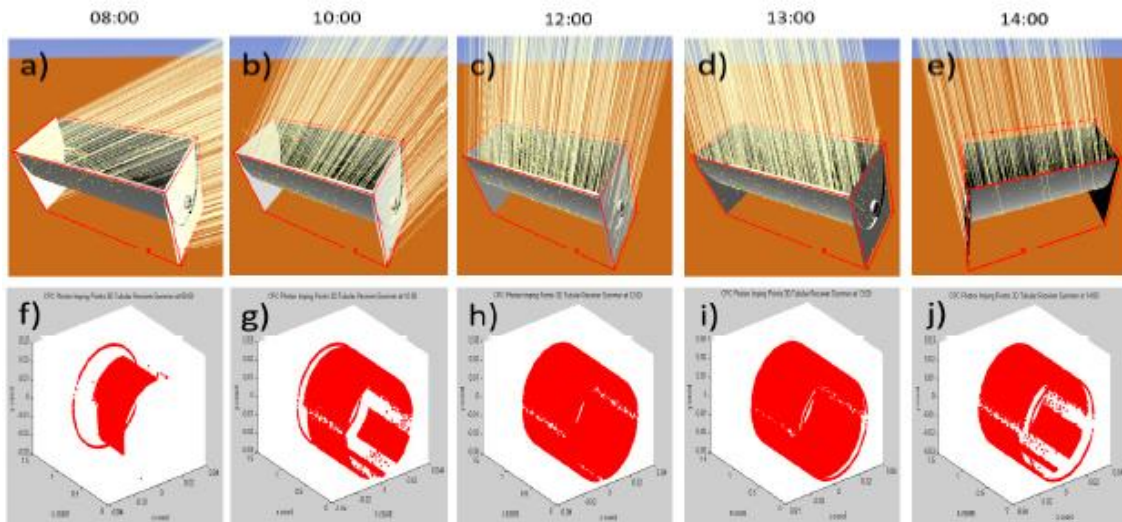


Figura 1.28. Evolución del sombreado (a - e) y mapeo de impacto de fotones (f-j) en el receptor para el solsticio de verano de 8 a 14 horas [61].

En el 2020 Yuan et al. [62] publicaron un trabajo donde el objetivo fue investigar el rendimiento térmico de dos colectores solares CPC de 15.4 m^2 , tanto de forma teórica como experimental. Los dos colectores fueron idénticos excepto que uno fue equipado con una lámina transparente de etileno tetrafluoroetileno (ETFE) y el otro colector no. Ellos usaron la herramienta numérica Tonatiuh para el análisis de trazado de rayos y un modelo CFD el cual predijo satisfactoriamente la temperatura de los colectores en el rango de temperatura entre 20°C y 81°C . Las desviaciones entre los aumentos de temperatura medidos y calculados se limitaron a $\pm 0.3 \text{ K}$ con un error relativo inferior al 3.7%.

Akhter et al. (2020) [63], presentaron un nuevo concepto de concentración variable de radiación solar a lo largo de la longitud de un receptor de tubo de vacío acoplado con un CPC modificado con semiángulos de aceptación de 52.5° y 38.5° en los lados de entrada y salida, respectivamente. El análisis de trazado de rayos de Monte Carlo confirmó un aumento gradual

de la densidad de potencia a lo largo de la longitud del receptor del CPC modificado. Los resultados experimentales demostraron un gradiente de temperatura aproximadamente un 15% más alto en comparación con el CPC con una relación de concentración fija, así como una mejora en el flujo de termosifón monofásico en un 17%.

Carlini et al. [64] publicaron en el 2020 un trabajo donde presentaron un análisis de transferencia de calor realizado con el uso del software COMSOL Multiphysics aplicado a un sistema CPC con celdas solares. Los experimentos se realizaron para un sistema prototipo de CPC truncado con un semi-ángulo de aceptación de 60° y un coeficiente de parábola de 4 m^{-1} . Los resultados mostraron una discrepancia entre los datos experimentales y las simulaciones lo que llevó a validar los escenarios considerando la temperatura promedio en las celdas solares. Se observó que la geometría óptima para la mayor potencia y eficiencia de todo el sistema se alcanzó con un semi-ángulo de aceptación y coeficiente de parábola menores a los originalmente propuestos.

Los programas de cómputo para el modelado de calentadores solares, se han vuelto una herramienta de gran ayuda para lograr las mejoras de diseño y dimensionamiento de estos, evitando pérdidas económicas en métodos de prueba y error que se empleaban anteriormente. De acuerdo con la revisión bibliográfica anterior la gran mayoría de estos prototipos son diseños o modelos para aplicaciones químicas o industriales, donde se busca optimizar sistemas de alta temperatura, pero no existen modelos para CPCs de tamaño reducido y bajo costo para sistemas domésticos.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se desarrollará una metodología que abarca un análisis de trazado de rayos, mediante el uso del software Tonatiuh, para determinar la concentración de energía que incide en el receptor. Posterior a eso, el trabajo está enfocado al análisis numérico FEM de transferencia de calor y un análisis CFD para el agua con ayuda del programa de elemento finito Abaqus para el modelado del prototipo de un receptor aletado para ser implementado en un calentador solar CPC para casa habitación, evaluando distintos tipos de aletas en el receptor para optimizar la captación solar y temperaturas del agua en la salida del receptor. Las mediciones obtenidas del monitoreo del CPC experimental de referencia se usaron para declarar las condiciones iniciales del modelo FEM que permitirá determinar los parámetros de optimización del prototipo y con ello establecer una metodología para el modelado de distintas geometrías. Se pretende obtener una CPC compacto y económico que satisfaga la demanda de agua caliente para uso residencial, en un escenario climático de la Península de Yucatán.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Una de las metas que tiene este proyecto es la contribución tecnológica que ayude a satisfacer las necesidades energéticas para el calentamiento de agua en viviendas en México, por medio de la aportación de conocimiento que ayude a la generación de un calentador de agua solar, que sea sustentable, compacto y de bajo costo, para poder así mejorar la calidad de vida en la población del país.

El desarrollar ciencia aplicada, para solucionar problemas que afectan al país y reducir la dependencia tecnológica extranjera, garantiza resultados óptimos y específicos. Esto debido a que en su gran mayoría las tecnologías provenientes del extranjero para el calentamiento de agua usando energía solar resultan, ineficaces y contraproducentes en ciertos climas del país, además de que son de alto costo de adquisición y mantenimiento, y por consecuencia inalcanzables para ciertos sectores de la sociedad.

En la actualidad en el estado de Yucatán, los sistemas de calentadores solares de mayor demanda son los de tubos de vacío, sin embargo, la eficiencia de estos depende del área de captación que tengan, lo que en algunos casos es una limitante para el usuario. Otra limitante es la fragilidad de sus elementos. Al ser tubos de vidrio, tienden a ser propensos a fisuras por las condiciones climáticas de la región, por lo que implica un incremento en el costo de mantenimiento del sistema, y por lo tanto no se puede considerar un sistema óptimo ni económico.

La aplicación de simulaciones computacionales por medio del método de los elementos finitos FEM acoplado con una simulación de fluidos CFD permitirá determinar los parámetros para la optimización de los modelos propuestos mediante el análisis numérico, ahorrando tiempo y dinero en su manufactura. Este tipo de herramientas es utilizada ampliamente para resolver problemas estructurales, de fluidos y multi-físicos [65].

El presente trabajo se enfocará en optimizar y desarrollar un nuevo diseño de un colector solar CPC, partiendo de un sistema ya estudiado; implementando aletas en el receptor central para incrementar el área de captación y reducir el dimensionamiento del sistema. Se utilizará como herramientas de trabajo el software de trazado de rayos Tonatiuh y el software de FEM y CFD Abaqus. Este estudio nos permite identificar un sistema con una buena relación costo/beneficio

de baja temperatura para uso residencial, que pueda aprovechar una mayor cantidad de energía solar y al mismo tiempo ser compacto. Esto ayudaría a simplificar aún más el sistema de CPC actual, así como reducir los costos de fabricación y adquisición de estos, pudiendo de esta forma tener el potencial de llegar a más usuarios.

1.6. HIPOTESIS

La implementación de una metodología teórico-experimental de un colector parabólico compuesto (CPC) compacto con receptor aletado, permitirá encontrar puntos de optimización que ayuden a obtener un incremento en la cantidad de energía solar captada por el colector, que conlleve a un incremento en la energía térmica que es transmitida al fluido, y por lo tanto un mayor volumen de agua caliente en menos tiempo. Esta metodología podrá ser implementada para la predicción de la eficiencia en nuevos prototipos para aplicaciones de uso residencial.

1.7. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología teórico-experimental para diseñar un concentrador parabólico compuesto (CPC) considerando los parámetros geométricos que afectan la eficiencia térmica en un concentrador de uso residencial en una zona cálida-subhúmeda, y proponer dos variantes de receptor con aletas.

1.7.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Implementar una instrumentación en los colectores CPC experimentales con y sin aletas para la recolección de datos de parámetros físicos y medición de su eficiencia.
- Realizar el análisis óptico de un colector CPC mediante el análisis numérico de trazado de rayos.
- Realizar un análisis óptico por medio de una simulación trazado de rayos de colectores CPC con y sin aletas.
- Realizar una simulación acoplada FEM-CFD de los colectores con y sin aletas para evaluar el incremento de temperatura en el fluido y la eficiencia térmica de los diferentes sistemas propuestos.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

Un concentrador parabólico compuesto (CPC), es diseñado con base en los principios de reflexión de rayos y longitud óptica idéntica; este colector tiene las ventajas de ser simple en estructura y al contar con una superficie reflejante con un ángulo de apertura adecuado la radiación solar entre las 8:00 a las 17:00 horas es captada y direccionada al punto focal del colector, y por lo tanto, no necesita un sistema de seguimiento solar continuo [66]. Con esto se aprovecha la radiación directa del sol en cualquier época del año. Cuando el CPC está adecuadamente orientado, los rayos solares se reflejan en la superficie parabólica e inciden en una línea que corresponde al foco de la sección transversal del canal parabólico. En esta línea focal, está colocado un receptor normalmente cilíndrico o plano, donde la radiación es absorbida y trasformada en energía térmica [67].

Para el caso del perfil del concentrador se emplea el principio del “rayo límite”, donde se menciona que todos los rayos que entren con el semiángulo máximo de aceptación θ_c deben ser tangentes al círculo exterior del receptor después de una reflexión [68, 69]. Como puede apreciarse en la Figura 2.1 , si se recibe un rayo en un punto P, este se refleja en la parábola e intercepta el mismo punto focal tangente al receptor.

La orientación de un colector CPC está relacionada con su ángulo de aceptación ($2\theta_c$ en la Figura 2.1), el cual permite determinar si el colector será estacionario o de seguimiento. Un concentrador CPC puede orientarse con su eje longitudinal a lo largo de la dirección norte-sur o este-oeste y su abertura se inclina directamente hacia el ecuador en un ángulo igual a la latitud local [19].

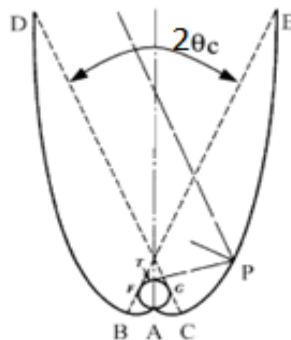


Figura 2.1. Diagrama esquemático de un CPC [19].

Las ecuaciones que se utilizaron para obtener el perfil del concentrador del estudio previo de Terrón [70], fueron las descritas por Eduardo Rincón [71, 72]. Como se mencionó en el apartado de antecedentes, el perfil se compone de dos partes (copa e involuta) cuyas ecuaciones y sus límites para el diseño del perfil son:

Para la involuta:

$$x_t = r(\cos \theta + \theta \sin \theta) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$y_t = r(\sin \theta + \theta \cos \theta) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

con límites de $\left[-\frac{\pi}{2} - \theta_a \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a\right]$

Para la copa:

$$x = \left(\frac{\sin \theta_a * \cos(\theta - \theta_a) - \frac{\pi}{2} + \theta_a + \theta * \cos \theta}{1 + \sin(\theta - \theta_a)} + \cos \theta_a \right) * r \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$y = \left(\frac{\cos \theta_a * \cos(\theta - \theta_a) + \sin \theta_a * \frac{\pi}{2} + \theta_a + \theta}{1 + \sin(\theta - \theta_a)} - \sin \theta_a \right) * r \quad \text{Ecuación 2.4}$$

entre los límites de $\left[-\pi - \theta_a \leq \theta \leq -\frac{\pi}{2} - \theta_a\right] \left[\frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \theta \leq \pi + \theta_a\right]$

donde (x_t, y_t) y (x, y) son las coordenadas cartesianas de un punto de truncamiento y P respectivamente, θ es el ángulo de incidencia del colector, θ_a es el medio ángulo de aceptación del CPC y r es el radio del receptor tubular, de acuerdo a los criterios expuestos por Rincón et al. [72], y que se presentan en el diagrama de la Figura 2.2.

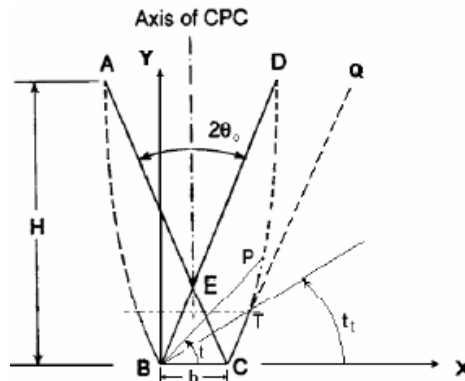


Figura 2.2. Truncamiento de un CPC según el criterio de Rincón [72].

2.1. Transferencia de calor

Cuando hay un gradiente de temperatura dentro de un sistema, o cuando dos sistemas a diferentes temperaturas se ponen en contacto, se genera el fenómeno de transferencia de energía. Este proceso por el cual el transporte de energía tiene lugar es conocido como transferencia de calor [73]. Existen 3 tipos de transferencia de calor:

- Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, pudiendo ser un sólido o un líquido; a este tipo de transferencia de calor en el medio se le conoce como conducción.
- Convección se le conoce a la transferencia que ocurre en un fluido en movimiento, cuando existe diferencia de temperaturas en el espacio que ocupa, generando un flujo constante en busca de una homogeneidad en el volumen compartido.
- Y por último se tiene a la transferencia de calor por radiación térmica. Esto se da debido a que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, y por lo tanto, al no existir algún medio, esta transferencia se produce por medio de la radiación de una superficie a otra [74].

2.1.1. Conducción

Conducción calorífica es el mecanismo de intercambio de energía interna de un cuerpo, o parte de él, a otro, debido al intercambio de energía cinética que se genera del movimiento de las moléculas por comunicación directa o por el flujo de electrones libres, cuando se refiere a los metales [75]. El calor fluirá desde la región de mayor temperatura a la de menor temperatura (ver Figura 2.3).

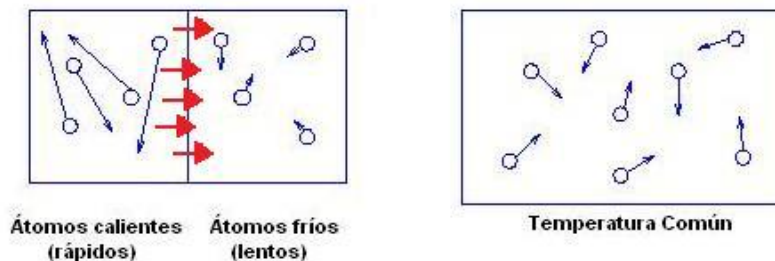


Figura 2.3. Comportamiento de los átomos durante el mecanismo de conducción [75]

La velocidad a la que se transfiere calor por conducción (q_k) es proporcional al gradiente de temperatura (dT/dx) por el área, A , a través de la cual el calor se transfiere (Ecuación 11). La

situación es muy similar en los líquidos, aunque en estos las moléculas están menos esparcidas y las interacciones son más fuertes y frecuentes [74].

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En esta relación, T es la temperatura local y x es la distancia en la dirección del flujo de calor. La tasa real de flujo de calor depende de la conductividad térmica k , que es una propiedad física del medio [73]. Para la conducción la tasa de transferencia de calor a través de un medio homogéneo es:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

2.1.2. Convección

Se puede definir como convección al mecanismo de transmisión de calor que existe en un fluido debido al transporte de energía térmica como consecuencia de los movimientos. Se dice que puede existir tanto una convección natural o libre que es cuando el movimiento del fluido no es propiciado por una agitación mecánica, y la convección forzada que es donde si existe tal agitación [76].

Sin importar el origen del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación que representa este fenómeno es:

$$q^n = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde q^n es el flujo de calor por convección (W/m^2), y es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie T_s y la temperatura del fluido T_∞ . A esta expresión se le conoce como la ley de enfriamiento de Newton y la constante de proporcionalidad $h(W/m^2 \cdot K)$ es el coeficiente de transferencia de calor por convección [74].

2.1.3. Radiación

Se define como la radiación electromagnética emitida por la superficie de un cuerpo excitado térmicamente. Esta se emite en todas direcciones y cuando incide sobre otro cuerpo, parte de esta radiación puede ser reflejada, transmitida o absorbida [74]. El mecanismo de emisión se

relaciona con la energía liberada por la oscilación de electrones que constituyen la materia del cuerpo.

La radiación de un cuerpo se define como la energía radiante emitida (E) por unidad de área (A) por unidad de tiempo (τ), es decir, la potencia por unidad de área, y sus unidades son en W/m^2 .

$$R = \frac{E}{\tau A} = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que no es necesario un medio físico para que exista el intercambio de calor entre ambos cuerpos. La energía proveniente del sol es un claro ejemplo de este tipo de transferencia de calor.

2.2. Propiedades físicas de los materiales

2.2.1. Absorbancia

Una parte importante de los sistemas de calentadores solares es el buen diseño de su colector, y para esto es importante saber que materiales utilizar para su construcción. Una propiedad importante es la absorbancia del material. La absorbancia es una medida de la capacidad del cuerpo para absorber o emitir radiación térmica y se mide por medio de un espectrofotómetro [77]. Dicha cantidad es adimensional y tiene un valor numérico comprendido entre 0 y 1 [78]. Esta propiedad está fuertemente ligada a la transmitancia, ya que un cuerpo con una absorbancia muy alta tiene una transmitancia baja y viceversa [79]. La ecuación para calcularla es:

$$A = \ln\left(\frac{I}{I_{out}}\right) = -\ln(T) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

donde A es la absorbancia, I es la irradiación incidente, I_{out} es la irradiación de salida y T es la transmitancia del material.

El material se considera eficiente cuando tiene la capacidad de absorber la mayor cantidad posible de energía solar y transferir esta energía al fluido de trabajo en forma de calor. El cobre, el aluminio y el acero llevan a cabo estas funciones muy bien y se usan comúnmente para construir absorbedores en sistemas de colectores planos.

2.2.2. Reflectancia

La reflectancia es la proporción de la radiación reflejada desde una superficie. La reflectividad ρ es la propiedad de reflejar la radiación, post-evaluada por todos los materiales en diferentes grados, también llamada albedo en referencia a la atmósfera [10]. ρ_{\perp} y ρ_{\parallel} se definen como la reflectividad perpendicular y paralela respectivamente. En la práctica se encuentran en función de θ_i el ángulo de incidencia y λ la longitud de onda. La reflexión especular se sujeta de igual forma a la ley de Fresnel; puede determinarse por la siguiente ecuación [70]:

$$\rho(\theta_i, \lambda) = \frac{(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})}{2} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

2.3. Eficiencia térmica de un CPC

Un parámetro que se debe considerar y que indicará el aprovechamiento de la energía solar de un colector, es la eficiencia térmica. Este factor es la capacidad de transformar la energía solar en calor, y dependerá del material utilizado para su construcción, desde la cubierta, el concentrador, el tipo de aislante, así como su diseño y las condiciones ambientales [70, 80].

La eficiencia térmica η de un CPC es definida como el cociente de la energía útil capturada o ganada, con la radiación incidente en el plano de apertura [80];

$$\eta = \frac{Q_u}{A_s \cdot I} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

η = eficiencia térmica del colector.

Q_u = calor útil.

A_s = área de apertura del colector (m^2).

I = radiación solar absorbida en el plano de apertura (W/m^2).

El calor útil que se extrae en forma de calor por el fluido internamente en un tubo receptor, se obtiene de la siguiente forma:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde \dot{m} es el caudal másico, C_p es la capacidad calorífica específica, T_o es la temperatura de salida del fluido de trabajo y T_i es la temperatura de entrada del fluido.

