



**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

---

---

**CAMPUS GUANAJUATO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS  
POSGRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

“Estudio de un Reflector Lineal Fresnel a Través de la  
Minimización de Generación de Entropía y la Dinámica  
de Fluidos Computacional”

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

**M.I.Q. Oscar Alejandro López Núñez**

DIRECTORES:

**Dr. Jorge Arturo Alfaro Ayala**

**Dr. José de Jesús Ramírez Minguela**

**Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado**

Guanajuato, Guanajuato. Agosto de 2020



# *DEDICATORIA*

Este trabajo es dedicado a mis padres, Adolfo y Maty, por todo su cariño y amor, por forjar la persona que soy actualmente y por enseñarme que todo en esta vida se consigue a base de esfuerzo y dedicación.

A mi hermano Adolfo Rafael porque a pesar de todo, siempre me ha dado su apoyo y ha sido todo un ejemplo por seguir.

Con todo cariño a mis abuelitos, papi Rafa, papi Chava, mami Lupe y mami Meche, por su enorme cariño.

A todos y cada uno de los miembros de mi familia materna y paterna por sus consejos, apoyo y cariño.

A Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida.

# *AGRADECIMIENTOS*

Quiero agradecer en primera instancia a mis directores de tesis, los Doctores Jorge Arturo Alfaro Ayala, José de Jesús Ramírez Minguela y Oscar Alfredo Jaramillo Salgado por su tiempo, dedicación y múltiples conocimientos que me llevo de cada uno de ellos.

Al comité sinodal, los Doctores: Agustín Ramón Uribe Ramírez, Jesús Isaac Minchaca Mojica, César Eduardo Damián Ascencio, Sergio Cano Andrade y José Armando Balderas Bernal por todo su tiempo, sugerencias y comentarios que llegaron a enriquecer el presente trabajo.

A mis compañeros y amigos de generación: Lore, Nico, Gabriel y Christian por todos estos años de estrés, estudio, ocio y también de amistad. Además, quiero agradecer a aquellos con quienes conviví en este posgrado: Chuy, Heriberto, Chely y Jonathan, cuyos ratos de ocio hicieron más ameno este camino. Así mismo, agradecer a Santiago y Fernanda por el tiempo de convivencia y apoyo incondicional en tantos años de conocernos.

Agradezco a la Universidad de Guanajuato por la oportunidad de desarrollarme profesionalmente en este posgrado, al Instituto de Energías Renovables de la UNAM por permitirme el uso de sus instalaciones durante el desarrollo de la estancia académica, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante este doctorado.

A todos y cada una de las personas que con solo saludarme o sacarme una sonrisa espontánea en un día difícil hicieron que me animara a seguir adelante.

# Contenido

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>X</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Colectores Solares.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Colectores Solares No Concentradores.....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Colector Solar de Placa Plana.....	4
1.2.2 Colector Solar de Tubos Evacuados.....	5
<b>1.3 Colectores Solares Concentradores.....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Receptor de Torre Central.....	7
1.3.2 Colector Solar de Canal Parabólico.....	8
1.3.3 Reflector Lineal Fresnel.....	9
<b>1.4 Pérdidas de Calor en Concentradores Solares.....</b>	<b>10</b>
1.4.1 Generación de Entropía.....	12
<b>1.5 Optimización en Reflector Lineal Fresnel.....</b>	<b>14</b>
<b>1.6 Justificación.....</b>	<b>18</b>
<b>1.7 Hipótesis.....</b>	<b>21</b>
<b>1.8 Objetivos.....</b>	<b>21</b>
1.8.1 Objetivo General.....	21
1.8.2 Objetivos Específicos.....	21
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Prototipo.....</b>	<b>24</b>
2.1.1 Construcción.....	25

2.1.2 Pruebas experimentales .....	31
<b>2.2 Geometría .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3 Ecuaciones Gobernantes.....</b>	<b>38</b>
2.3.1 Discretización angular.....	40
<b>2.4 Condiciones de Frontera .....</b>	<b>42</b>
<b>2.5 Enfoque Numérico .....</b>	<b>44</b>
<b>2.6 Formulación de Análisis de Independencia .....</b>	<b>45</b>
<b>2.7 Formulación de la Validación del Modelo Numérico .....</b>	<b>46</b>
<b>2.8 Formulación de la Generación de Entropía.....</b>	<b>48</b>
<b>2.9 Proceso de Optimización.....</b>	<b>49</b>
<b>2.10 Proceso Global .....</b>	<b>52</b>
<b><i>CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL PROTOTIPO LFR .....</i></b>	<b><i>54</i></b>
3.1 Resultados Experimentales.....	55
3.2 Resultados del Análisis de Independencia .....	56
3.3 Validación del Modelo Numérico.....	60
3.4 Resultados Radiativos y Térmicos .....	63
3.5 Generación de Entropía .....	69
<b><i>CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN .....</i></b>	<b><i>78</i></b>
4.1 Generaciones.....	79
4.2 Frente de Pareto .....	82
4.3 Comparación Entre Prototipo LFR y Geometría Óptima .....	85
<b><i>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO .....</i></b>	<b><i>92</i></b>
5.1 Conclusiones.....	93
5.2 Trabajo a Futuro .....	98