De esta forma la Ecuación 2.11 se interpreta como:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{A_S I} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Para evaluaciones experimentales del comportamiento de colectores y para la optimización de diseños, se emplea la conocida ecuación de Hottel-Whillier-Bliss para obtener la ganancia de energía instantánea:

$$Q_u = F_R A_S [I(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad \text{Ecuación 2.14}$$

donde Q_u calor útil necesario para calentar el agua (W), F_R es el factor de remoción de calor; I la irradiancia solar incidente en el receptor (W/m^2) τ es la transmitancia de la cubierta, α es la absorbancia, U_L es el coeficiente global de transferencia de calor ($W/^\circ C m^2$), T_i es la temperatura de entrada del agua del calentador solar, T_a es la temperatura ambiente y A_S es el área de apertura del receptor. La Ecuación 19 se sustituye en la Ecuación 2.11, y se obtiene:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \quad \text{Ecuación 2.15}$$

2.4. Balance de Energía en el calentador solar

El balance de energía tiene como objetivo determinar el calor útil transmitido al agua para establecer la eficiencia de un calentador solar. El calor útil $q_{\text{útil}}$, empleado para calentar el agua del depósito de almacenamiento, es una parte de la radiación global incidente sobre el colector solar $H_T A_e$; la otra parte es calor disipado al ambiente: i) por el colector solar q_{cs} ; ii) por el depósito de almacenamiento q_{da} y, iii) por las conexiones q_{cx} . En la Figura 2.4 se muestra un diagrama del balance de energía [81].

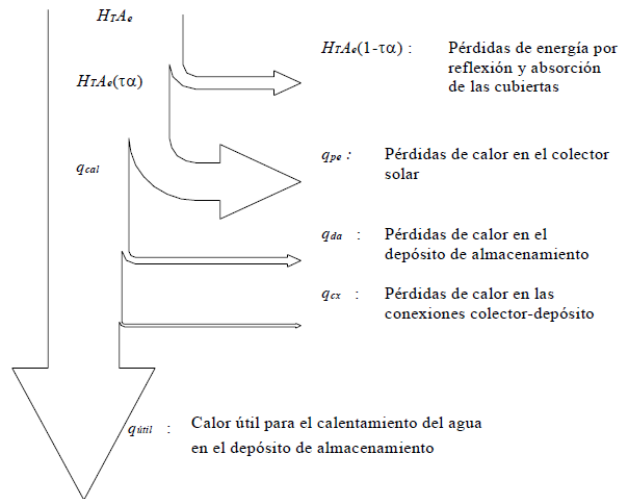


Figura 2.4. Diagrama de balance de energía en un calentador solar [81].

2.5. Trazado de rayos

El desarrollo de tecnologías de Concentración Termo Solar, requiere herramientas adecuadas para diseñar, analizar y optimizar sistemas ópticos. Para ello se han desarrollado varias herramientas de software utilizando técnicas de convolución o trazado de rayos [82].

El análisis por trazado de rayos, es una herramienta óptica utilizada para superficies refractarías y reflejantes, evaluando el rendimiento óptico de un concentrador con el fin de determinar la distribución e intensidad de los rayos solares en el receptor [62].

La herramienta computacional que se utilizó en este trabajo fue el software de código libre Tonatiuh, el cual se basa en el algoritmo computacional de Monte Carlo, utilizando los principios de la óptica geométrica. Así también implementa un método estadístico para complementar el análisis. Para lograr obtener un comportamiento de un sistema solar de concentración, el baño de rayos solares se genera desde una fuente simulada y permite observar las interacciones entre los rayos y las superficies del sistema donde estos inciden.

El software adopta la ley de Fresnel, ya que asume que la trayectoria de los rayos es igual al ángulo de incidencia y la reflexión de estos es especular. Por lo tanto, la reflectancia espectral depende del índice de refracción del material a utilizar en la simulación.

La importancia del uso de este tipo de software es que tiene la capacidad de determinar la distribución del flujo de energía en la superficie a estudiar, en nuestro caso del receptor, lo que nos ofrece una idea de cómo se puede dar la transferencia de calor al fluido, al complementarlo

con el uso de herramientas que utilicen simulaciones FEM mostrando la distribución de la temperatura en el receptor y la energía final absorbida por el fluido de trabajo. En la Figura 2.5 se puede observar una simulación realizada por medio del software Tonatiuh, donde se aprecia el baño de rayos solares que inciden en un colector CPC. Además, se puede observar con detalle los rayos solares que son redireccionados hacia el receptor a través de las paredes reflejantes del colector.

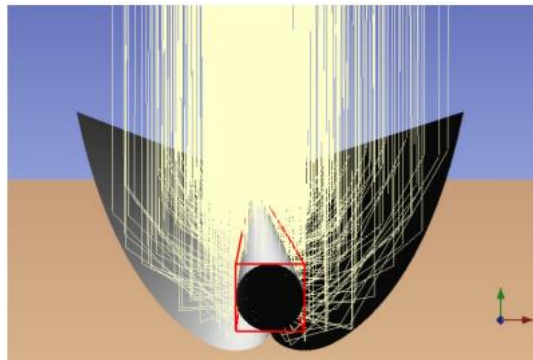


Figura 2.5. Simulación numérica de trazado de rayos de un CPC en el software Tonatiuh [83]

2.6. Método del elemento finito

El método del elemento finito (FEM) se utiliza ampliamente para resolver problemas estructurales, fluidos y multi-físicos numéricamente. Este método se utiliza ampliamente porque ingenieros y científicos pueden modelar y resolver numéricamente problemas muy complejos [65].

En este tipo de método, una región compleja se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos [84]. De esta manera en el dominio de un problema dado, se utiliza una aproximación simple de variables desconocidas para transformar ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas. El método FEM se basa en las siguientes tres disciplinas:

- Ciencias de la ingeniería para describir leyes físicas (ecuaciones diferenciales parciales);
- Métodos numéricos para la elaboración y solución de ecuaciones algebraicas;
- Herramientas informáticas para llevar a cabo eficientemente los cálculos necesarios utilizando una computadora [85].

Se pueden encontrar diversos programas de uso general, tales como IDEAS, SAMCEF, NASTRAN, ABAQUS, FIDAP, MARC, ANSYS, ADINA, LSDYNA, ASTER y CASTEM, por mencionar algunos.

Para que el método FEM sea eficaz en aplicaciones industriales, se deben utilizar códigos de computadora para la preparación de datos y la interpretación de resultados. Estas herramientas de pre y post-procesamiento suelen estar integradas en paquetes de software de FEM robustos [85].

Los estudios de simulación numérica por el método FEM se desarrollan a lo largo de 3 etapas diferentes: pre-proceso, resolución y post-proceso. Para este trabajo se hace uso del software ABAQUS/Standard, un programa de FEM de propósito general diseñado específicamente para análisis avanzado estructural y de transferencia de calor [86].

2.6.1. Dinámica de Fluidos Computacional.

La aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamic) permite realizar simulaciones para calcular las fuerzas e impactos que provocan los fluidos en cualquier elemento, eliminando la complejidad del análisis de flujo y reduciendo la creación de prototipos para pruebas, ya que en ocasiones este proceso suele ser lento y costoso [87].

El estado físico de cualquier fluido (gas o líquido) está gobernado por los tres principios fundamentales de conservación de la masa, momento y energía. El método de CFD, es el conjunto de técnicas que permiten resolver las ecuaciones que se derivan de estos tres principios, mediante las cuales se obtienen los campos de velocidad, temperatura y presión en el fluido estudiado.

Las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos son las conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. Dichas ecuaciones se utilizan para estudiar cualquier aspecto que tenga que ver con fluidos, sin embargo, son sólo una aproximación del comportamiento real de los fluidos, por lo que, si se estudia el movimiento de un fluido con estas ecuaciones, es imposible prever si ese movimiento se va a mantener o tendrá variaciones.

Para facilitar la solución de las ecuaciones, éstas se simplifican asumiendo ciertas hipótesis que a continuación se mencionan [88]:

- Que el flujo sea incomprensible. Esto se logra declarando a la densidad como una función únicamente de la temperatura, ya que para un flujo compresible la variación de la densidad es con la presión y temperatura.
- Como consecuencia de lo anterior se considera despreciable la variación de la densidad con la presión.
- Considerar la gravedad como fuerza másica que actuará sobre el fluido.
- Considerar al aire como medio transparente a la radiación, es decir que no emita, absorba ni disperse la radiación térmica.
- Disipación viscosa despreciable.

Con base en las hipótesis anteriores, la simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes quedan de la siguiente forma [88]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P_d}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P_d}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho g \beta (T - T_\infty) \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P_d}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.19}$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho w \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\lambda}{C_p} + \mu \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad \text{Ecuación 2.20}$$

donde u , v y w son las componentes de velocidad en un plano 3-D, ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad dinámica, P_d es la presión del fluido, g es la fuerza de gravedad, λ es la longitud de onda en un medio transparente y C_p es el calor específico a presión constante.

Para realizar una simulación CFD, el volumen de fluido en estudio se divide en una serie de pequeños volúmenes discretos en un proceso denominado mallado. Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales.

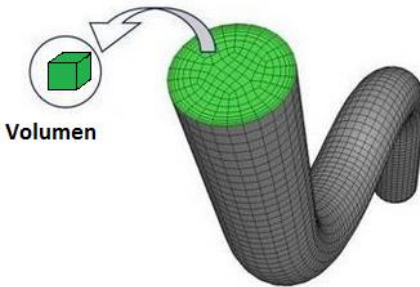


Figura 2.6. Ejemplo de mallado y representación de los volúmenes discretos.

En las aplicaciones ingenieriles, se utiliza el método Reynolds Averaged Navier-Stokes ya que se tiene un mayor interés en el flujo medio que en las fluctuaciones. Para ello se realiza además de la aproximación, un promedio de las ecuaciones de conservación declarando un periodo de tiempo mucho mayor que el tiempo característico de las fluctuaciones turbulentas. Los modelos más utilizados en CFD son [89, 90]:

- **Modelo Spalart-Allmaras:** Modelo de una sola ecuación usado en aplicaciones aeroespaciales y de turbomaquinaria.
- **Los modelos k- ϵ** describen la capa límite con gradientes de presión adversos, predicen una separación retrasada y reducida de esta en comparación con los datos obtenidos experimentalmente.
- **Modelo k- ϵ estándar:** análisis con número de Reynolds grande (flujos turbulentos) y efectos de viscosidad molecular despreciables.
- **Modelo RNG k- ϵ :** cuenta entre sus ventajas con un gran rango de aplicabilidad y una mayor precisión para flujos rápidamente variados, con flujos laminares (número de Reynolds bajo).
- **Modelo k- ϵ Realizable:** Modelo que incorpora propiedades matemáticas que han de cumplir los elementos del tensor de esfuerzos.

CAPITULO 3 METODOLOGIA

3.1. Colector parabólico compuesto (CPC)

El tipo de colector CPC estudiado en este trabajo se basa en el colector CPC presentado previamente por Terrón [70]. En la Figura 3.1a se observa el diseño del CPC mediante un corte trasversal, donde se aprecia que el sistema consta de dos superficies parabólicas reflejantes.

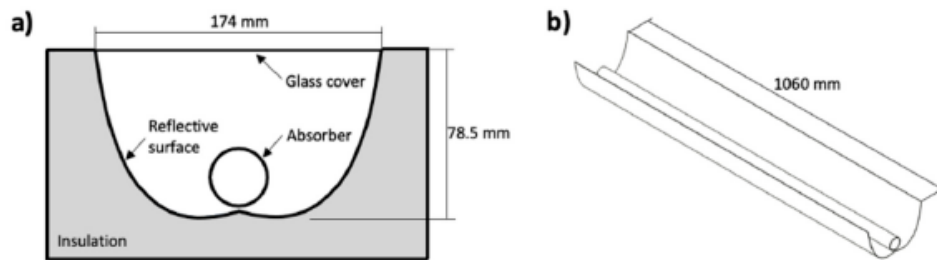


Figura 3.1. (a) Vista trasversal del Colector Solar CPC, (b) Vista isométrica del colector solar CPC [91].

El CPC presenta dimensiones de 174 mm de apertura, una altura de 78.5 mm, y una longitud de 1060 mm, como se muestra en la Figura 3.1b. El CPC en estudio está alineado con la orientación este-oeste, tiene un ángulo de aceptación de 45° y una inclinación de 32° con referencia a la horizontal, con la finalidad de optimizar la recepción de la irradiación en las estaciones de otoño e invierno, cuando el ángulo de inclinación del sol con respecto a la horizontal es menor. La relación de concentración del colector es de ~ 1.41 de acuerdo con la Ecuación 3.1 [61]:

$$C = \frac{1}{\text{Sen}(45^\circ)} = 1.4142 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

El colector tiene una cubierta de vidrio para reducir la pérdida de calor. El receptor consta de un tubo de cobre con un diámetro externo de 31.75 mm ($1 \frac{1}{4}$ de pulgada) y un espesor de 1.6 mm. En la Figura 3.2a se presentan los dos sistemas experimentales utilizados en este trabajo de investigación. Uno de los sistemas utilizó el receptor tubular sin aletas (Figura 3.2b) y el otro utilizó un receptor tubular con aletas segmentadas (Figura 3.2c). Ambos sistemas fueron instalados en la misma ubicación para poder hacer un análisis comparativo de los resultados obtenidos de sus mediciones.

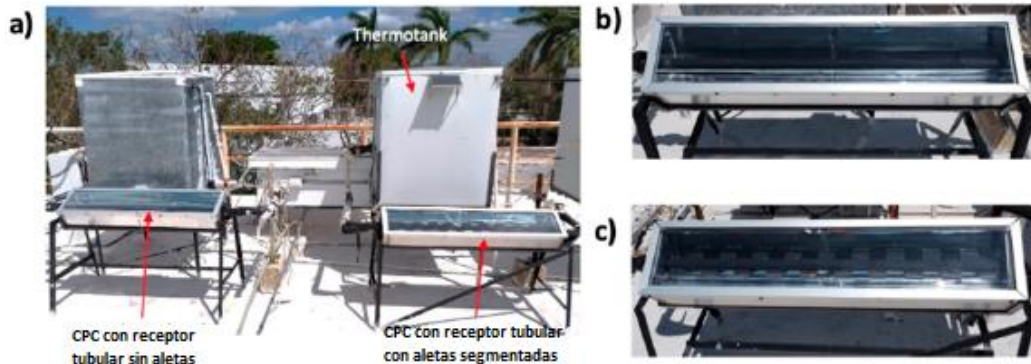


Figura 3.2. (a) Fotografía de los sistemas CPC experimentales; (b) CPC con receptor tubular sin aletas; (c) CPC con receptor tubular con aletas segmentadas.

3.2. Colector con receptor con aletas segmentadas

Para el sistema CPC con un receptor tubular aletado (Figura 3.3), las aletas fueron de 53 mm de ancho, 25.4 mm de largo y 3 mm de espesor, dando un total de 19 aletas distribuidas a lo largo del receptor tubular (10 de un lado y 9 del otro) como se puede ver en la Figura 3.3, donde se logra apreciar la segmentación de las aletas para combinar la captación de la radiación solar que llega directamente sobre el receptor tubular así como la que llega a las aletas. Los colectores fueron recubiertos con pintura negra no selectiva.

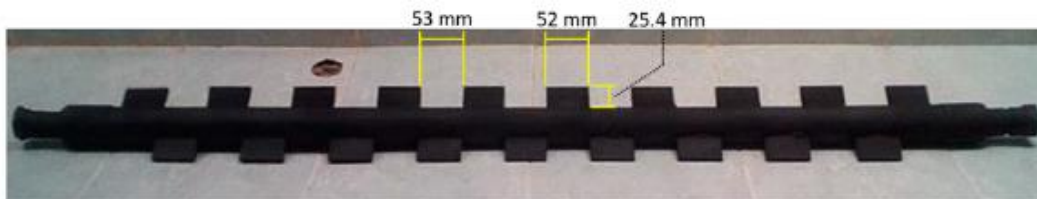


Figura 3.3. Receptor tubular con aletas segmentadas de cobre [70].

Los sistemas CPC fueron puestos en marcha en conjunto con un sistema de circulación forzada (como se describe más adelante) y un sistema de almacenamiento termotanque. Dichos sistemas fueron construidos para ser funcionales a las condiciones de la región de la península de Yucatán.

3.3. Medición de la radiación solar y temperatura

Los colectores solares CPC de la Figura 3.2a se ubicaron en la ciudad de Mérida, en la Península de Yucatán, México (21.02° N, 89.63° O). La irradiancia solar incidente y la temperatura ambiente se midieron con una estación meteorológica Davis Vantage Pro2 Plus (Davis Instruments Corporation, Hayward, CA, EE. UU.), instalada en el centro de estudio (CICY), con una frecuencia de adquisición de 0.017 Hz y precisiones de $\pm 5\%$ y $\pm 0,3$ °C, respectivamente. (ver Figura 3.4).



Figura 3.4. Estación meteorológica Davis instalada en CICY.

En la

Tabla 3.1 se muestran los valores de radiación solar global, temperatura ambiente máxima y mínima mensual, obtenidas con la estación meteorológica Davis Vantage Pro2 plus. El periodo de muestreo de los datos fueron las 24 horas en el período comprendido del 1 de enero al 31 de diciembre del 2017, tomando muestras cada minuto. Dicha información fue almacenada en la estación meteorológica.

Tabla 3.1. Resumen de la radiación solar global medida en la ciudad de Mérida, Yucatán en 2017.

MES	TEMP. MAX °C	TEMP. MIN °C	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)
ENERO	35.60	15.50	1113.00
FEBRERO	35.60	17.60	986.00
MARZO	36.60	18.40	1114.00
ABRIL	40.20	21.20	1176.00
MAYO	38.50	20.30	1176.00
JUNIO	38.00	22.90	1285.00
JULIO	37.10	22.90	1285.00
AGOSTO	36.70	23.40	1292.00
SEPTIEMBRE	35.30	23.40	1137.00
OCTUBRE	35.20	20.00	1088.00
NOVIEMBRE	32.20	17.10	963.00
DICIEMBRE	33.00	16.30	958.00

3.4. Monitoreo del colector CPC

El CPC se equipó con termopares tipo K para medir las temperaturas de entrada y salida del agua así como la temperatura en la superficie del absorbedor. También se midieron la temperatura del aire dentro del colector CPC y la temperatura ambiente. Se utilizó una bomba sumergible WP350 (LAWN Industry, México) para producir un flujo forzado de ~ 0.36 L/min (0.0076 m/s). Se instaló una bomba del mismo modelo en cada CPC.

El flujo se midió utilizando un sensor de flujo Omega FLR1000 con una precisión del 1% (Omega Engineering Inc., Norwalk, CT, EE. UU.). Se instaló un sensor de flujo en cada CPC. Las temperaturas y los datos del flujo se registraron de forma inalámbrica con una frecuencia de adquisición de 0.2 Hz utilizando los módulos NI-9213 y NI-9207, respectivamente, y un sistema de adquisición de datos NI cDAQ-9191 (National Instruments Corp., Austin, TX, EE. UU.).

Estos datos fueron adquiridos mediante un programa escrito en LabView. En la Figura 3.5 se puede apreciar la información de cada uno de los termopares en cada sección del sistema de calentador solar, así como la velocidad de flujo que tiene cada sistema instalado.

El programa en LabView permite ver gráficamente las temperaturas que se registran en el agua en cada sección determinada, así como el flujo registrado por el flujómetro. La interfaz se puede apreciar en la Figura 3.5. Logrando así un monitoreo continuo los 365 días del año.

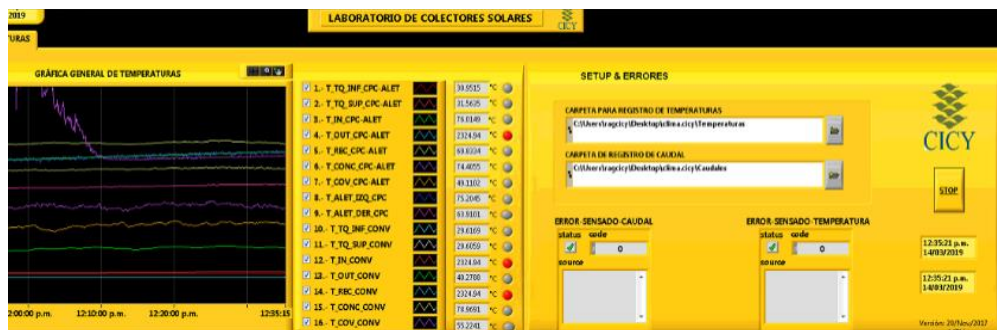


Figura 3.5. Interfaz en LabView del sistema de monitoreo de los colectores solares desarrollado en el CICY.

3.5. Modelado del sistema CPC

A continuación, se describirá la metodología para el modelado del sistema CPC de forma general y posteriormente se detallará cada una de las partes de esta. En la Figura 3.6 se muestra un diagrama esquemático de la metodología numérica utilizada en este trabajo para investigar el rendimiento térmico de los colectores solares CPC descritos en la Sección 3.2.

En primer lugar, se realizó un análisis óptico utilizando el software de trazado de rayos Tonatiuh [82] para obtener la energía y la distribución espacial de los rayos (fotones) que se cruzan con la superficie del tubo absorbedor del CPC, durante un día determinado, de 6 a.m. a 6 p.m. (Figura 3.6a). En segundo lugar, los datos del análisis de trazado de rayos se procesaron en MATLAB [92] y Excel para obtener la distribución de energía (flujo de calor superficial) en la superficie del absorbedor del CPC (Figura 3.6b). En tercer lugar, se creó una simulación acoplada de FEM-CFD en el software Abaqus [86], en la cual la irradiación sobre el absorbedor (W/m^2) se ingresa en el modelo FEM del absorbedor. Este modelo FEM se acopla con el modelo CFD del fluido (agua) que corre a través del absorbedor (tubo) (Figura 3.6c). El análisis térmico FEM-CFD permite estimar la temperatura del agua. Cada paso de la metodología de simulación se describe en detalle en las siguientes secciones.