<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>105</b>
<b>A.1 Programación de las Ecuaciones de Diseño .....</b>	<b>105</b>
<b>A.2 Función Definida por el Usuario .....</b>	<b>109</b>
<b>A.3 Programación del Operador de Mutación .....</b>	<b>111</b>
<b>A.4 Actividades y Productos Generados.....</b>	<b>117</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Clasificación de los colectores solares .....	3
<b>Figura 1.2.</b> Colector solar de placa plana .....	5
<b>Figura 1.3.</b> Colector solar de tubos evacuados. ....	6
<b>Figura 1.4.</b> Detalle de un tubo evacuado.....	6
<b>Figura 1.5</b> Receptor de Torre Central.....	8
<b>Figura 1.6</b> Colector Solar de Canal Parabólico.....	8
<b>Figura 1.7</b> Reflector Lineal Fresnel .....	9
<b>Figura 1.8</b> Atlas de Potencial Solar en México .....	18
<b>Figura 2.1</b> Campo Solar .....	24
<b>Figura 2.2</b> Representación Esquemática de la Geometría del LFR.....	26
<b>Figura 2.3</b> Elementos del Reflector Secundario CPC.....	27
<b>Figura 2.4</b> Prototipo LFR desarrollado en el IER UNAM.....	30
<b>Figura 2.5</b> Configuración cinemática del dispositivo para el seguimiento del sol .....	31
<b>Figura 2.6</b> Plataforma solar LAPECAS en el IER UNAM.....	32
<b>Figura 2.7</b> Piranómetro CMP6.....	32
<b>Figura 2.8.</b> Piranómetro CMP6 con anillo de sombra .....	34
<b>Figura 2.9</b> Efecto coseno .....	36
<b>Figura 2.10</b> Acomodo del LFR .....	36
<b>Figura 2.11</b> Modelo 2D de geometría del LFR.....	37
<b>Figura 2.12</b> Ángulos de control .....	41
<b>Figura 2.13</b> Cara del volumen de control a) sin ángulo de control sobresaliente b) con ángulo de control sobresaliente .....	42
<b>Figura 2.14</b> Condiciones de frontera del modelo numérico.....	43
<b>Figura 2.15</b> Diagrama de flujo para el modelado del LFR .....	45

<b>Figura 2.16</b> Operador de mutación.....	51
<b>Figura 2.17</b> Proceso global .....	53
<b>Figura 3.1</b> Curva de eficiencia térmica .....	56
<b>Figura 3.2</b> Resultados del análisis de independencia de malla .....	57
<b>Figura 3.3</b> Malla utilizada en el modelo para: a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos .....	58
<b>Figura 3.4</b> Resultados del análisis de independencia angular .....	59
<b>Figura 3.5</b> Resultados de la validación del modelo para la eficiencia térmica .....	61
<b>Figura 3.6</b> Resultados de la validación del modelo para la eficiencia exergética.....	62
<b>Figura 3.7</b> Resultados de la validación del modelo para la temperatura de salida.....	62
<b>Figura 3.8</b> Distribución del flujo de radiación absorbida ( $W/m^2$ ).....	63
<b>Figura 3.9</b> Contorno de radiación incidente ( $W/m^2$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos .....	65
<b>Figura 3.10</b> Contorno de temperatura de radiación ( $^{\circ}C$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos .....	66
<b>Figura 3.11</b> Contorno de gradiente de temperatura ( $K/m$ ) en a) Concentrador secundario CPC y b) Espejos .....	68
<b>Figura 3.12</b> Contorno de velocidad del aire ( $m/s$ ) en a) Concentrador secundario CPC y b) Espejos.....	69
<b>Figura 3.13</b> Tasa de generación de entropía global .....	70
<b>Figura 3.14</b> Tasa de generación de entropía local debido a fricción del fluido ( $W/m^2K$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos.....	71
<b>Figura 3.15</b> Generación de entropía local debido a transferencia de calor ( $W/m^2K$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos .....	72
<b>Figura 3.16</b> Ubicación de líneas en a) Zona del CPC y b) Espejo .....	73
<b>Figura 3.17</b> Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L1 .....	74

<b>Figura 3.18</b> Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L2 .....	75
<b>Figura 3.19</b> Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L3 .....	75
<b>Figura 3.20</b> Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L4 .....	76
<b>Figura 3.21</b> Tasa de generación de entropía local debido a radiación ( $W/m^2K$ ) ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos .....	77
<b>Figura 4.1</b> Convergencia de la función fitness.....	81
<b>Figura 4.2</b> Valores promedios de $R_{abs}$ y $S_{gen}$ para cada generación .....	81
<b>Figura 4.3</b> Frente de Pareto del proceso de optimización .....	83
<b>Figura 4.4</b> Numeración de los espejos para el individuo NN .....	85
<b>Figura 4.5</b> Comparación de las eficiencias térmicas y exergéticas.....	86
<b>Figura 4.6</b> Comparación del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor ( $W/m^2$ ).....	87
<b>Figura 4.7</b> Comparación de la radiación incidente en el concentrador secundario CPC ( $W/m^2$ ) .....	88
<b>Figura 4.8</b> Comparación de la tasa de generación de entropía global.....	89
<b>Figura 4.9</b> Comparación de la tasa de generación de entropía local debido a fricción del fluido ( $W/m^2K$ ).....	90
<b>Figura 4.10</b> Comparación de la tasa de generación de entropía local debido a transferencia de calor ( $W/m^2K$ ) .....	91
<b>Figura 4.11</b> Comparación de la tasa de generación de entropía local debido a radiación ( $W/m^2K$ ) .....	91

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Generaciones e individuos.....	79
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros geométricos del individuo NN.....	84
<b>Tabla 4.3</b> Ángulos de inclinación y distancia entre espejos para el individuo NN.....	84
<b>Tabla 1.1</b> Ventajas y desventajas de los concentradores solares.....	7
<b>Tabla 1.2</b> Procesos industriales de baja y mediana temperatura.....	19
<b>Tabla 2.1</b> Dimensiones del Prototipo LFR.....	29
<b>Tabla 2.2</b> Propiedades del piranómetro.....	33
<b>Tabla 2.3</b> Dimensiones de la Geometría del Prototipo LFR.....	38
<b>Tabla 2.4</b> Parámetros de Propiedades del Fluido como Función de la Temperatura.....	39
<b>Tabla 2.5</b> Condiciones ambientales consideradas.....	43
<b>Tabla 2.6.</b> Propiedades de los materiales.....	43
<b>Tabla 2.7</b> Algoritmo de Programación Evolutiva.....	50
<b>Tabla 3.1</b> Condiciones y resultados experimentales.....	55
<b>Tabla 3.2</b> Resultados del análisis de independencia de malla y angular.....	60
<b>Tabla 3.3</b> Comparación del comportamiento térmico para las diferentes pruebas.....	61
<b>Tabla 4.1</b> Generaciones e individuos.....	79
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros geométricos del individuo NN.....	84
<b>Tabla 4.3</b> Ángulos de inclinación y distancia entre espejos para el individuo NN.....	84

# NOMENCLATURA

$A_a$	Área de apertura ( $m^2$ )
$A_r$	Área del receptor ( $m^2$ )
$c$	Calor específico del aire ( $J/kg\ K$ )
$c_{cpc}$	Calor específico de la pared del concentrador secundario CPC ( $J/kg\ K$ )
$c_g$	Calor específico del vidrio ( $J/kg\ K$ )
$c_t$	Calor específico del tubo receptor ( $J/kg\ K$ )
$c_w$	Calor específico del agua ( $J/kg\ K$ )
$D$	Diámetro del tubo receptor (m)
$f$	Distancia focal (m)
$G$	Radiación global ( $W/m^2$ )
$G_D$	Radiación directa ( $W/m^2$ )
$G_d$	Radiación difusa ( $W/m^2$ )
$g_y$	Gravedad en la dirección y ( $m/s^2$ )
$H$	Altura del CPC (m)
$I_\eta$	Intensidad radiativa ( $W/m^2\ sr$ )
$j_\eta$	Coefficiente de emisión ( $W/m^3\ sr$ )
$\vec{j}_q$	Flujo de calor ( $W/m^2\ K$ )
$\vec{j}_s$	Flujo de entropía ( $W/m\ K$ )
$k$	Conductividad térmica ( $W/m\ K$ )
$l$	Distancia de los espejos (m)