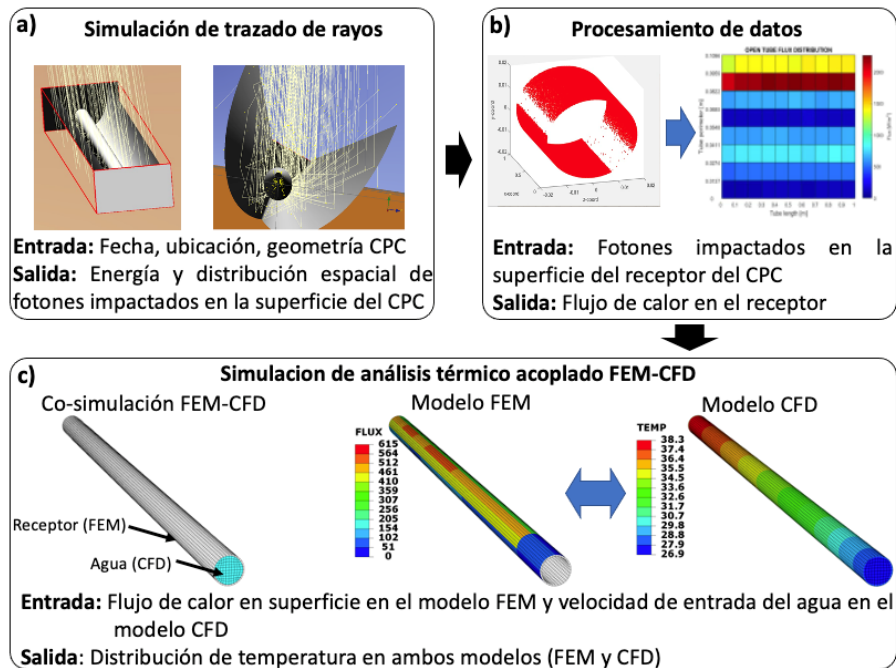


Figura 3.6. Diagrama esquemático de la metodología numérica para el modelado del CPC: a) Trazado de rayos en el software Tonatiuh, b) Procesamiento de datos en el MATLAB y Excel; c) Simulación del análisis FEM-CFD en el software Abaqus [91].

3.6. Análisis de trazado de Rayos

Se realizó un análisis óptico utilizando el software de trazado de rayos Tonatiuh, el cual está basado en el método de Monte Carlo [82]. Este software se usa para obtener la irradiación total (flujo de energía) que la superficie absorbidora del CPC recibe en diferentes momentos del día. El cálculo de la irradiación se hizo cada hora con energía solar, desde las 6 a.m. hasta las 6 p.m.

El software Tonatiuh se desarrolló para simulaciones ópticas de sistemas de concentración solar y se ha utilizado con éxito para simular colectores solares CPC [83, 93, 94].

Las geometrías 3D de la superficie reflectora y del tubo absorbedor CPC (el cual será llamado colector a partir de esta sección) se construyeron en el software Tonatiuh (Figura 3.7). Para las simulaciones, se modeló el colector sin aletas (Figura 3.7a), con aletas segmentadas (Figura 3.7b) y con aletas continuas (Figura 3.7c). Las dimensiones de las aletas y el ángulo de estas con respecto al eje vertical del CPC (ver Figura 30) se variaron, para estudiar estos efectos en la capacidad de recolección de energía solar para las diferentes configuraciones. El análisis de trazado de rayos se configuró con la ubicación de la ciudad de Mérida (21.02° N, 89.63° O) y los parámetros solares fueron: una distribución angular (pillbox), una irradiación de 1000 W/m^2 y un total de 1 millón de rayos (fotones) para el análisis, los cuales intersectan la superficie de estudio. El resultado del análisis de trazado de rayos son las coordenadas del punto de intersección en la superficie del colector de cada fotón individual y su energía en forma tabular. La Figura 3.7e ilustra los fotones que impactan la superficie del colector del CPC.

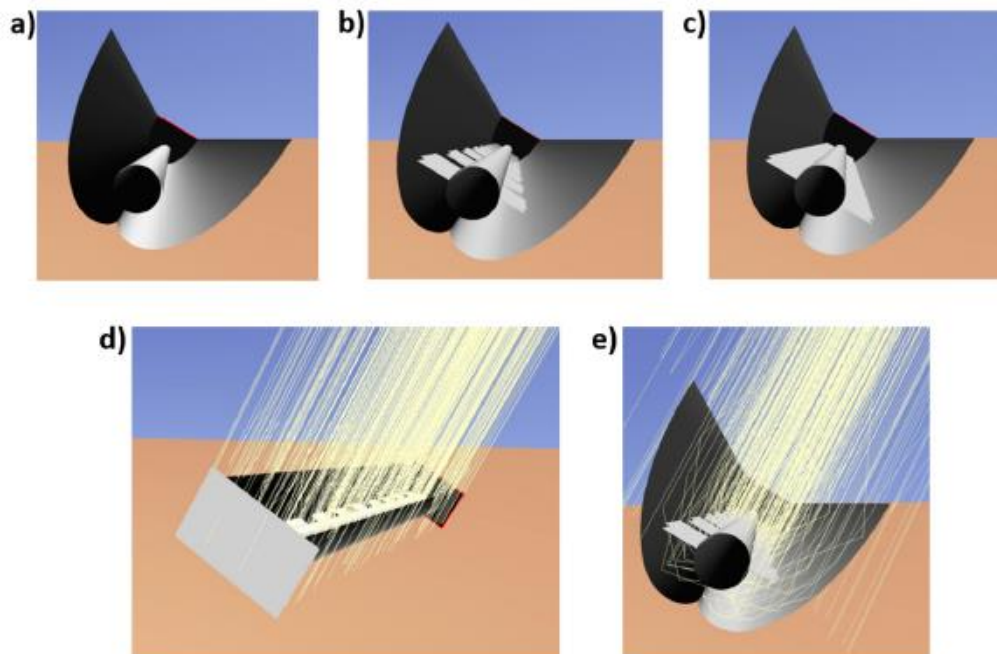


Figura 3.7. a) Colector CPC con absorbedor sin aletas; b) Colector CPC con absorbedor con aletas segmentadas; c) Colector CPC con absorbedor de aletas continuas; d) simulación de trazado de rayos del colector CPC con aletas segmentadas; e) Vista de primer plano.

3.7. Procesamiento de datos del análisis de trazado de rayos usando MATLAB y Excel

Con los datos obtenidos del programa Tonatiuh, se realiza un post-procesamiento a través del MATLAB, en el cual mediante el código escrito en el software [70] se visualiza el mapeo de fotones que impactan en el receptor como se observa en Figura 3.8.

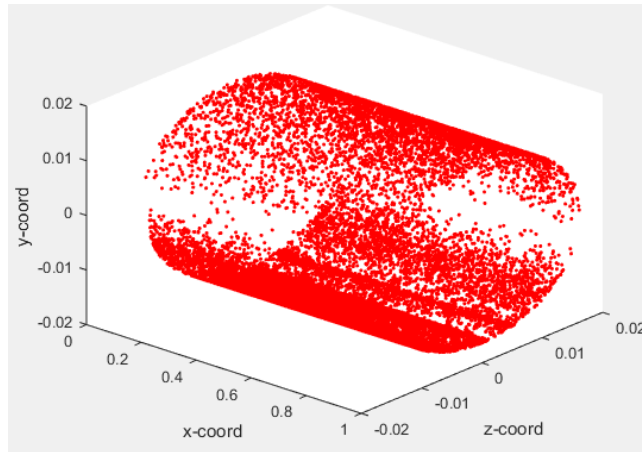


Figura 3.8. Mapeo de fotones impactados en el receptor tubular.

En el MATLAB se procedió a identificar la matriz de salida, donde se alojan los puntos coordenados de cada fotón que impacta en la superficie del receptor y esta se exportó a Excel para obtener la distribución del flujo de energía en la superficie del receptor. Para ello, se procedió a dividir el área de la superficie del colector en 80 secciones (ver Figura 3.9a). La Figura 3.9b muestra una imagen de Excel donde se aprecian los fotones en la superficie del colector (imagen de perfil). Por medio de fórmulas condicionantes se contabilizaron los fotones que impactan cada sección individual para cada intervalo de tiempo. De esta manera, se obtuvo la irradiación (energía por unidad de tiempo por unidad de área, W/m^2) en cada sección individual como se muestra en la Figura 3.9c.

Por último, en Excel se generó una matriz para cada sección individual con la información de la irradiación para cada hora en particular, en un horario de 6 a.m. a 6 p.m. con un tiempo total de 43200 segundos. Esta matriz se exportó de forma tabular al software Abaqus como se aprecia en la Figura 3.10, la cual muestra la matriz para un segmento de área en particular. Esto se hizo para los 80 segmentos de área mostrados en la Figura 43a. Con esto se logró mapear el flujo de energía en la superficie del receptor en el modelo FEM.

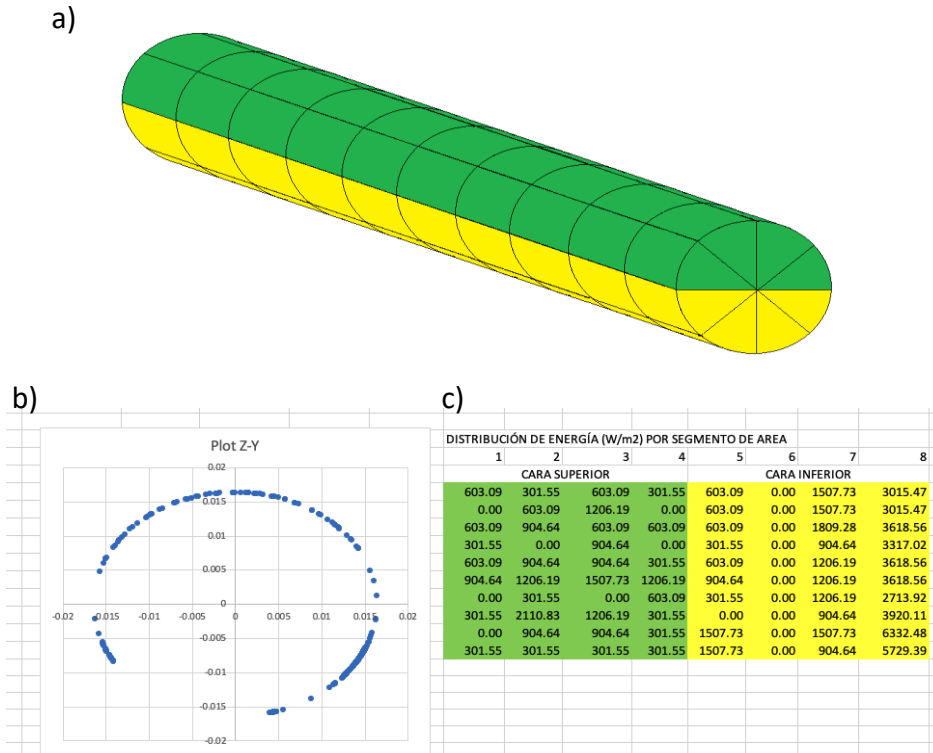


Figura 3.9. Análisis en Excel de un receptor simple: a) Segmentación del receptor; b) distribución de fotones; c) Energía en W/m² para cada segmento de área.

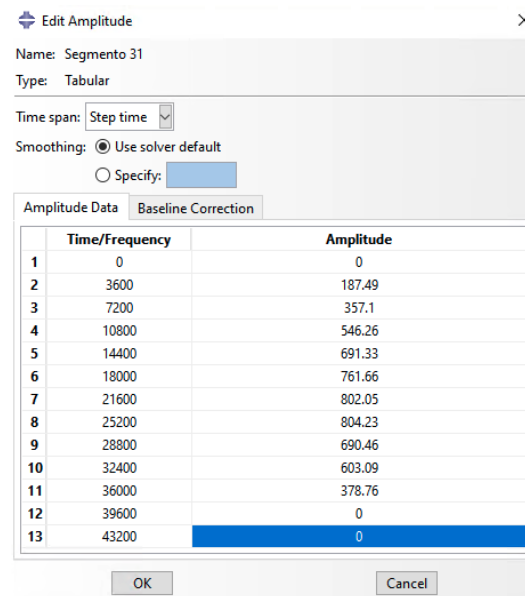


Figura 3.10. Matriz de carga térmica (W/m²) aplicada en un segmento en particular a lo largo del día (12 horas, 43200 segundos). Esto se hizo para los 80 segmentos de área mostrados en la Figura 3.9a.

3.8. Modelo acoplado FEM-CFD en Abaqus

Para la simulación numérica del CPC, se realizó una co-simulación acoplada entre un análisis FEM para el tubo colector y una simulación CFD para el fluido dentro del tubo. Este tipo de simulación permite una transferencia de calor entre el modelo FEM del tubo sólido (colector) construido en Abaqus/Standard y el modelo CFD del agua que corre dentro del colector construido en Abaqus/CFD. En la Figura 3.11a se muestran las mallas de los modelos FEM y CFD utilizados para la co-simulación acoplada FEM-CFD del colector sin aletas a manera de ilustración. Las simulaciones de FEM (resuelta en Abaqus/Standard) y CFD (resuelta en Abaqus/CFD) se ejecutan simultáneamente y existe un intercambio de información (temperatura) en cada tiempo incremental de la co-simulación [86]. Las propiedades físicas y térmicas que se utilizaron en las co-simulación se consideraron constantes durante el análisis y se muestran en la Tabla 3.2.

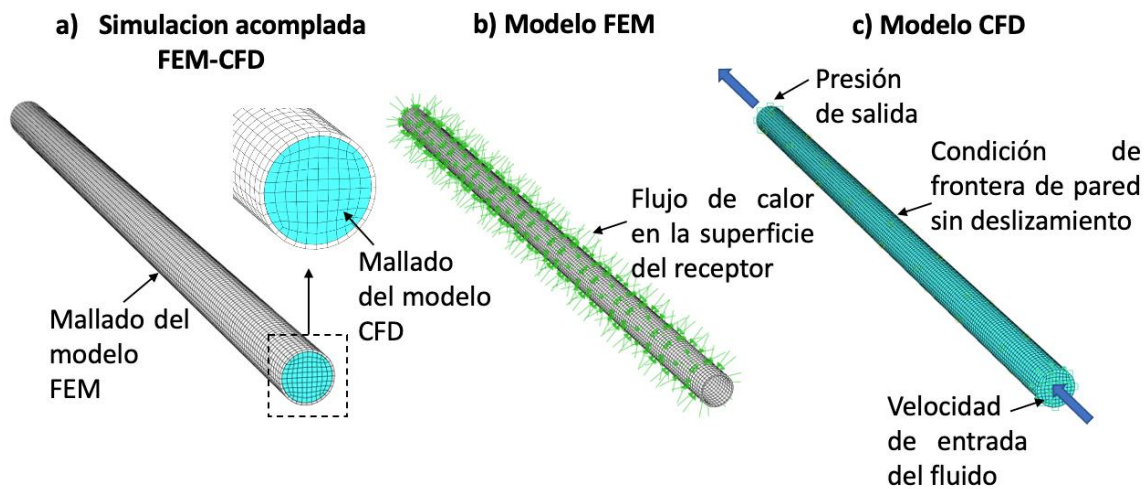


Figura 3.11. a) Malla de modelos FEM y CFD; b) carga térmica en la superficie del absorbedor; c) mallas y condiciones limítrofes del modelo CFD del agua.

Tabla 3.2. Propiedades físicas y térmicas de los materiales utilizados en la co-simulación FEM-CFD.

Propiedades de los materiales	Cobre (FEM)	Agua (CFD)
Densidad (kg/m^3)	8930	997.9
Conductividad térmica ($W/m^{\circ}C$)	384	0.598
Calor específico ($J/kg^{\circ}C$)	386	4183
Emisividad	0.92 *	-
Coeficiente de pérdida de calor ($W/m^2^{\circ}C$)	4.6 *	-
Viscosidad (N/m^2s)	-	0.001

* Tubo de cobre recubierto con pintura negra no selectiva.

3.8.1. Modelo FEM

Para el análisis FEM del receptor se utilizó un análisis térmico transitorio FEM en el software Abaqus/Standard. Este tipo de análisis permite calcular el campo de temperatura del sólido en cuestión (colector) sin considerar esfuerzos o deformaciones [95, 96]. La malla del colector sin aletas tuvo un total de 6400 elementos lineales tipo ladrillo de transferencia de calor de 8 nodos (DC3D8) como se muestra en las Figura 3.11a y Figura 3.11b. Un análisis de sensibilidad de la malla mostró que este tamaño de malla es suficiente para la convergencia. Si bien, la diferencia entre la temperatura del colector y la temperatura ambiente fue menor de 20 °C de acuerdo con las mediciones experimentales, y la temperatura máxima del colector fue menor de 50 °C, la pérdida de calor debido a los efectos de convección y la radiación ambiental de cuerpo negro se tomó en consideración en la simulación utilizaron el coeficiente de pérdida de calor y la emisividad que se muestran en la Tabla 3.2. Estos valores se tomaron para una superficie de cobre revestida de pintura negra no selectiva [97, 98].

Las temperaturas iniciales del receptor y el fluido se basaron en las mediciones experimentales. Las propiedades del material utilizado para el receptor (tubo de cobre) en el modelo FEM se muestran en la Tabla 3.2 [99]. La superficie cilíndrica del receptor sin aletas se dividió en 80 secciones para coincidir con las secciones que se utilizaron en el cálculo de la irradiación sobre el colector obtenida a través del análisis de trazado de rayos y el procesamiento de datos usando Matlab/Excel (ver Sección 3.7). La carga térmica en la superficie del receptor (irradiación calculada como se describe en las secciones 3.6 y 3.7) se introdujo como un flujo de calor superficial (W/m^2) en cada una de las 80 secciones (Figura 3.11b y Figura 3.12). Los datos se introdujeron en forma tabular para cada hora del análisis. De manera similar, se introdujo la irradiación para los receptores aletados. En la Figura 3.12 se puede observar la distribución de cargas térmicas en las secciones individuales para el receptor sin aletas.

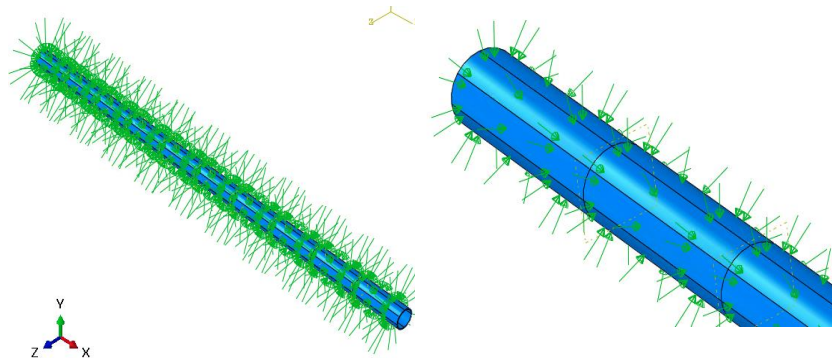


Figura 3.12. Asignación de cargas térmicas en la superficie del receptor en el modelo FEM.

3.8.2. Modelo CFD

Para el modelo CFD del fluido (agua), se empleó un análisis de flujo transitorio en Abaqus/CFD. El software se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles y utiliza el modelo de turbulencia de Spalart-Allmaras [100]. La malla tuvo un total de 19200 elementos lineales tipo ladrillos para fluidos de 8 nodos (FC3D8) como se muestra en la Figura 3.11a y Figura 3.11c. Un análisis de sensibilidad de la malla mostró que este tamaño de malla se consideró suficiente para la convergencia del análisis. Las condiciones de frontera del fluido se definieron como: una velocidad de entrada normal de 0.0076 m/s (basada en la medición experimental promedio de 0.36 L/min) y una presión de salida de 0 MPa (Figura 3.11c y Figura 3.13). Se aplicó una condición de límite de pared de no deslizamiento/no penetración en la superficie del fluido (Figura 3.11c y Figura 3.13). Las propiedades del material utilizado para el agua en el modelo CFD se muestran en la Tabla 3.2 [100].

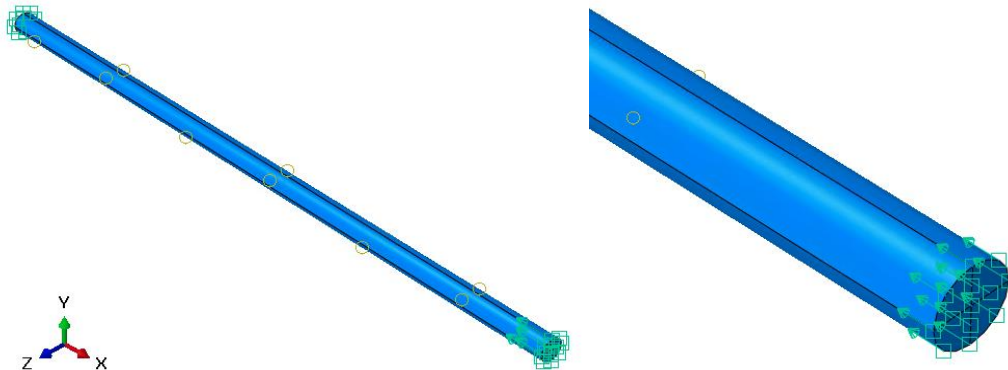
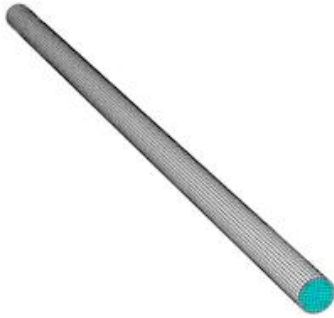


Figura 3.13. Asignación de condiciones de frontera y velocidad inicial del fluido en el receptor en el modelo FEM.

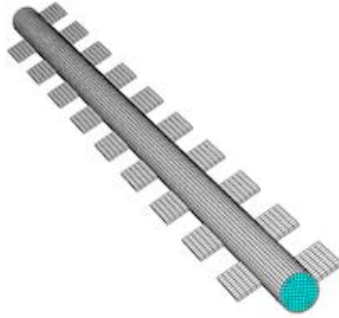
3.8.3. Modelos de receptores del CPC.

La Figura 3.14 muestra la malla de los tres tipos diferentes de receptores que se modelaron con el análisis FEM-CFD, es decir, receptor sin aletas (Figura 3.14a), receptor con aletas segmentadas (Figura 3.14b) y receptor con aletas continuas (Figura 3.14c). Los receptores sin y con aletas segmentadas se validaron experimentalmente. El receptor con aletas continuas solo se evaluó numéricamente.

a) Receptor del CPC sin aletas



b) Receptor del CPC con aletas segmentadas



c) Receptor del CPC con aletas continuas



Figura 3.14. Mallado de las distintas geometrías analizadas; (a) receptor sin aletas, (b) receptor con aletas segmentadas y (c) receptor con aletas continuas.

CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados experimentales

A continuación, se reportan los resultados experimentales correspondientes a las lecturas de los sensores de temperatura instalados en los CPCs y a la irradiación y temperatura ambiente medidas por la estación meteorológica. Los datos corresponden al 1 de marzo del 2020, ya que este fue un día soleado sin nublados parciales, por lo que pudieron registrar los datos de temperaturas e irradiación solar sin interrupciones. Estos datos recolectados en esta fecha se consideran como óptimos para comparar el desempeño térmico experimental entre los dos CPCs (receptor sin aletas y con aletas segmentadas), así como para validar los modelos numéricos FEM-CFD.

En las Figura 4.1a y Figura 4.1b se puede observar la temperatura de entrada T_e y la temperatura de salida T_s del receptor de los CPCs, sin aletas y con aletas segmentadas, respectivamente, así como la temperatura ambiente T_a la irradiación solar. En la Figura 4.1c se observa en el caudal medido en los CPCs, el cual fue en promedio de 0.36 L/min y equivale a un flujo másico de 0.006 kg/s. Se puede observar en la Figura 49 que, para ambos CPCs, el aumento de temperatura de salida a lo largo del día es debido al incremento la radiación solar combinado con el incremento de la temperatura de entrada y el efecto del receptor del CPC en el agua que corre a través de este. Se puede observar en la Figura 4.1a que existe un comportamiento inusual en la curva de temperatura de la superficie del receptor, es decir, se ve un pico de temperatura entre las 12 y las 14 horas. Esto podría deberse a que en esas horas del día existe un efecto de concentración de luz sobre el sensor de temperatura, aunque igual es posible que exista un error en la lectura del sensor ya que no se aprecia un efecto de este incremento de temperatura del receptor en la temperatura de salida de este. La Figura 4.1 también muestra que para el CPC con receptor con aletas segmentadas se produce una mayor diferencia de temperatura $\Delta T = T_s - T_e$, como resultado en el incremento de energía disponible en la superficie debido a las aletas. La temperatura máxima de salida se observa alrededor de las 3 p.m. y para el CPC aletado es 4.1 °C mayor que la que se observa en el receptor sin aletas. La Figura 4.2 muestra la diferencia de temperatura ΔT para ambos colectores a lo largo del día.

La eficiencia térmica η de ambos diseños experimentales de los CPCs (sin aletas y con aletas segmentadas) se puede observar en la Figura 4.2. η fue obtenida a partir de la Ecuación 2.13, usando un flujo másico de 0.006 kg/s, $C_p = 4180$ J/kg°C, $A_s = 0.183$ m² (ver Figura 35), y los datos

experimentales de S y ΔT de la Figura 4.1 y Figura 4.2, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, en el CPC con receptor con aletas segmentadas se produjo una mayor ΔT , lo cual como dio como resultado un incremento en la eficiencia del CPC aletado (Figura 4.2). en el incremento de energía disponible en la superficie debido a las aletas. La eficiencia promedio para el 1 de marzo del 2020 fue de 42% y 57% para los CPCs sin aletas y aletado, respectivamente.

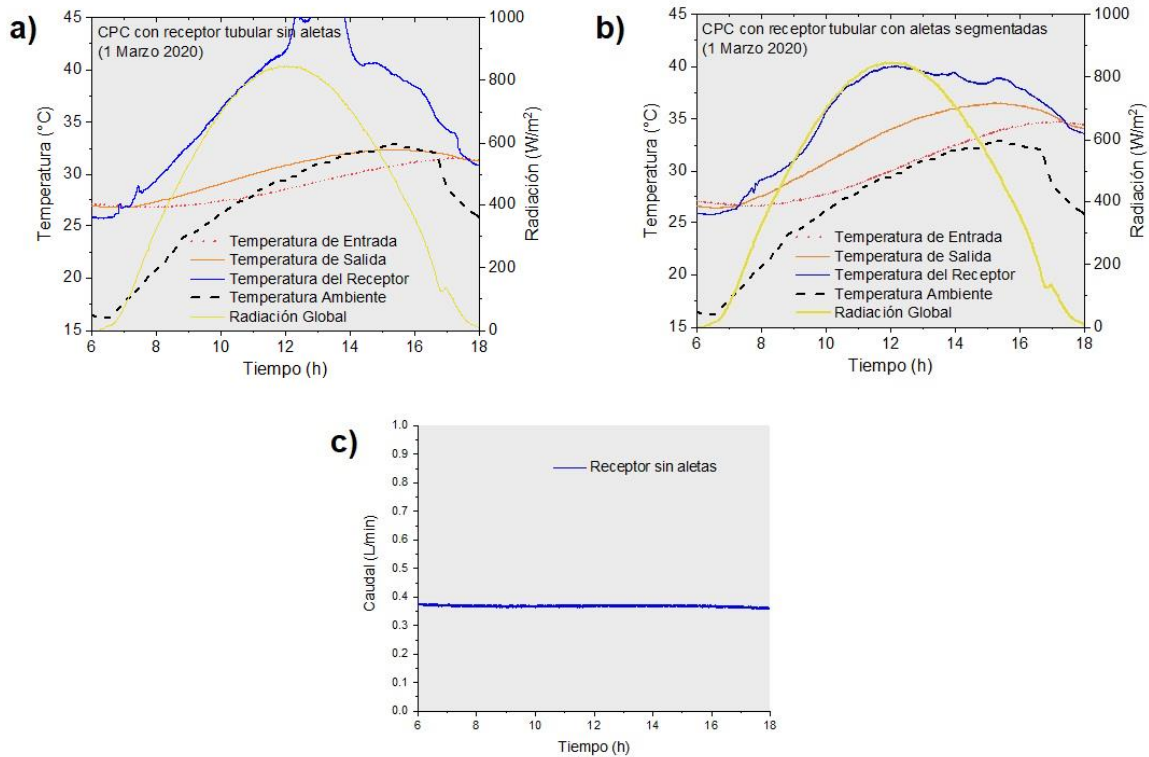


Figura 4.1. Mediciones de la temperatura de entrada y salida del receptor de los CPCs experimentales, así como de la temperatura ambiente e irradiación global registradas el 1 de marzo del 2020 para el a) el CPC con receptor sin aletas, b) el CPC con receptor con aletas segmentadas. c) Caudal en el CPC con el receptor sin aletas.

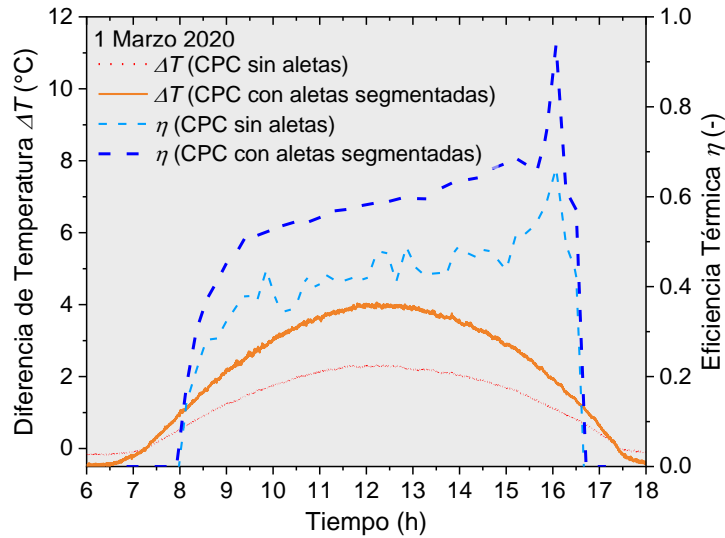


Figura 4.2. Diferencia de temperatura ΔT y eficiencia térmica η para los CPC's con receptores sin aletas y con aletas segmentadas para el 1 de marzo de 2020

En la Figura 4.3 se muestra la eficiencia térmica experimental η graficada contra valores de $(T_e - T_a)/I$ para ambos colectores CPC para el 1 de marzo de 2020. La Ecuación 2.15 ($\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L [(T_e - T_a)/I]$) fue ajustada a los datos experimentales por medio de una regresión final y las ecuaciones de las rectas obtenidas se pueden observar en la Figura 4.3. La intersección de la recta con el eje de ordenadas es el término $F_R(\tau\alpha)$. El valor de $F_R(\tau\alpha)$ para el CPC con aletas segmentadas (0.584) es mayor que para el CPC sin aletas (0.405). La razón de los dos valores es 1.45 lo cual indica que el factor de remoción de calor F_R para el CPC con aletas segmentadas es 45% mayor que el del CPC sin aletas (considerando que $(\tau\alpha)$ es constante). Esto a su vez indica que la transferencia de calor del tubo receptor al fluido es mayor para el CPC con aletas segmentadas en comparación con el CPC sin aletas. Por otro lado, la pendiente $F_R U_L$ de la recta para el CPC con aletas segmentadas es de $11.06 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$, mientras que para el CPC sin aletas es de $6.88 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$. La razón de estos dos valores es 1.61, lo que indica que el coeficiente global de transferencia de calor U_L es mayor para el CPC con aletas segmentadas en comparación con el CPC sin aletas. Como resultado de estas comparaciones, se puede decir que el colector CPC con un receptor con aletas segmentadas es más eficiente que el CPC sin aletas; sin embargo, para valores grandes de $(T_e - T_a)/I$ (≥ 0.04), la diferencia entre los valores de eficiencia de los CPCs con y sin aletas es menor del $\sim 10\%$ (ver Figura 4.3).

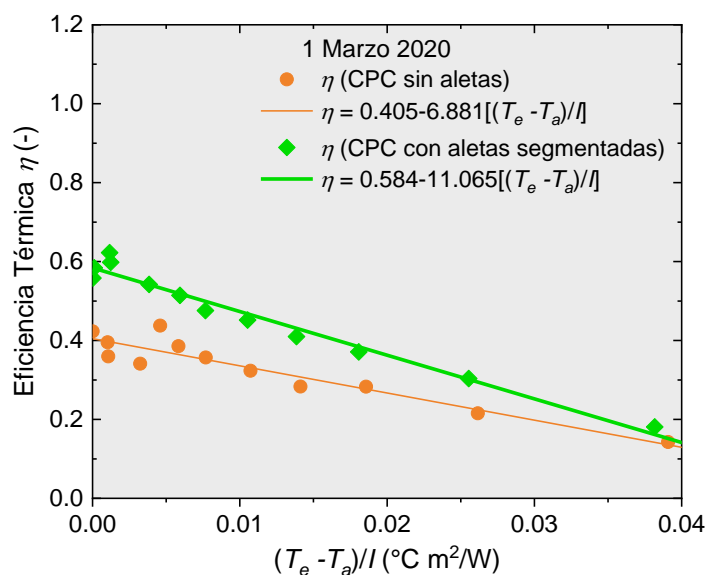


Figura 4.3. Eficiencia térmica η para los CPC sin aletas y con aletas segmentadas para el 1 de marzo de 2020.

4.2. Resultados numéricos

4.2.1. Análisis de trazado de rayos

En esta sección se muestran los resultados numéricos del análisis de trazado de rayos (análisis óptico) usando el software Tonatiuh. Se analizaron varios tipos de receptores de CPC variando el tipo de aletas y las geometrías de estas, considerando como geometrías primordiales las relacionadas con los colectores CPC experimentales que sirvieron de referencia para este estudio.

4.2.1.1. Receptor tubular sin aletas

La primera geometría que se analizó fue la del receptor tubular sin aletas, de 32 mm de diámetro interno, con una longitud de 1 metro. Para el análisis se consideró un prototipo en condiciones ideales, es decir, sin obstáculos que produzcan sombras, con cielo despejado y una irradiación solar de 1000 W/m². Se realizó el análisis durante 8 horas del día, es decir, desde las 8 a.m. hasta las 4 p.m., para observar la incidencia de la radiación en el receptor. En la Tabla 4.1 se observa la disponibilidad energética obtenida con la simulación óptica en el software Tonatiuh, para cada una de las estaciones del año, con una inclinación estática del colector de 32° con respecto a la horizontal. Las simulaciones para primavera, verano, otoño e invierno se realizaron en las fechas representativas del 21 de marzo, 21 de junio, 21 de septiembre y 21 de diciembre,

respectivamente. Esta energía es la energía de los fotones que después de ser reflejados, inciden sobre la superficie del receptor tubular. En la Tabla 4.1 se puede observar que con la inclinación del colector se obtiene una disponibilidad de energía total con una diferencia máxima de un ~16% entre el otoño y el verano. Incluso en horas donde la radiación no se considera significativa (entre 8 y 9 de la mañana) se logra tener captación de radiación en el receptor.

Tabla 4.1. Disponibilidad energética por estación en kJ de un receptor CPC sin aletas a 32° de inclinación.

Hora	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
8	101.52	85.52	116.64	161.91
9	166.59	202.80	179.83	202.43
10	220.18	270.13	230.44	243.84
11	259.45	315.99	266.90	265.02
12	279.32	338.89	279.64	277.84
13	265.36	317.05	257.22	262.63
14	227.58	271.42	218.14	238.64
15	177.03	204.15	163.83	201.84
16	113.40	89.86	97.74	168.18
Total	1810.43	2095.81	1810.38	2022.33

De manera ilustrativa, en la Figura 4.4 se muestra el abanico de 8 horas de incidencia solar en el receptor en la primavera. Se observa que a las 12 horas la cantidad de fotones que impactan al receptor es mayor (ver Tabla 4.1) debido a que estos impactan casi de forma perpendicular a la abertura del CPC. También se observa que en las demás horas se llegan a presentar pérdidas por sombreados debido a la carcasa del colector. Este fenómeno se logra apreciar con más detalle en las ilustraciones de distribución de fotones que se presenta en la fila inferior de la Figura 4.4.

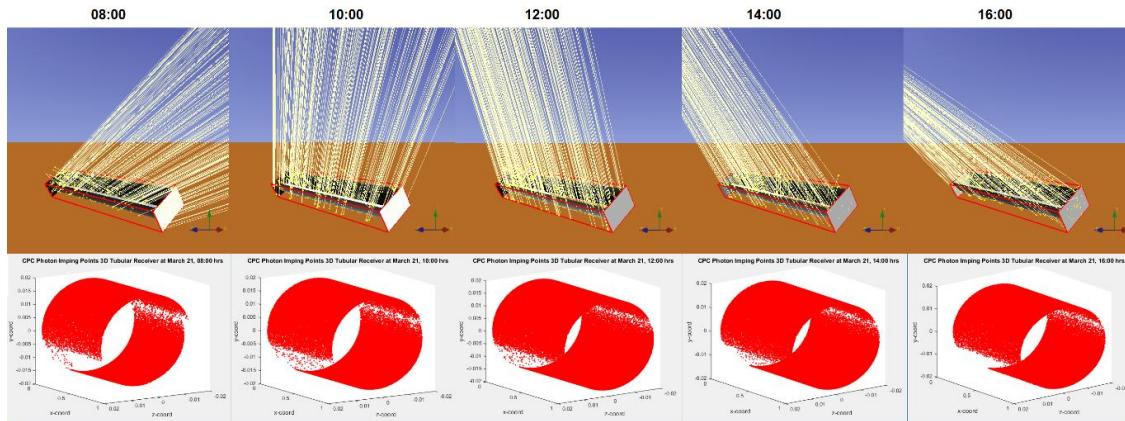


Figura 4.4. Distribución energética de los impactos de fotones en el receptor sin aletas de las 8 a las 16 horas en primavera.

En la Figura 4.5 se muestra una gráfica comparando la disponibilidad energética en cada estación del CPC sin aletas. Se puede apreciar que con la inclinación de 32° establecida en el prototipo experimental de referencia, se obtiene una buena captación de energía aun en invierno. Con este ángulo de inclinación se dispone de una captación de energía mejor distribuida a lo largo del año. Para el caso del verano, podemos ver que al ser una época del año cuando el sol se encuentra más perpendicular a la horizontal, el aprovechamiento solar es mayor con respecto a los otros escenarios descritos.

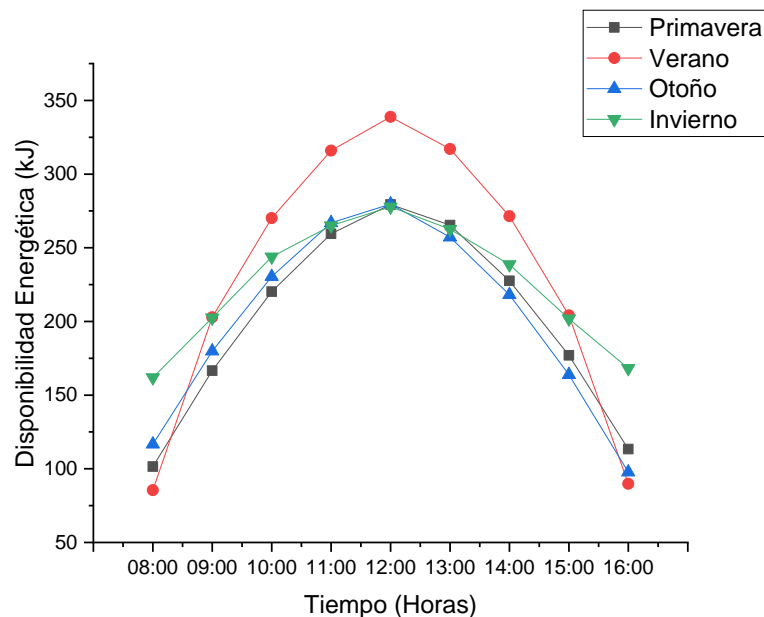


Figura 4.5. Disponibilidad energética en un CPC con receptor sin aletas.

4.2.1.2. CPC con receptor tubular con aletas

En esta sección se muestra el desarrollo de simulaciones de trazado de rayos de los colectores CPCs con aletas continuas y con aletas discontinuas. Este último fue evaluado experimentalmente (ver Sección 4.1).

4.2.1.2.1. CPC con aletas continuas

Este primer modelo presenta un receptor tubular de 1 metro de longitud, con dos aletas continuas con dimensiones de 25 mm de ancho y 3 mm de grosor. Este modelo se evaluó bajo las mismas condiciones que el CPC con receptor sin aletas, es decir, con una inclinación de 32° con respecto a la horizontal (ver Figura 4.6).

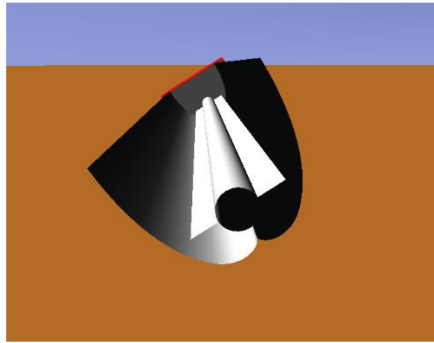


Figura 4.6. Receptor tubular con aletas continuas de 25 mm.

En la Tabla 4.2 se muestra la energía captada por el receptor de acuerdo con el análisis de trazado de rayos, detallado en estaciones del año y horas de sol, donde se aprecia que la captación energética de las 8 a las 16 horas incrementa significativamente en primavera, otoño e invierno en un 33%, 33% y 28.4%, respectivamente, en relación con lo observado en el receptor simple. Para el verano, el incremento es mínimo (2.6%) debido a que, al encontrarse el sol con una inclinación casi perpendicular a la latitud, la ubicación de las aletas provoca un sombreado mayor en el receptor, lo que ocasiona que el incremento de la energía total debido a las aletas sea despreciable.

Tabla 4.2. Disponibilidad energética en kJ CPC aleta continua

Hora	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
8	137.95	103.43	159.00	192.89
9	222.94	206.15	240.65	272.72
10	292.28	272.62	306.05	309.29
11	342.35	318.04	350.52	350.91
12	368.16	341.81	368.07	368.67
13	348.25	318.79	339.40	347.30
14	302.60	273.21	289.17	304.54
15	237.11	206.60	219.77	267.30
16	154.16	109.77	133.51	183.43
Total	2405.8	2150.42	2406.14	2597.05

En la Figura 4.7 se puede apreciar con más detalle lo comentado anteriormente. Se aprecia que en primavera, otoño e invierno la curva energética es similar de las 10 a las 14 horas, y en verano la captación es menor. Esto es debido a la inclinación del sol, la cual es casi perpendicular al horizontal en verano y el fenómeno de sombra producido por las aletas es más notorio, por lo que se sacrifica la eficiencia térmica. Sin embargo, esto no se considera un factor crítico, ya que durante esas temporadas el uso de agua caliente es menor ya que se registran las temperaturas ambiente más altas del año.

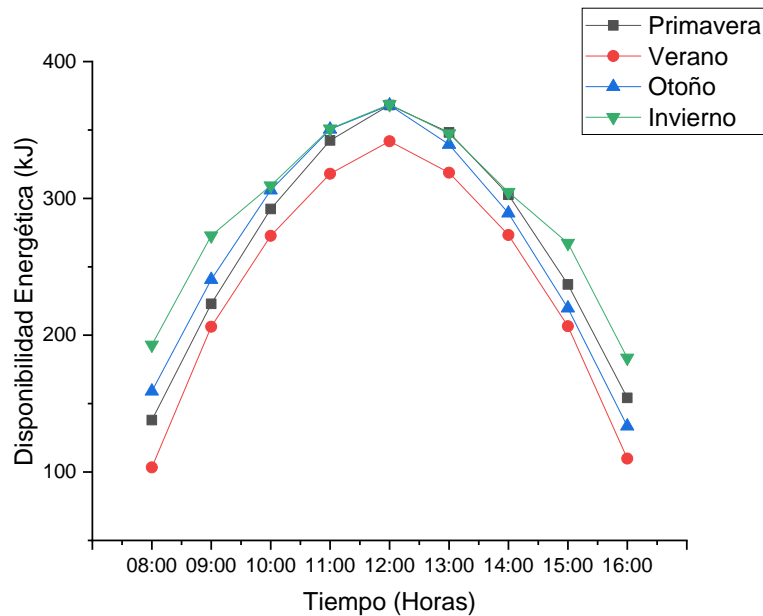


Figura 4.7. Energía captada por el receptor con aleta continua de 25 mm.

4.2.1.2.2. Aletas discontinuas

El modelo de aletas discontinuas consta de 10 aletas superiores y 9 aletas inferiores [70], todas de las mismas dimensiones de 25 mm de ancho por 52 mm de longitud y un grosor de 3 mm, con una distribución intercalada como se muestra en la Figura 4.8. El CPC con aletas discontinuas se desarrolló con la finalidad de utilizar menos material que en el CPC de aletas continuas, derivado del alto costo del cobre con el que se hacen las aletas, y al mismo tiempo tratar de mantener una mejora en el aprovechamiento energético en comparación con el CPC sin aletas.

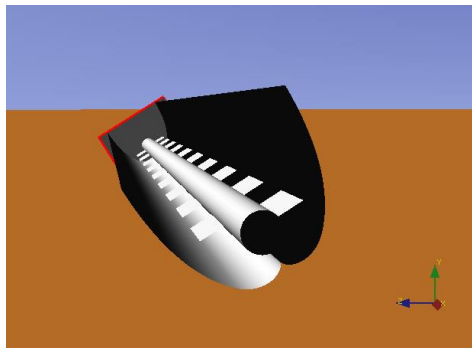


Figura 4.8. Receptor tubular con aletas discontinuas de 25 mm x 52 mm con un espesor de 3 mm.

Este modelo tiene la misma inclinación de 32° con respecto a la horizontal. Siguiendo la metodología de la sección anterior se obtuvo la energía captada por medio del trazado de rayos en cada estación entre las 8 y 16 horas como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Disponibilidad energética Receptor con aletas discontinuas en kJ

Hora	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
8	120.63	99.92	140.12	179.83
9	197.54	203.88	214.21	245.11
10	259.88	270.56	271.51	278.81
11	302.87	316.77	310.29	310.21
12	328.09	341.03	329.25	326.76
13	308.70	317.50	300.86	306.40
14	268.50	271.41	256.68	274.20
15	210.12	205.45	192.47	240.90
16	135.66	105.37	116.13	177.45
Total	2131.99	2131.89	2131.52	2339.67

Se puede observar en la tabla anterior que la energía total captada por el receptor con aletas discontinuas es similar en primavera, verano y otoño, lo cual se traduce como incrementos de captación de energía del 17.8%, 17.2% y 17.7%, respectivamente, en relación con el receptor sin aletas. En la Figura 4.9 se presenta una gráfica comparativa para cada una de las estaciones de las 8 a las 16 horas, donde se puede apreciar que, con las aletas discontinuas, se mantiene una captación energética similar en la primavera, verano y otoño. En el invierno la captación de energía es mayor que en las otras estaciones, sin embargo, el incremento de captación de energía en comparación con el receptor sin aletas es de un 15.7%, lo cual es menor al incremento alcanzado con el receptor con aletas continuas para esta estación. La disponibilidad energética en invierno alcanzada con el receptor de aletas discontinuas es 10% menor que la alcanzada con el receptor con aletas continuas, sin embargo, se logró una reducción de material de cobre utilizado en las aletas del 50.6%, por lo que resulta una opción atractiva en términos de costo/beneficio.

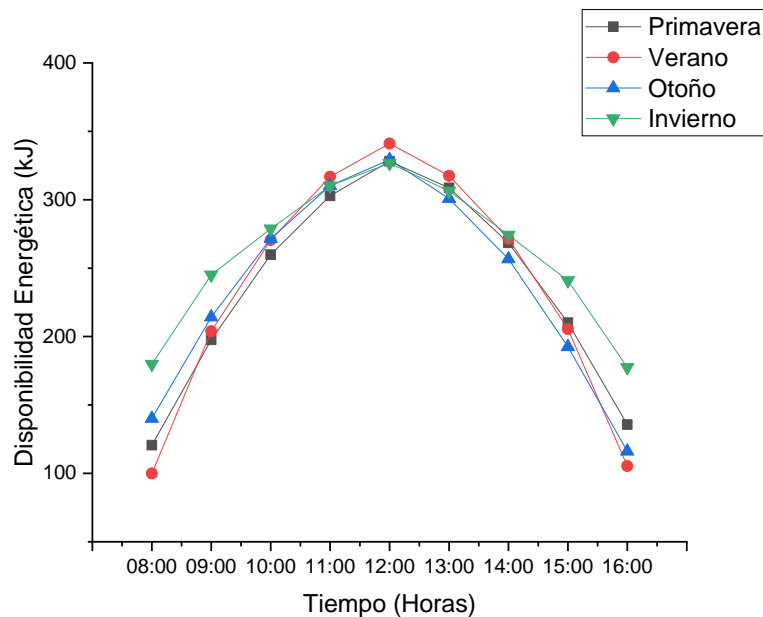


Figura 4.9. Disponibilidad energética por estación CPC con aletas discontinuas de 25 mm x 52 mm.

En la Tabla 4.4 que se compara la energía captada a las 12:00 horas de los tres modelos descritos anteriormente (sin aletas, con aletas continuas, con aletas discontinuas) en invierno, debido a que en esta época el uso de agua caliente es mayor. Se puede observar en la Tabla 4.4 que al incrementar el área de captación por medio de las aletas se obtiene un incremento considerable de aproximadamente del 17.6% y 32.7% con las aletas segmentadas y continuas, respectivamente, en comparación con el receptor sin aletas. También se concluye que el receptor

con aletas continuas es el que presenta mayor rendimiento de los tres modelos con un incremento del 12.8% con respecto al receptor de aletas segmentadas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, se utiliza un 100% más de material de cobre para la construcción de las aletas continuas lo cual podría encarecer el CPC sin que el beneficio energético lo compense.

Tabla 4.4. Energía captada en cada tipo de receptor a las 12:00 horas en invierno en kJ.

CPC con receptor tubular sin aletas	CPC con receptor tubular con aletas continuas	CPC con receptor tubular con aletas discontinuas
277.84	368.67	326.76

4.2.1.3. Modelos aletados propuestos

4.2.1.3.1. Receptor aletado de 13 mm y con forma en “V”

Dentro de las configuraciones propuestas de receptores aletados para los CPCs, se encuentra una configuración que se basa en un estudio presentado por Yurchenko (2015) el cual consiste en un receptor con aleta continuas de 13 mm con un ángulo de 25° con respecto al plano horizontal del colector. Esta configuración tiene la finalidad de reducir el material de cobre utilizado en las aletas al reducirse el ancho de estas de 25 mm a 13 mm, así como de minimizar el fenómeno de sombra que se presenta en el receptor tubular. El CPC tiene una inclinación de 32° con respecto a la horizontal (ver Figura 4.10).

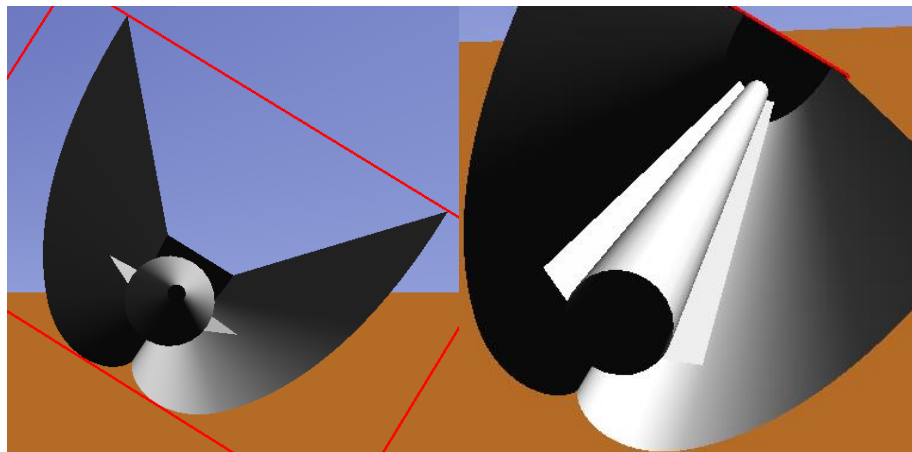


Figura 4.10. Receptor con aletas de 13 mm a 25° con respecto a la horizontal del colector.

4.2.1.3.2. Receptor aletado en “V” discontinuo

Siguiendo el mismo estudio de Yurchenko (2015), se propone ahora un receptor tubular con aleta discontinua en la misma posición en “V” igual al caso anterior, es decir, con un ángulo de 25° con respecto al plano horizontal del colector. En este caso se usan las dimensiones por aleta de 25

mm x 52 mm similar al colector experimental con aletas discontinuas y una inclinación de 32° con respecto a la horizontal.

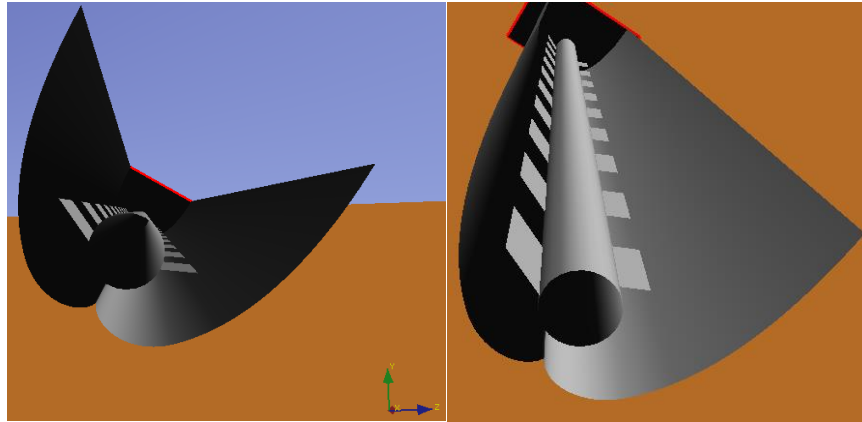


Figura 4.11. Receptor con aletas discontinuas de 25 mm x 52 mm en posición en “V”.

4.2.1.3.3. Receptor aletado continuo de 13 mm perpendicular.

Por último, se presenta una propuesta de aletas en posición vertical con base en el prototipo presentado por Karwa et al. (2015), la cual comprende dos aletas continuas de 13 mm colocadas perpendicularmente al plano horizontal del colector. El CPC tiene una inclinación de 32° con respecto a la horizontal (ver Figura 4.12).

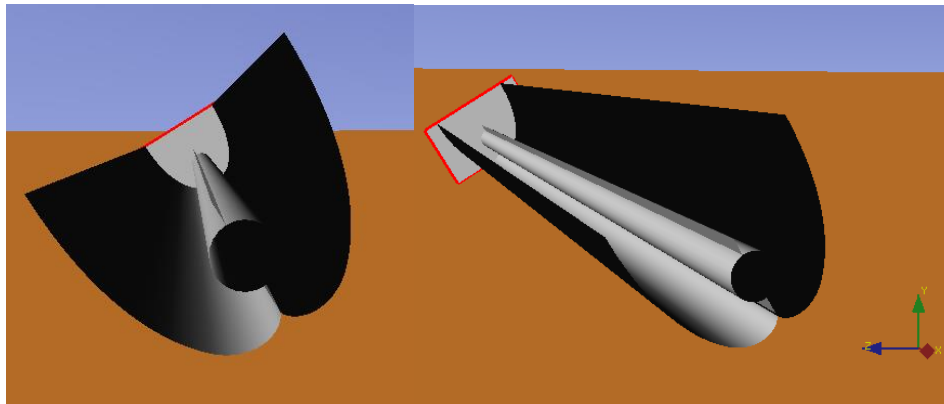


Figura 4.12. CPC con aleta perpendicular a la inclinación de 32° del colector.

4.2.1.3.4. Comparación entre los receptores aletados propuestos.

La disponibilidad energética obtenida con el análisis de trazado de rayos para cada uno de los modelos propuestos anteriores es presentada en la Tabla 4.5, en la cual se comparan los resultados junto con los del CPC con aletas continuas presentado en la Sección 4.2.1.2.1. Para este análisis comparativo se utilizaron en las condiciones de radiación del solsticio de invierno (21 de diciembre), al ser una época del año en la cual la radiación solar se ve disminuida.

En la Tabla 4.5 se puede observar que el modelo propuesto de aleta continua de 13 mm en posición vertical con respecto al plano del colector es el que arrojó la mayor energía disponible de entre los 3 últimos diseños propuestos, estando a las 12 horas, un 12.4% y 19% arriba de los CPCs con aletas en “V” de 13 mm y 25 mm, respectivamente. Sin embargo, este CPC con aletas verticales aún se encuentra un 6.4% por debajo del CPC con aletas continuas de 25 mm.

Tabla 4.5. Comparativo de energía entre CPC propuestos en kJ

Hora	Aleta “V” de 13 mm continua	Aleta “V” segmentada de 25 mm	Aleta Vertical continua 13 mm	Receptor de aleta continua de referencia
8	190.97	178.57	154.03	192.89
9	217.72	221.93	227.80	272.72
10	258.99	265.72	286.57	309.29
11	277.42	294.66	328.94	350.91
12	289.86	306.72	344.97	368.67
13	275.76	291.39	325.74	347.30
14	252.93	260.10	280.90	304.54
15	216.57	219.30	219.63	267.30
16	181.38	175.37	155.91	183.43
Total	2161.6	2213.76	2324.49	2597.05

En la Figura 4.13 se presenta una gráfica, donde se aprecia que, de las tres propuestas, la que obtuvo los valores más cercanos al CPC aletado continuo con aletas de 25 mm (referencia) fue el de aleta continua de 13 mm en posición vertical, entre las 8 y 16 horas. Si bien, este modelo no alcanza la captación de energía observada en el CPC de referencia, con este diseño (el receptor con aletas vertical continuas de 13 mm) se ahorra un 48% de material con respecto al receptor con aleta continua de 25 mm.

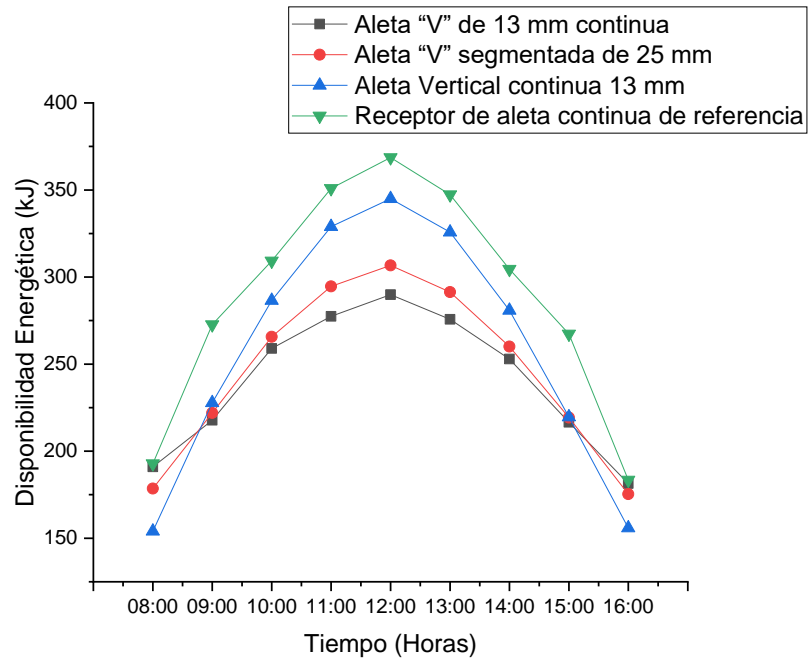


Figura 4.13. Gráfico comparativo entre propuestas para el 21 de diciembre.

La Figura 4.14 presenta imágenes de la distribución de fotones de cada propuesta planteada en este trabajo a las 9:00, 12:00 y 15:00 horas del 21 de diciembre. La inclinación del colector CPC, ayuda a que en el sombreado que se genera por las aletas discontinuas en posición en "V" y aletas continuas en posición vertical sea menor que con los otros casos, y que la energía aprovechada no se vea afectada.

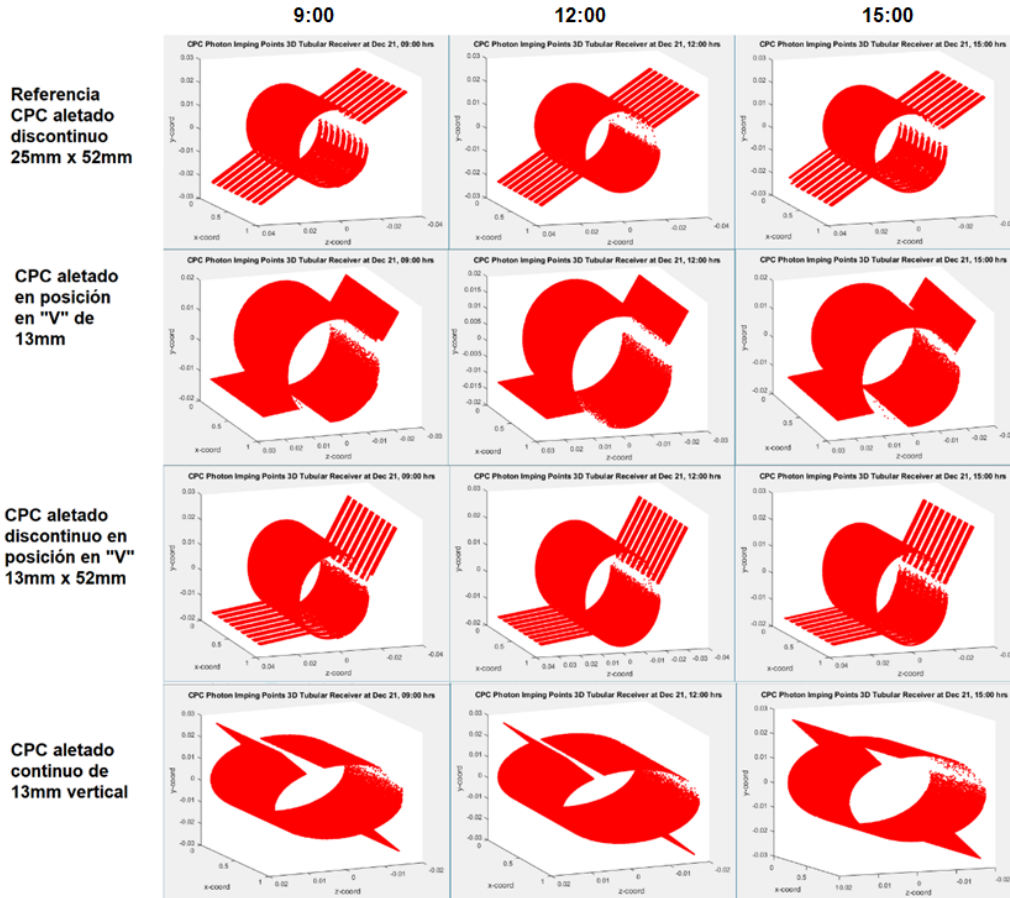


Figura 4.14. Impacto de fotones por cada CPC propuesto para el 21 de diciembre.

4.2.1.3.5. Receptores propuestos con diferente diámetro

Como siguiente estudio, se procedió a realizar cambios en la geometría del receptor sin aletas, es decir, se cambió el diámetro del receptor. Esto se hizo con la finalidad de incrementar el área del receptor y estudiar este efecto en la captación de energía. Se analizó el receptor sin aletas por medio del trazado de rayos usando los dos siguientes casos: en el primer caso disminuyendo a 1" el diámetro del tubo receptor a partir del diámetro inicial de 1 ¼", y en el segundo caso aumentando el diámetro a 1 ½". En ambos casos de estudio se mantuvieron las mismas dimensiones del colector parabólico. Como se puede apreciar en la Figura 4.15 Se analizaron dos temporadas características de la zona de Mérida, verano e invierno, siendo los días de análisis los días 21 de junio como día característico de verano y 21 de diciembre como el día representativo de invierno. Esto se hizo con la finalidad de observar la influencia del sombreado producido por el mismo receptor en la captación de energía, dependiendo el ángulo de incidencia del sol, es decir, la hora del día.

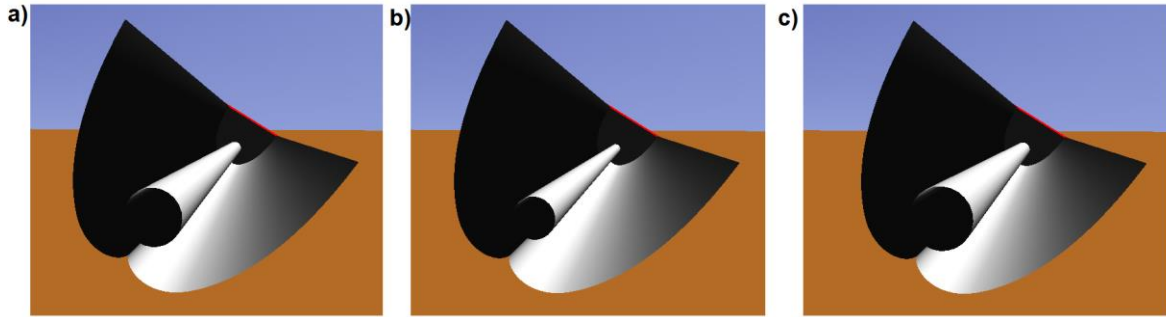


Figura 4.15. CPCs con: a) receptor sin aletas de 1 1/4" de diámetro; b) receptor sin aletas de 1" de diámetro; c) receptor sin aletas de 1 1/2" de diámetro

La Tabla 4.6 muestra los resultados del trazado de rayos para el verano y la Figura 4.16 muestra la gráfica correspondiente. Se puede ver en la Figura 4.16 que hay un incremento en la captación de energía cuando el diámetro del receptor es de 1 1/4" en comparación con el receptor de 1" de diámetro. La captación de energía a lo largo del día cuando el diámetro se incrementa de 1" a 1 1/4" y 1 1/2" es de 18.9% y 19.8%, respectivamente. La diferencia de captación de energía entre el receptor de 1 1/4" y el de 1 1/2" de diámetro resulta insignificante, sin embargo, a las 12 horas, el de 1 1/4" capta más energía (8.6%). La Figura 4.17 muestra el mapeo de fotones de impacto registrado por el análisis del trazado de rayos, donde se puede apreciar que a las 12 horas el receptor de 1 1/2" genera un sombreado mayor en los lados por lo que la captación de energía en este horario es menor que con el receptor de 1 1/4".

Tabla 4.6. Energía en kJ captada por cada receptor el 22 de junio.

Hora	Diámetro		
	1"	1 1/4"	1 1/2"
08:00	85.52	149.76	154.56
09:00	202.8	236.17	239.21
10:00	270.13	302.49	306.49
11:00	315.99	349.72	351.65
12:00	338.89	408.12	375.78
13:00	317.05	351.30	352.58
14:00	271.42	304.43	309.24
15:00	204.15	238.48	241.83
16:00	89.86	152.69	157.99
Total	2095.81	2493.17	2489.33

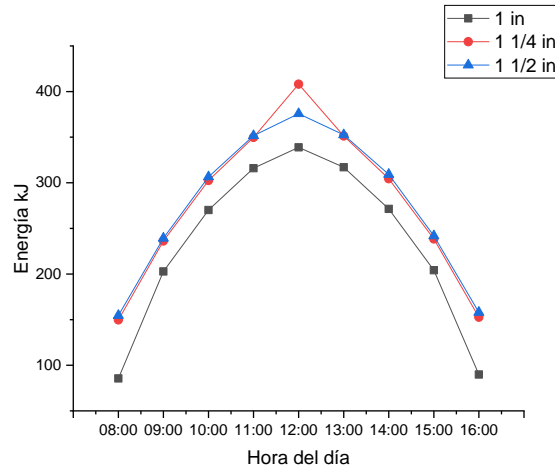
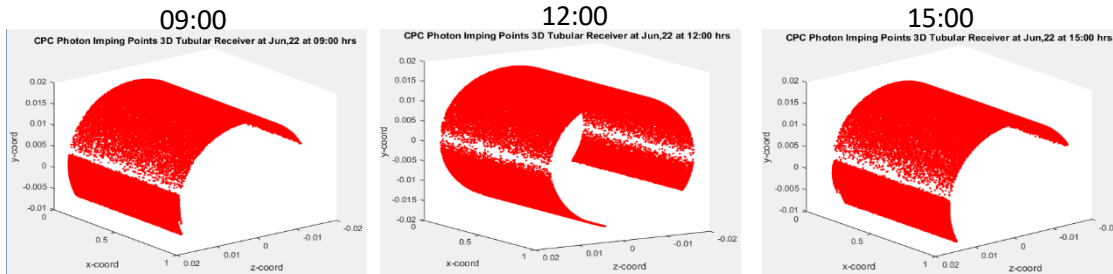


Figura 4.16. Gráfico comparativo de receptores sin aletas con diferentes diámetros en verano.

Receptor sin aletas de 1 1/4" de diámetro



Receptor sin aletas de 1 1/2" de diámetro

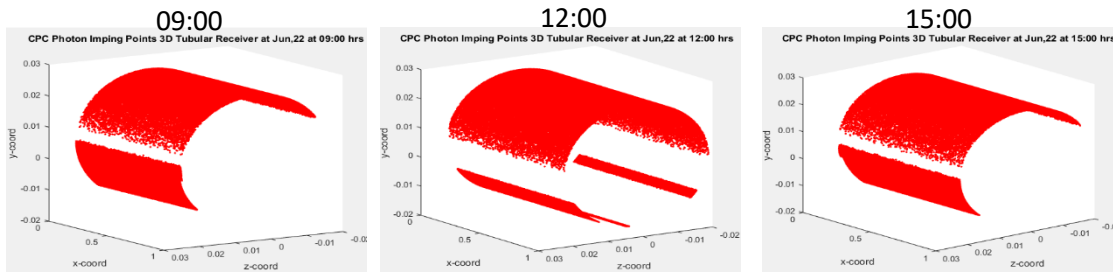


Figura 4.17. Mapeo de fotones en los receptores con diámetros de 1 1/4" y 1 1/2" en verano.

De la misma manera se procedió a realizar la comparación de energía captada en la temporada de invierno (22 de diciembre) para los receptores con diferentes diámetros. Los resultados del análisis de trazado de rayos se muestran en la Tabla 4.7 y la Figura 4.18, donde se puede observar un incremento de energía captada al aumentar el diámetro de 1" a 1 1/4", siendo este incremento de hasta un 32% a las 12 horas. La diferencia de captación de energía entre 1 1/4" y 1 1/2" de diámetro es insignificante en todos los horarios.

Tabla 4.7. Captación de energía en kJ en invierno.

Hora	Diámetro		
	1"	1 1/4"	1 1/2"
08:00	161.91	156.43	159.41
09:00	202.43	239.93	243.80
10:00	243.84	304.62	309.12
11:00	265.02	351.28	354.27
12:00	277.84	373.47	375.00
13:00	262.63	347.07	350.16
14:00	238.64	301.54	304.09
15:00	201.84	233.72	236.78
16:00	168.18	148.05	152.15
Total	2022.33	2456.10	2484.78

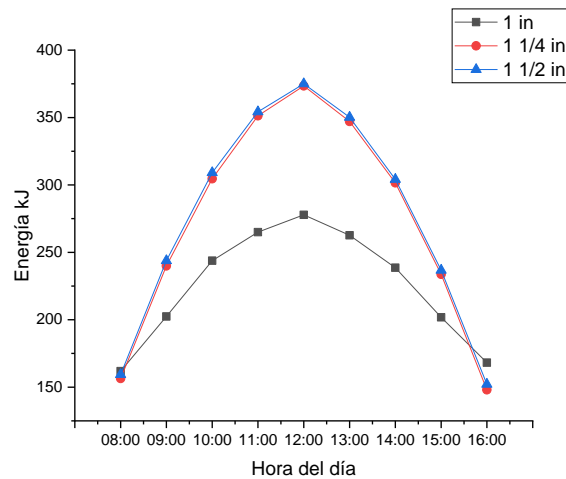
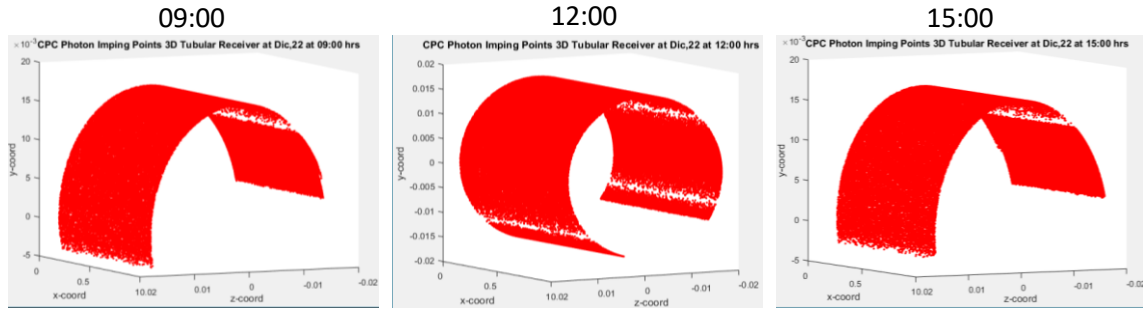


Figura 4.18. Gráfico comparativo de receptores sin aletas con diferentes diámetros en invierno.

La Figura 4.19 muestra el mapeo de fotones en la superficie de los receptores de diferente diámetro, donde se puede apreciar que a las 12 horas el receptor de 1 1/2" genera un sombreado mayor en el lado derecho debido a la inclinación del sol en esta época del año. Sin embargo, la captación de energía para el receptor de 1 1/2" en este horario es similar al receptor de 1 1/4" ya que, aunque el receptor de 1 1/2" genera más sombreado, su mayor diámetro compensa esa pérdida de captación de energía.

Receptor sin aletas de 1 1/4" de diámetro



Receptor sin aletas de 1 1/2" de diámetro

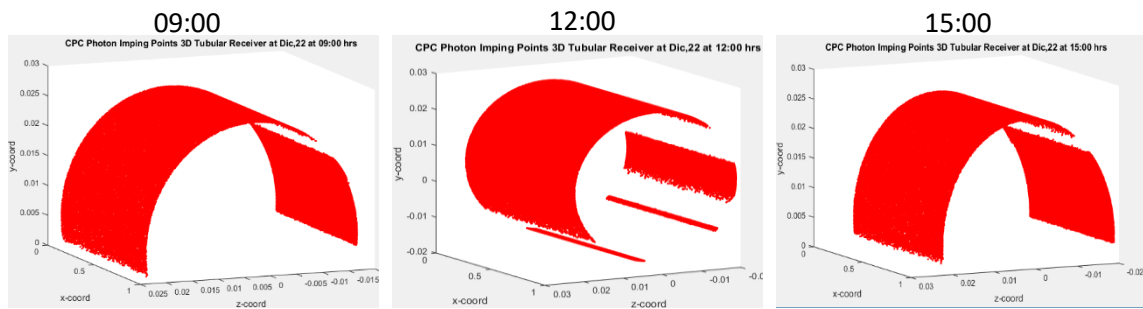


Figura 4.19. Mapeo de fotones en los receptores con diámetros de 1 1/4" y 1 1/2" en invierno.

Los resultados de esta sección han demostrado que la mejor opción en diámetro para los receptores sin aletas es el de 1 1/4", ya que, la captación de energía con este diámetro es similar al receptor de mayor diámetro, pero con la ventaja de que el tubo de 1 1/4" es más económico.

4.2.2. Análisis FEM-CFD

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones FEM-CFD, las cuales se realizaron para los CPCs sin aletas y con aletas segmentadas, para poder validar las simulaciones con los CPCs experimentales (Figura 36). Adicionalmente se modeló con esta técnica numérica el CPC con aletas continuas para hacer una comparación entre estos tres sistemas. En la Figura 4.20a se muestra la comparación de la temperatura de salida obtenida de la simulación FEM-CFD y la temperatura de salida medida experimentalmente para ambos colectores CPC entre las horas de 6 a.m. a 6 p.m. del 1 de marzo de 2020, fecha en que se recolectaron las mediciones experimentales. Es posible observar que los resultados de las simulaciones y las mediciones experimentales son muy similares con una diferencia de menos de 0.5 °C. Estas curvas se obtuvieron con velocidades de entrada de agua de 0.0075 y 0.007 m/s para el colector sin aletas y con aletas segmentadas respectivamente. Esta diferencia podría atribuirse a pequeñas variaciones del caudal másico entre cada sistema CPC evaluado

experimentalmente; sin embargo, la diferencia entre el valor de las velocidades de entrada utilizadas en la simulación y el valor experimental es inferior al 10%.

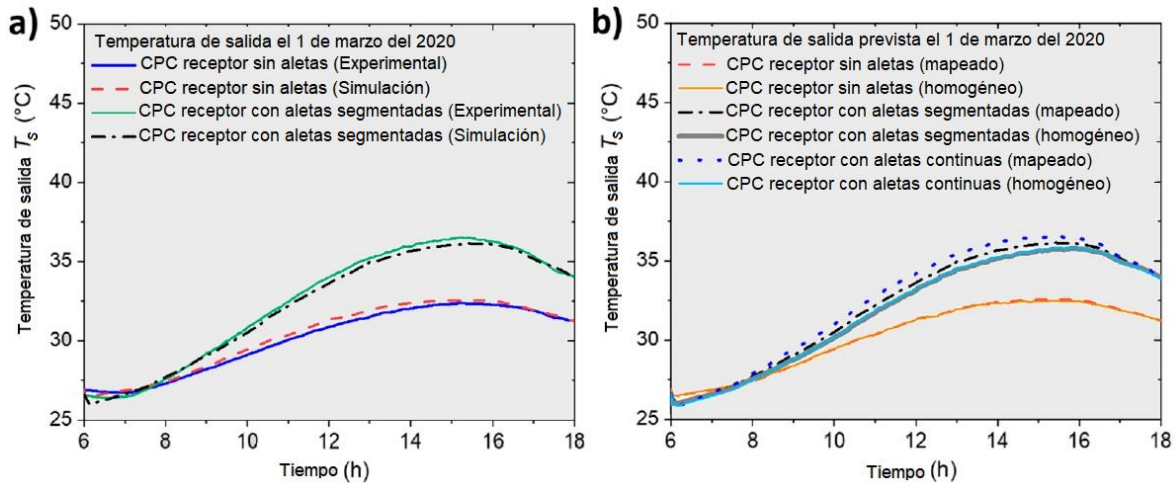


Figura 4.20. a) Comparación entre las temperaturas de salida experimentales y las obtenidas en las simulaciones FEM-CFD del receptor sin aletas y del receptor con aletas, del 1 de marzo de 2020; b) Temperaturas de salida obtenidas numéricamente para los CPCs con receptores sin aletas, con aletas segmentadas y con aletas continuas utilizando ya sea una carga de flujo de calor mapeada o una carga de flujo de calor homogénea.

La Figura 4.20b muestra las temperaturas de salida obtenidas numéricamente para los CPCs sin aletas, con aletas segmentadas y con aletas continuas. En esta figura se comparan los resultados obtenidos usando el mapeo de la irradiación obtenida en el trazado de rayos sobre la superficie del modelo FEM (Sección 3.8.1) con los resultados obtenidos al aplicar una irradiación homogénea en toda la superficie del receptor. Se puede observar en la Figura 67b que la diferencia de las temperaturas de salida usando ambos métodos es insignificante para el receptor sin aletas; sin embargo, para los receptores aletados existe una diferencia de hasta 1 °C (receptor con aletas continuas). Estos resultados demuestran la ventaja de utilizar la metodología descrita en este trabajo para mapear el flujo de energía en la superficie de los receptores con aletas para obtener predicciones más precisas.

En la Figura 4.21 se muestra los contornos de temperaturas obtenidas con las simulaciones FEM-CFD para los tres tipos de receptores a las 12 p.m. (mediodía) del 1 de marzo de 2020. Se puede observar que la temperatura aumenta desde la entrada hasta la salida del receptor en la dirección del flujo debido a la transferencia de calor del receptor al agua a lo largo de este (Figura 4.21a, Figura 4.21c y Figura 4.21d). Las secciones transversales muestran que la temperatura del agua es más alta en las zonas más cercanas a la pared del tubo del receptor y más fría en el centro del tubo. También se puede observar que el tubo está más caliente en las zonas cercanas a las

aletas (Figura 4.21d). La Figura 4.21 muestra que las temperaturas de salida más altas se obtuvieron con los receptores aletados y en particular con el de aletas continuas (Figura 4.21e). Esto se debe a la energía adicional recibida en la superficie del receptor aletado, debido a una mayor área superficial de captación, que es consecuentemente transferida al agua.

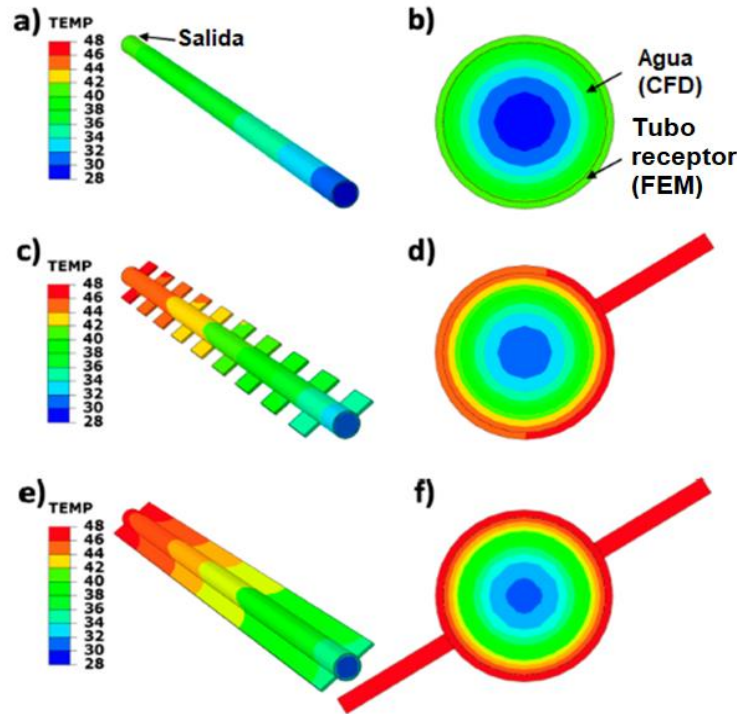


Figura 4.21. Contorno de temperaturas en los receptores de los CPCs y en el fluido, y su respectiva sección transversal en la salida del receptor a las 12 p.m. (mediodía) del 1 de marzo de 2020: receptor sin aletas (a, b); receptor con aletas segmentadas (c, d); receptor CPC con aletas continuas (e, f).

Para estudiar el efecto de las aletas, se obtuvo con las simulaciones FEM-CFD la diferencia de temperatura $\Delta T = T_e - T_s$ obtenida de las de 6 a.m. a 6 p.m. el 1 de marzo de 2020 (finales de invierno) (Figura 4.22a). Para ello se utilizó una temperatura de entrada constante T_e de 27 °C (correspondiente a la T_e inicial medida experimentalmente en ese día) y una velocidad de entrada constante de 0.0076 m/s (0.36 L/min) para los diferentes tipos de receptores (sin aletas, con aletas segmentadas, aletas continuas). La Figura 4.22a también muestra la potencia (energía por unidad de tiempo) en la superficie del receptor obtenida con las simulaciones de trazado de rayos. En la Figura 4.22b se ve una imagen obtenida por medio de trazado de rayos mostrando el ángulo incidente de los rayos solares que impactan el receptor del CPC el mismo día al mediodía (12 p.m.) para fines ilustrativos. En la Figura 4.22a se puede observar que la mayor potencia disponible se obtiene con el receptor con aletas continuas, mientras que la menor potencia disponible se obtiene con el receptor sin aletas. Esto resulta en un aumento en ΔT con el aumento

de la superficie del receptor debido a las aletas. Las Figura 4.22c y Figura 4.22d muestran los resultados, siguiendo la misma metodología, para el 15 de enero de 2021 (inicios del invierno) con una temperatura de entrada constante T_e de 23 °C (correspondiente a la T_e inicial de la medición experimental en ese día) y una velocidad de entrada constante de 0.0076 m/s (0.36 L/min) para los diferentes tipos de receptores. Se puede observar en las Figura 4.22a y Figura 4.22c que se obtiene una ΔT similar para ambos días (principios y finales del invierno) cuando se comparan colectores similares entre sí, ya que la potencia media (de 8 a.m. a 5 p.m.) en las superficies receptoras es similar en ambos días. Las Figura 4.22e y Figura 4.22f muestran los resultados para el verano (9 de julio de 2020) con una temperatura de entrada constante T_e de 34 °C (correspondiente a la T_e inicial medida experimentalmente en ese día) y una velocidad de entrada constante de 0.0076 m/s (0.36 L/min) para los diferentes receptores. Se puede observar en la Figura 4.22e que, para el verano, la potencia media en las superficies de los diferentes receptores es similar debido al ángulo incidente de los rayos solares que los impactan Figura 4.22f, lo que da lugar a un aumento similar de ΔT para los distintos tipos de receptores. Cabe señalar que la potencia en los CPC con aletas es inferior en verano en comparación con el invierno (Tabla 4.8), lo cual se atribuye al efecto de sombreado de las aletas en el receptor.

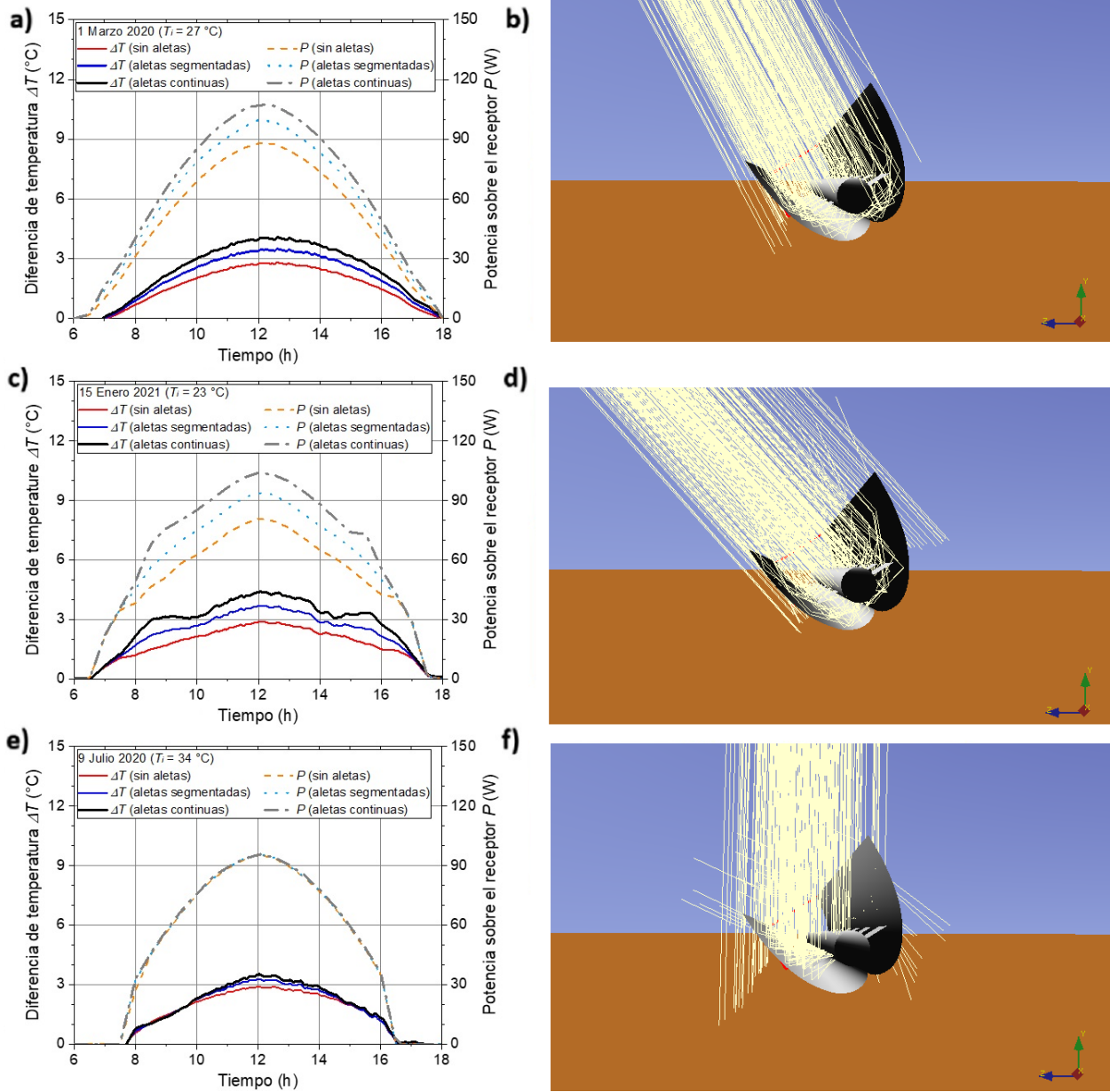


Figura 4.22. Diferencia de temperatura ΔT y potencia en la superficie del receptor para los diferentes colectores CPC (imagen izquierda) e imagen del ángulo de incidencia de los rayos solares que impactan al CPC al mediodía para fines de lustración (imagen derecha): (a, b) finales del invierno (1 de marzo de 2020); (c, d) principios del invierno (15 de enero de 2021); (e, f) verano (9 de julio de 2020).

Tabla 4.8. Potencia promedio (de las 8 a.m. a las 5 p.m.) sobre las superficies de los diferentes receptores a finales de invierno, principios de invierno y en verano.

Receptor CPC	Potencia Promedio P (W) 1 de marzo del 2020 (final de invierno)	Potencia Promedio P (W) 15 de enero del 2021 (principio de invierno)	Potencia Promedio P (W) 9 de julio del 2020 (verano)
Sin aletas	61.4	59.2	62.2
Con aletas segmentadas	69.9	69.5	62.8
Con aletas continuas	76.2	78.5	63.3

4.2.3. Efecto de la velocidad de flujo másico

La Figura 4.23a muestra la diferencia máxima de temperatura ΔT versus el caudal másico \dot{m} obtenida con la simulación FEM-CFD, mientras que la Figura 4.23b muestra la eficiencia térmica η_t versus \dot{m} , para los diferentes tipos de colectores CPC (sin aletas, con aletas segmentadas y con aletas continuas) del 1 de marzo de 2020 con una temperatura de entrada constante de 27 °C. Cabe mencionar que el caudal másico experimental fue de ~0.005 kg/s (0.36 L / min) mientras que los demás valores de \dot{m} fueron simulados. Se puede observar en la Figura 4.23a que las curvas tienen un comportamiento similar para todos los receptores, es decir, hay un aumento en la ΔT máxima con la disminución en el \dot{m} como es de esperarse ya que, un \dot{m} bajo permite una mayor transferencia de calor del receptor al agua. Sin embargo, un \dot{m} bajo podría resultar en una menor disponibilidad de agua caliente. La mayor ΔT máxima se observó para el CPC con el receptor con aletas continuas para todos los caudales másicos estudiados.

La Figura 4.23b muestra que, para todos los receptores, hay un incremento en la eficiencia térmica η_t con el incremento de \dot{m} de 0.001 a 0.002 kg/s. Para el CPC con aletas continuas, hay un ligero incremento de η_t con el incremento de \dot{m} de 0.002 a 0.005 kg/s y un decremento en η_t de 0.005 a 0.01 kg/s. Para el CPC con aletas segmentadas, la variación de η_t de 0.002 a 0.005 kg/s es despreciable, sin embargo, η_t disminuye de 0.005 a 0.01 kg/s. Para el CPC sin aletas, η_t disminuye de 0.002 a 0.006 kg/s y continúa disminuyendo a una tasa mayor de 0.006 a 0.01 kg/s.

El efecto del caudal másico \dot{m} sobre la eficiencia térmica η_t ha sido observado en estudios previos [101] y es atribuido a la tasa de transferencia de calor. El incremento inicial de η_t con el incremento de \dot{m} es atribuido a la mayor velocidad del agua, que, a su vez, aumenta la tasa de transferencia de calor al agua [102]; sin embargo, después de que se alcanza un valor óptimo de \dot{m} , η_t disminuye con el incremento de \dot{m} .

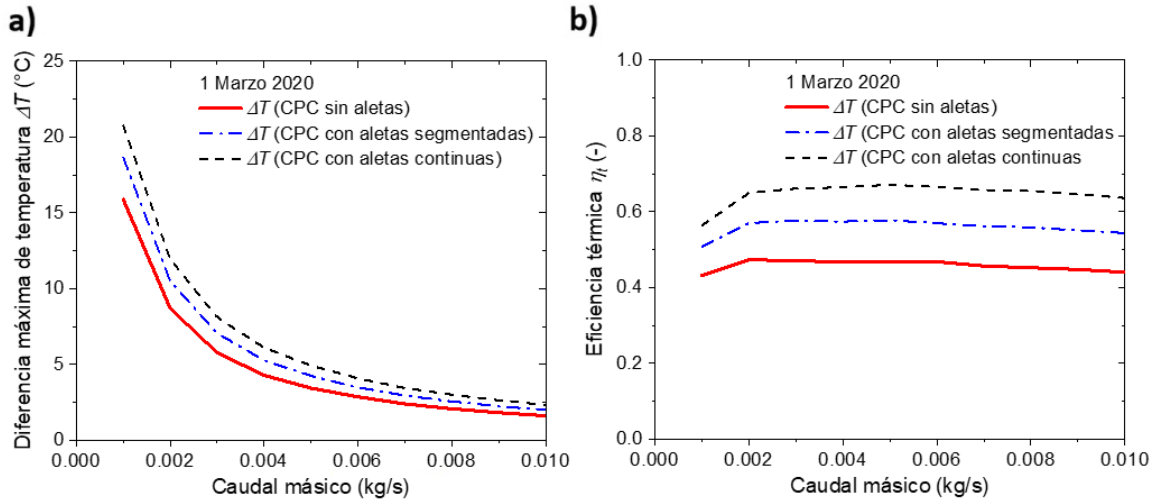


Figura 4.23. Resultados de las simulaciones FEM-CFD para el 1 de marzo de 2020 con una temperatura de entrada constante de 27 °C para los diferentes tipos de receptores: a) Diferencia de temperatura máxima ΔT versus el caudal másico \dot{m} . b) eficiencia térmica η_t versus el caudal másico \dot{m} ,

4.2.4. Análisis Económico

Un análisis económico permite estimar la rentabilidad de los prototipos experimentales. Para este tipo de tecnología y de acuerdo con los objetivos del proyecto, se buscó que la selección de los materiales empleados en la construcción de los colectores CPC, se pudieran adquirir fácilmente en el mercado local y cumplieran con los requerimientos físico-mecánicos de la aplicación. Es importante señalar que el costo del mantenimiento para los sistemas propuestos es bajo y de fácil realización.

La comercialización de colectores CPC ya se encuentra disponible tanto en Europa como en Estados Unidos de América, donde la tecnología ya se encuentra disponible a nivel industrial. Para la implementación de este tipo de colectores en uso residencial se tuvo que realizar un ajuste en las dimensiones como se describió en los capítulos anteriores considerando los factores propios del lugar de instalación del equipo, como es el caso de la radiación disponible, latitud del lugar de instalación, el costo de fabricación y mantenimiento del colector. La técnica de soldadura que se implementó para la fabricación del CPC fue de tipo convencional (soldadura con estaño), ya que los consumibles son de fácil acceso. Para la fabricación en serie del CPC se podría utilizar procesos de soldadura automatizada.

4.2.4.1. Inversión inicial

En esta parte del análisis, se procede a realizar un cálculo de la inversión inicial requerida para la construcción de los colectores CPC experimentales (Figura 3.2). Se entiende como inversión inicial todo aquello que está constituido por todo el conjunto de bienes y servicios que se requieren durante la etapa de fabricación. En la sección A de la Tabla 4.9 se muestra una lista de materiales utilizados para la construcción del prototipo experimental CPC con receptor sin aletas y los costos relacionados en pesos mexicanos, de acuerdo a lo plasmado en el trabajo de Terrón [70]. El costo de construcción calculado para un colector con receptor tubular sin aletas es de 2.837.45 pesos.

Tabla 4.9. Relación de costos (en pesos mexicanos) del material para la construcción de un receptor tubular sin aletas.

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Subtotal	Cantidad Neta	Subtotal Neto.	A
Tubo de cobre de 32 mm	1	\$ 246.98	\$ 246.98	1	\$ 246.98	
Lámina de aluminio de alta reflectancia	1	\$ 1,426.76	\$ 1,426.76	0.2251	\$ 321.16	
Reducciones tipo campana de 32 a 19 mm	1	\$ 29.68	\$ 29.68	2	\$ 59.36	
Pintura de alta temperatura negro mate (aerosol)	2	\$ 117.66	\$ 235.32	1	\$ 117.66	
Resinas de poliuretano A+B (970 gr)	1	\$ 1,484.00	\$ 1,484.00	1	\$ 1,484.00	
Perfiles de aluminio de 19 * 1.59 mm	1	\$ 109.18	\$ 109.18	0.4369	\$ 47.70	
Lija para metal	1	\$ 15.90	\$ 15.90	1	\$ 15.90	
Soldadura de alambre de estaño rollo de 100 gr	1	\$ 210.94	\$ 210.94	0.502	\$ 105.89	
Pasta para soldadura de estaño	1	\$ 24.38	\$ 24.38	1	\$ 24.38	
Vidrio plano ultra claro 0.30 m2	1	\$ 84.80	\$ 84.80	1	\$ 84.80	
Foamular 250 25* 1219*2438 mm	1	\$ 391.14	\$ 391.14	0.2195	\$ 85.86	
Pija multiuso 12* 38 mm	70	\$ 0.78	\$ 54.60	70	\$ 54.60	
Pija multiuso 12* 51 mm	20	\$ 1.72	\$ 34.40	20	\$ 34.40	
Madera triplay 19* 1220*2440 mm	1	\$ 486.54	\$ 486.54	0.2048	\$ 99.64	

Lámina de aluminio 1220* 1000 mm	2	\$ 127.20	\$ 254.40	0.4333	\$ 55.12	
Total					\$ 2,837.45	
Solera de cobre de 25* 3mm	1	\$ 752.10	\$ 752.10	0.3333	\$ 250.67	B
Total					\$ 3,088.13	

De forma similar, se realizó un análisis de costos de un concentrador CPC con aletas segmentadas, el cual se muestra en la sección B de la Tabla 4.9. Para este diseño, se agrega una solera de cobre que se utiliza para la construcción de las aletas, por lo que el costo total del CPC con aletas segmentadas es de 2.837.45 pesos, lo cual es equivalente al costo del receptor sin aletas más el costo de la solera.

Se puede observar en la Tabla 4.9 que el CPC con aletas segmentadas tiene un costo 8.8% mayor que el CPC sin aletas debido al uso de la solera de cobre para las aletas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el CPC con aletas segmentadas tiene una eficiencia mayor que el CPC sin aletas (Figura 4.1).

Los resultados presentados han demostrado que el diseño y la fabricación de un colector CPC de tamaño pequeño, de bajo costo y bajo mantenimiento es factible, y éste podría usarse para aplicaciones residenciales y, al mismo tiempo, promover una menor huella ambiental y sostenibilidad mediante el uso de energía solar para calentar agua. Entre las ventajas técnicas de los CPC's propuestos se encuentran su pequeño tamaño, fácil maniobrabilidad durante la instalación y bajo peso. El área y el peso de los CPC's propuestos (sin y con aletas segmentadas) es de 0.22 m² y ~5 kg, respectivamente. Esto contrasta con el área y el peso de 1.1 m² y 30 kg, respectivamente, para el colector de placa plana desarrollado previamente en el CICY [103], o con el área y peso de 1.6 m² y ~30 kg, respectivamente, para un colector de tubo de vacío comercial [104]. El tamaño reducido y el bajo peso de los CPC propuestos les dan la ventaja de poder ser utilizados en áreas remotas y de bajos ingresos, donde los techos de algunas casas son pequeños y están hechos de materiales no estructurales. Otra ventaja de los CPCs propuestos es el bajo mantenimiento y sus costos asociados porque los materiales para la fabricación de los CPCs están disponibles localmente y las reparaciones no son complicadas [49].

Una de las ventajas económicas de los CPC propuestos en este trabajo es el bajo costo de fabricación, lo cual se puede ver en la Tabla 4.10, en la cual se presenta el costo de fabricación estimado en pesos del receptor de los CPCs sin aletas y con aletas segmentadas, así como de

un colector de placa plana. En la Tabla 4.10 también se muestra el precio de venta al público de un colector de tubos de vacío comercial a manera de comparación. Puede verse que el costo de fabricación de los CPC propuestos es menor que las otras opciones. El costo del receptor con aletas segmentadas es un 40% más alto que el del receptor sin aletas; sin embargo, la eficiencia media medida del CPC con aletas segmentadas es un 37% más alta que la del CPC sin aletas en un día de finales de invierno, cuando aumenta la necesidad de agua caliente. Vale la pena aclarar que para trabajos futuros aun es necesario un análisis tecno-económico a detalle de los CPCs propuestos para poder realizar una comparación justa con otros colectores disponibles y para evaluar la incorporación de aletas al receptor debido al alto precio comercial del cobre.

Tabla 4.10. Costo de fabricación estimado para colectores CPCs y un colector de placa plana y costo en el mercado de un colector de tubos de vacío.

	Receptor sin aletas	Receptor con aletas segmentadas	Colector de placa plana	Colector de tubos de vacío*
Tubo de cobre, aletas y accesorios	\$ 464.60	\$ 949.40	\$ 1,313.00	--
Lámina y soportes de acero	\$ 222.20	\$ 222.20	\$ 303.00	--
Lámina de aluminio	\$ 404.00	\$ 404.00	--	--
Marco de aluminio	--	--	\$ 303.00	--
Aislamiento térmico	\$ 121.20	\$ 121.20	\$ 202.00	--
Cubierta de vidrio	\$ 101.00	\$ 101.00	\$ 404.00	--
Costo Total	\$ 1,313.00	\$ 1,797.80	\$ 2,525.00	\$ 6,060.00

*Valor comercial en el mercado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se propuso una metodología teórico-experimental para la predicción del comportamiento energético de un sistema CPC. Se estudiaron por comparación teórica y experimental tres colectores solares CPC: con receptor sin aletas, con aletas continuas y con aletas segmentadas, analizando el rendimiento energético en diferentes condiciones de trabajo durante un año estacional. Con los resultados teóricos, se obtuvieron resultados detallados en cuanto al diseño y la eficiencia de este tipo de colectores.

La metodología para realizar el análisis teórico empleó diferentes softwares: el software Tonatiuh para el análisis de trazado de rayos que se utilizó para estimar la irradiancia (energía por unidad de área por unidad de tiempo) captada por el receptor de los CPCs. La radiación se procesó en Matlab y Excel para mapearla en la superficie del receptor del modelo FEM construido en el software Abaqus. Por último, en Abaqus se realizó una simulación acoplada FEM-CFD para el análisis de transferencia térmica del receptor al agua y de esta forma poder predecir el comportamiento térmico de los diferentes sistemas en diferentes épocas del año.

De este trabajo se puede concluir los siguientes puntos:

- El modelo numérico para calcular las temperaturas en el colector solar puede ser utilizado con parámetros fácilmente medibles y los resultados arrojados por el modelo numérico se asemejan a los valores experimentales.
- Se demostró que es posible la implementación de un colector CPC del tipo estacionario, es decir, sin la necesidad de la instalación de un sistema de seguimiento solar para la captación de la energía solar en un día.
- Utilizando un colector CPC de tamaño pequeño y baja temperatura con un área de apertura de 0.18 m^2 para el calentamiento de agua en aplicaciones residenciales es factible.
- Con respecto al análisis experimental de los CPCs, se observó que con el sistema de aletas segmentadas se obtiene una eficiencia térmica de 57% mientras que para el CPC sin aletas la eficiencia térmica fue del 42% para un día a finales de invierno, concluyendo que el CPC de aletas segmentadas es la opción que aprovecha de mejor forma la energía solar.
- Se consiguió vincular los resultados de un análisis óptico por trazado de rayos (software Tonatiuh) al software FEM Abaqus.
- La metodología numérica propuesta incluyó el mapeo de la irradiación obtenida por medio del trazado de rayos en el modelo FEM del receptor, el cual se acopló con un modelo CFD

para estimar la temperatura del agua, siendo el modelo numérico capaz de describir el rendimiento térmico del colector CPC.

- En cuanto a los receptores aletados propuestos analizados por medio del trazado de rayos, se concluye que el receptor con aletas continuas verticales de 13 mm tiene un gran potencial para ser utilizado en un CPC, ya que las aletas continuas son más fáciles de implementar y unir al receptor tubular que las aletas segmentadas, se utiliza menos material que en el receptor con aletas continuas de 25 mm y se obtiene una mayor captación de energía que con el receptor con aletas segmentadas de 25 mm x 52 mm.

Este trabajo se basó en la elaboración de un diseño para un colector CPC estacionario con la finalidad de economizar costos en la construcción del colector, y de esta manera hacer viable un sistema CPC para aplicaciones residenciales. Así mismo los materiales elegidos para la construcción de los colectores, reúnen las propiedades térmicas y ópticas necesarias para desempeñar la función que se le asigna a cada uno, como parte del colector. Dichos materiales se encuentran fácilmente en el mercado nacional y son de bajo accesibles en costo, a excepción de las tuberías receptoras que son de cobre y su compra en grandes cantidades origina un costo considerable, pero cuya rentabilidad se obtiene en el tiempo total de operación del sistema. Sin embargo, para trabajos futuros es necesario un análisis tecno-económico a detalle de los CPCs propuestos.

Recomendaciones:

- Se sugiere la realización de más pruebas experimentales para recabar mayor cantidad de información a lo largo de un año y seguir validando los modelos numéricos.
- A pesar de que los modelos numéricos dieron resultados aceptables para predecir el comportamiento térmico de los colectores, se podría enriquecer más el trabajo si se optimizan los modelos para obtener temperaturas más altas.
- Implementar un prototipo experimental utilizando el receptor con aletas continuas verticales de 13 mm, para validar los resultados obtenidos en análisis por medio del trazado de rayos y realizar las simulaciones FEM-CFD correspondientes para este sistema para determinar su eficiencia térmica.
- Buscar otras áreas de oportunidad como es el uso de nuevos materiales que puedan sustituir al cobre que es el material de mayor costo de todo el sistema, así como nuevas opciones de receptores que aprovechen más la irradiación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Joel, M.-S.; Conrado, M.-F. and Johannes, M.-P. (2015) Modelo para diseñar y simular sistemas renovables de energía para calentar agua a dos niveles de temperatura, *Ingeniería Mecánica*, 18, 129-138
- [2] Holm, D. (2005) Un Futuro para el Mundo en Desarrollo Basada en las Fuentes Renovables de Energía, ISES (International Solar Energy Society)
- [3] Turrini, E. (2006), El camino del Sol. Un desafío para la humanidad en el tercer milenio, una esperanza para los países del Sur., Cubasolar, Habana, Cuba
- [4] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013), Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons
- [5] Geyer, M.; Lüpfert, E.; Osuna, R.; Esteban, A.; Schiel, W.; Schweitzer, A.; Zarza, E.; Nava, P.; Langenkamp, J. and Mandelberg, E. (2002) EURO TROUGH - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation. En: 11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, 4-6 September, Zurich, Switzerland
- [6] Frank, B.; Thomas, B.; Markus, P. and Wolfgang, S. (2010) Development of a new flat stationary evacuated CPC-collector for process heat applications, *Solar Energy*, 84, 1166-1174
- [7] Okoronkwo, C. A.; Nwufo, O. C.; Ogueke, N. V.; Nwaigwe, K. N. and Anyanwu, E. E. (2014) Evaluation of the Thermal Performance of a Thermo Syphon Water Heating System Using a Compound Parabolic Solar Collector, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 4, 1-5
- [8] Gianpiero, C.; Ermani, F.; Paola, M. and Arturo, D. R. (2016) Innovation in flat solar thermal collectors: A review of the last ten years experimental results, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1141-1159
- [9] Bérriez Pérez, L. and Álvarez González, M. (2008), Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares, Cubasolar, Habana, Cuba
- [10] Kalogirou, S. A. (2009), *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, Elsevier, Academic Press
- [11] Contreras López, K. G. and Jacobo Terrazas, S. (2010), *Calentador Solar para Agua*, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México
- [12] Greenpeaces, M. (1998) *Calentadores Solares: Energía Renovable en tu Hogar*, GreenPeaces, Mexico
- [13] Mohamed, S.; Mohammed, A.-K. and Abdulhamid, M. (2008) Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector, *Renewable Energy*, 33, 383-387
- [14] Brian, N. (2006) *Anatomy of a solar collector: Developments in Materials, Components and Efficiency Improvements in Solar Thermal Collector Systems*, Refocus, 7, 32-35

- [15] Foster, R.; Ghassemi, M. and Cota, A. (2009), Solar energy: renewable energy and the environment, CRC Press
- [16] Antonelli, M.; Francesconi, M.; Di Marco, P. and Desideri, U. (2016) Analysis of heat transfer in different CPC solar collectors: A CFD approach, Applied Thermal Engineering, 101, 479-489
- [17] Chemisana Villegas, D. (2009) Diseño y caracterización de un concentrador térmico-fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica, Doctorado, Universidad de Lleida, Lleida
- [18] David, G. A. (1995) Notas Sobre el Curso de Energía Solar, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente
- [19] Soteris A., K. (2004) Solar thermal collectors and applications, Progress in energy and combustion science, 30, 231-295
- [20] Ari, R.; Goodman, N. B. and Roland, W. (1979) Practical design considerations for CPC solar collectors, Solar Energy, 22, 373-381
- [21] Pavel A, C. (1958) Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics, Nobel Lectures, 426-440
- [22] Šumić, M. (2014) Thermal Performance of a Solarus CPC-Thermal Collector, Master of Solar Energy Engineering Dalarna, Dalarna, Suecia
- [23] Ari, R. (1976) Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators, Solar Energy, 18, 497-511
- [24] R, T.; E, K. and D, N. (1998) Study of the C.P.C. collector thermal behaviour, Energy Conversion and Management, 39, 1395-1406
- [25] Chakraverty, S.; Bansal, N. K. and Garg, H. P. (1987) Transient analysis of a CPC collector with time dependent input function, Solar Energy, 38, 179-185
- [26] Tabor, H. (1958) Stationary mirror systems for solar collectors, Solar Energy, 2, 27-33
- [27] Roland, W. (1974) Principles of solar concentrators of a novel design, Solar Energy, 16, 89-95
- [28] Roland, W. and Hinterberger, H. (1975) Principles of cylindrical concentrators for solar energy, Solar Energy, 17, 255-258
- [29] McIntire, W. R. (1980) New reflector design which avoids losses through gaps between tubular absorbers and reflectors, Solar Energy, 25, 215-220
- [30] Mamadou, K. and Harry S., R. (1991) CPCs with segmented absorbers, Solar Energy, 47, 269-277
- [31] Carvalho, M. J.; Collares-Pereira, M.; Correia De Oliveira, J.; Farinha Mendes, J.; Haberle, A. and Wittwer, V. (1995) Optical and thermal testing of a new 1.12X CPC solar collector, Solar Energy Materials and Solar Cells, 37, 175-190

- [32] Ajitkumar S., G.; Atul S., J.; Sudhir V., P.; Jyeshtharaj B., J. and Aniruddha B., P. (2013) Cost effective design of compound parabolic collector for steam generation, *Solar Energy*, 90, 43-50
- [33] Nitin, K.; Lun, J.; Roland, W. and Gary, R. (2015) Receiver shape optimization for maximizing medium temperature CPC collector efficiency, *Solar Energy*, 122, 529-546
- [34] Balashanmugam, P. and Balasubramanian, G. (2016) Experimental Analysis Of Solar Water Heater Using Porous Medium And Agitator, *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 02, 399-410
- [35] Lara, F.; Cerezo, J.; Acuna, A.; González-Ángeles, A.; Velázquez, N.; Ruelas, A. and López-Zavala, R. (2021) Design, optimization and comparative study of a solar CPC with a fully illuminated tubular receiver and a fin inverted V-shaped receiver, *Applied Thermal Engineering*, 184, 116-141
- [36] Deng, C.-G. and Chen, F. (2021) Model verification and photo-thermal conversion assessment of a novel facade embedded compound parabolic concentrator, *Energy*, 220, 119739
- [37] Ari, R.; Joseph, O. G. and Roland, W. (1980) Design and test of non-evacuated solar collectors with compound parabolic concentrators, *Solar Energy*, 25, 335-351
- [38] Hsieh, C. (1981) Thermal analysis of CPC collectors, *Solar Energy*, 27, 19-29
- [39] Fasulo, A.; Odicino, L. and Perello, D. (1987) Development of a CPC with low thermal losses, *Solar & Wind Technology*, 4, 157-162
- [40] Tripanagnostopoulos, Y. and Yianoulis, P. (1996) CPC solar collectors with multichannel absorber, *Solar Energy*, 58, 49-61
- [41] Abdul-Jabbar, N. K. and Al-Mutawalli, S. S. (1998) Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators, *Energy Conversion and Management*, 39, 1073-1079
- [42] Tripanagnostopoulos, Y.; Yianoulis, P.; Papaefthimiou, S. and Zafeiratos, S. (2000) CPC Solar Collectors with Flat Bifacial Absorbers, *Solar Energy*, 69, 191-203
- [43] Yong, K.; Guiyoung, H. and Taebeom, S. (2008) An evaluation on thermal performance of CPC solar collector, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 446-457
- [44] Souliotis, M.; Quinlan, P.; Smyth, M.; Tripanagnostopoulos, Y.; Zacharopoulos, A.; Ramirez, M. and Yianoulis, P. (2011) Heat retaining integrated collector storage solar water heater with asymmetric CPC reflector, *Solar Energy*, 85, 2474- 2487
- [45] Pei, G.; Li, G.; Zhou, X.; Ji, J. and Su, Y. (2012) Experimental study and exergetic analysis of a CPC-type solar water heater system using higher-temperature circulation in winter, *Solar Energy*, 86, 1280-1286
- [46] Xiaoguang, G.; Robert A., T.; Graham, M. and Gary, R. (2014) Theoretical analysis of a novel, portable, CPC-based solar thermal collector for methanol reforming, *Applied Energy*, 119, 467-475

- [47] Hoigebazar, P. and Valder, J. (2020) Analysis and comparison of compound parabolic solar concentrator configurations for box type solar cooker, AIP Conference Proceedings, 2236, 1-9
- [48] Xia, E.-T. and Chen, F. (2020) Analyzing thermal properties of solar evacuated tube arrays coupled with mini-compound parabolic concentrator, Renewable Energy, 153, 155-167
- [49] José Gonzalo, C. B.; Manuel, P. C.; Miguel, T. H. and Luis, V. (2021) Low Cost High-Accuracy Compound Parabolic Concentrator System—A Manufacturing Methodology, Journal of Solar Energy Engineering, 143, 1-25
- [50] Grass, C.; Schoelkopf, W.; Staudacher, L. and Hacker, Z. (2004) Comparison of the optics of non-tracking and novel types of tracking solar thermal collectors for process heat applications up to 300 °C, Solar Energy, 76, 207-215
- [51] Asghar, A.; Masoud, R. and Ammar Abdulaziz, A. (2010) CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 312-318
- [52] Chaabane, M.; Mhiri, H. and Bournot, P. (2013) Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with a storage tank equipped with radial fins of rectangular profile, Heat and Mass Transfer, 49, 107-115
- [53] Alhassan Salami, T. and Ashraf M. S., B. R. (2014) Simulation Analysis of Thermal Losses of Parabolic trough Solar Collector in Malaysia Using Computational Fluid Dynamics, Procedia Technology, 15, 841-848
- [54] Gajic, M.; Karwa, N.; Mojiri, A. and Rosengarten, G. (2015) Modeling reflection loss from an evacuated tube inside a compound parabolic concentrator with a cylindrical receiver, Optics Express, 23, A493-A501
- [55] Vladimir, Y.; Eduard, Y.; Mehmet, Ç. and Onat, T. (2015) Ray tracing for optimization of compound parabolic concentrators for solar collectors of enclosed design, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23, 1761-1768
- [56] Evangelos, B.; Korres, D.; Tzivanidis, C. and Antonopoulos, K. A. (2016) Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 16, 53-63
- [57] Sainath A., W. and Nitin P., G. (2016) Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver, Solar Energy, 137, 165-172
- [58] Meng-Lan, G. and Shan-Ting, D. (2017) Daily solar irradiance in Daily useful energy of Domestic solar water heater, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 81, 1-5
- [59] Gunjo, D. G.; Mahanta, P. and Robi, P. S. (2017) CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition, Renewable Energy, 106, 24-36
- [60] Su, Z.; Gu, S. and Vafai, K. (2017) Modeling and simulation of ray tracing for compound parabolic thermal solar collector, International Communications in Heat and Mass Transfer, 87, 169-174

- [61] Miguel, T. H.; Manuel, P. C.; José Gonzalo, C. B.; Ulises, D. A. and Vicente, F. (2018) Solar ray tracing analysis to determine energy availability in a CPC designed for use as a residential water heater, *Energies*, 11, 1-19
- [62] Yuan, G.; Fan, J.; Kong, W.; Furbo, S.; Perers, B. and Sallaberry, F. (2020) Experimental and computational fluid dynamics investigations of tracking CPC solar collectors, *Solar Energy*, 199, 26-38
- [63] Javed, A.; Syed I, G.; Hussain H, A. K. and Muzaffar, A. (2020) Performance Evaluation of a Modified Compound Parabolic Concentrating Collector with Varying Concentration Ratio, *Heat Transfer Engineering*, 1-15
- [64] Maurizio, C.; Sarah Josephine, M.; Sonia, C.; Anita, O.; Mirko, R. and Andrea, M. (2020) Modelling and numerical simulation for an innovative compound solar concentrator: Thermal analysis by FEM approach, *Energies*, 13, 548
- [65] Bathe, K.-J. (2007) Finite Element Method. en: (ed). *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 1-11
- [66] Qiang, W.; Jinfu, W. and Runsheng, T. (2016) Design and Optical Performance of Compound Parabolic Solar Concentrators with Evacuated Tube as Receivers, *Energies* (19961073), 9, 1-16
- [67] Vidriales Escobar, L. G. (2007) Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos
- [68] Ari, R. (1976) Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers, *Applied optics*, 15, 1871-1873
- [69] Gálvez, J. B. (2002) Desarrollo de colectores solares sin concentración para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua, Universidad de Almería,
- [70] Terrón Hernández, M. (2018) Estudio teórico experimental de un receptor de calor con aletas acoplado a un concentrador parabólico compuesto, Maestría en Ciencias en Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Mérida, Yucatán, México
- [71] González-Mora, E.; Rincón-Mejía, E. and Moreno Lawrence, D. (2016), Using a New Solar Sterilizer for Surgical Instruments as a Solar Oven for Cooking,
- [72] Rincón, E.; Durán, M. and Lentz, A. (2009) New Solar Air Heater Based on Non-Imaging Optics for High-Temperature Applications, *Energy Sustainability*, 48906, 839-844
- [73] Kreith, F.; Manglik, R. M. and Bohn, M. S. (2010), *Principles of Heat Transfer*, Cengage Learning
- [74] Incropera, F. P. and Dewitt, D. P. (1999), *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Prentice Hall
- [75] Alan J, C.; Oleh C, Z. C. and Eduardo M, T. (1990), *Transmisión de calor*, Bellisco

- [76] Donald Q, K. (1997), Procesos de transferencia de calor, Compañía Editorial Continental México
- [77] Bernardo, F.; Trino, S. and Maricela, R. (2005) El espectro electromagnético y sus aplicaciones, Escuela de la Ingeniería, 1, 24
- [78] Paul E., T. (1992), Física, conceptos y aplicaciones, McGraw Hill México
- [79] Yanier, O. M. (2019) Dispositivo optomecatrónico para la adquisición de medidas espectroscópicas con resolución angular, Maestría en Optomecatrónica, Centro de Investigaciones en Óptica A.C., León, Guanajuato, México
- [80] Echevarría López, C. (2012) Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua, Licenciatura, Universidad de Piura, Piura, Perú
- [81] Guevara Vázquez, S. (2003) Teoría para el Diseño de Calentadores Solares de Agua, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
- [82] João P., C.; Amaia, M.; Costas, M.; Peter, S.; Tiago, O. and Iñigo, L. (2018) New functionalities for the Tonatiuh ray-tracing software, AIP Conference Proceedings, 2033, 1-9
- [83] Santos-González, I.; Sandoval-Reyes, M.; García-Valladares, O.; Ortega, N. and Gómez, V. H. (2014) Design and Evaluation of a Compound Parabolic Concentrator for Heat Generation of Thermal Processes, Energy Procedia, 57, 2956-2965
- [84] Medina Carril, D. M. (2016) Evaluación de la eficiencia térmica teórica y experimental de dos geometrías en un colector solar de placa plana, Doctorado, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Mérida, Yucatán
- [85] Dhatt, G.; Lefrançois, E. and Touzot, G. (2012), Finite element method, John Wiley & Sons
- [86] Börgesson, L. (1996) ABAQUS. en: Ove Stephansson, Lanru Jing and Chin-Fu Tsang (ed). Developments in Geotechnical Engineering. Elsevier, 565-570
- [87] Alexis, R. R. (2015) Análisis y simulación de cargas de viento en un concentrador solar de canal parabólico mediante la aplicación de software. En: Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Instituto Tecnológico de Huichapan
- [88] Noh Pat, F. (2004) Estudio de diferentes modelos de turbulencia IC - E para aplicación en problemas de transferencia de calor., Maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos
- [89] Juan Francisco, M. P.; Boris, H.; Amau, B.; Rafael, G. B. and Francisco J., V. M. (2019) Influencia de la elección del modelo de turbulencia en el análisis numérico CFD de un cuenco amortiguador tipificado USBR II, Proceedings of the VI Jorandas de Ingeniería del Agua, Toledo, Spain, 22-25
- [90] Nieto Sánchez, H. (2017) Cálculo y análisis del coeficiente de pérdida de presión en un colector de descarga mediante CFD, Licenciatura, Universidad de Carlos III, Madrid, España

- [91] Javier Enrique, B. D.; Emmanuel Alejandro, F. J.; Danny, C. C.; J. Francisco, K. D.; Ali, B.; Luis David, P. L. and José Gonzalo, C. B. (2021) FEM-CFD simulation and experimental study of compound parabolic concentrator (CPC) solar collectors with and with-out fins for residential applications, *Applied Science*, 11, 1-19
- [92] Matlab MathWorks, MATLAB R2015b. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, Consultado: 28/05/2021
- [93] Panaroni, D. H.; Mujica, M.; Abal Matos, M.; Corujo, L.; Cervini, F.; Castro Luna Berenguer, A. M. D. C. and Martorelli, L. (2017) Diseño óptico de un colector cilíndrico parabólico inclinado para generación directa de vapor. En: IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017,
- [94] Asepta Surya, W.; Mochamad, A. and Heri, S. (2019) Designing and modeling a novel dual parabolic concentrator with three degree of freedom (DOF) robotic arm, *Solar Energy*, 194, 436-449
- [95] Yaakoubi, M.; Kchaou, M. and Dammak, F. (2013) Simulation of Heat Treatment and Materials with the Use of the Abaqus Software, *Metal Science and Heat Treatment*, 55, 386-392
- [96] Castro Alonso, P. (2016) Estudio de caracterización de colectores solares planos mediante software de mecánica de fluidos computacional, Licenciatura, Universidad de Cantabria, Cantabria, España
- [97] Singh, P. L.; Sarviya, R. M. and Bhagoria, J. L. (2010) Heat loss study of trapezoidal cavity absorbers for linear solar concentrating collector, *Energy Conversion and Management*, 51, 329-337
- [98] Mokhtar, G.; Evangelos, B.; Zafar, S.; Boussad, B.; Ahmed Kadhim, H. and Lioua, K. (2021) Evaluating energy efficiency and economic effect of heat transfer in copper tube for small solar linear Fresnel reflector, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143, 4197-4215
- [99] Wang, F.; Shuai, Y.; Yuan, Y. and Liu, B. (2012) Effects of material selection on the thermal stresses of tube receiver under concentrated solar irradiation, *Materials & Design*, 33, 284-291
- [100] Satti, J. R.; Das, D. K. and Ray, D. R. (2016) Measurements of Densities of Propylene Glycol-Based Nanofluids and Comparison With Theory, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 8,
- [101] Abdullah, A. L.; Misha, S.; Tamaldin, N.; Rosli, M. and Sachit, F. (2020) Theoretical study and indoor experimental validation of performance of the new photovoltaic thermal solar collector (PVT) based water system, *Case Studies in Thermal Engineering*, 18, 100-595
- [102] Manoram, R. B.; Moorthy, R. S. and Ragunathan, R. (2021) Investigation on influence of dimpled surfaces on heat transfer enhancement and friction factor in solar water heater, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145, 541-558
- [103] Ulises, D. A. and José Gonzalo, C. B. (2016) Evaluation of temperature and efficiency in relation to mass flow on a solar flat plate collector in Mexico, *Renewable Energy*, 96, 756-764

[104] era. Calentador Solar ST-8-80, (2018) Ficha Técnica,era (Energía Renovable de America), Morelia, México, Disponible en línea: [https://www.era.energiadeamerica.mx/assets /img/Fichas_Técnicas_ST_8.pdf](https://www.era.energiadeamerica.mx/assets/img/Fichas_Técnicas_ST_8.pdf) (Fecha de consulta: 15 de Agosto del 2021)