$L$	Longitud de los espejos (m)
$N$	Número de espejos (-)
$n$	Número de espejos a la derecha o a la izquierda del LFR (-)
$p$	Presión (Pa)
$q_R$	Flujo radiativo ( $W/m^2$ )
$R$	Radio del tubo receptor (m)
$R_{pl}$	Apertura del concentrador secundario CPC (m)
$r_l$	Apertura del concentrador secundario CPC lado izquierdo (m)
$r_c$	Apertura del concentrador secundario CPC en el centro (m)
$r_r$	Apertura del concentrador secundario CPC lado derecho (m)
$s$	Entropía específica ( $J/kg\ K$ )
$s_p$	Tasa de generación de entropía local ( $W/m^2\ K$ )
$s_h$	Tasa de generación de entropía local debido a transferencia de calor ( $W/m^2\ K$ )
$s_r$	Tasa de generación de entropía local debido a radiación ( $W/m^2\ K$ )
$s_v$	Tasa de generación de entropía local debido a fricción de fluido ( $W/m^2\ K$ )
$S_T$	Tasa total de generación de entropía ( $W/K$ )
$\hat{s}$	Vector unitario a una dirección dada (-)
$\hat{s}_i$	Vector director (-)
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
$T_{env}$	Temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )
$T_{in}$	Temperatura de entrada ( $^{\circ}C$ )
$T_{out\ mod}$	Temperatura de salida numérica ( $^{\circ}C$ )

$T_{out\ exp}$	Temperatura de salida experimental (°C)
$u_x$	Velocidad en la dirección x (m/s)
$u_y$	Velocidad en la dirección y (m/s)
$v$	Vector de velocidad (m/s)
$W$	Ancho de los espejos (m)
$X$	Coordenada “x” del concentrador secundario CPC (m)
$Y$	Coordenada “y” del concentrador secundario CPC (m)

### **Abreviaturas**

$BC$	Condiciones de Frontera
$CFD$	Dinámica de Fluidos Computacional
$CPC$	Concentrador Secundario Parabólico
$DOM$	Método de Ordenadas Discretas
$EP$	Programación Evolutiva
$LFR$	Reflector Lineal Fresnel
$RTE$	Ecuación de Transferencia Radiativa
$UDF$	Función Definida por el Usuario

### **Letras griegas**

$\alpha$	Absortividad del tubo receptor (-)
$\epsilon$	Emisividad (-)
$\epsilon_{cpc}$	Emisividad del CPC (-)

$\epsilon_g$	Emisividad del espejo (-)
$\epsilon_t$	Emisividad del tubo receptor (-)
$\eta$	Eficiencia térmica (-)
$\eta_e$	Eficiencia exergética (-)
$\kappa_\eta$	Coeficiente de absorción (1/m)
$\mu$	Viscosidad dinámica (Pa s)
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_o$	Reflectividad de los espejos (-)
$\rho_{CPC}$	Reflectividad de la pared del CPC (-)
$\sigma_{s\eta}$	Coeficiente de dispersión (1/m)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann (W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\Upsilon_{loss}$	Pérdida de flujo de radiación (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_\eta$	Función de la fase de dispersión (-)
$\Omega_i$	Ángulo sólido incidente (sr)

# *RESUMEN*

En los últimos años, el desarrollo e investigación de tecnologías que utilizan los recursos renovables con el fin de complementar la demanda energética han sido tema primordial para muchos investigadores en el mundo. Si bien existen diversas fuentes de energías limpias, el uso de la radiación solar se ha posicionado como uno de los recursos más importantes. En este sentido, el uso de dispositivos de captación de la radiación solar para su posterior transformación en energía térmica es un tema que ha tenido un gran auge en la investigación de tecnologías solares.

El presente trabajo se enfoca en el análisis y posterior optimización de un concentrador solar conocido como Reflector Lineal Fresnel (LFR) enfocado en la producción de calor de proceso de mediana temperatura. El análisis del LFR se realizó en términos térmicos, radiativos, así como en la obtención de la tasa de generación de entropía del dispositivo, este último utilizando una función definida por el usuario (UDF), todo ello a través de la herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), así como un prototipo LFR como base de estudio.

El proceso de optimización se llevó a cabo mediante la aplicación del método de Programación Evolutiva. Dicho método es basado en los algoritmos evolutivos, donde cada individuo (geometría) del LFR es sometido a un proceso de mutación con el fin de calcular la aptitud entre padres e hijos y así poder seleccionar los mejores elementos. La aptitud de cada individuo del LFR es medida a través de una función fitness que toma en cuenta la maximización del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor, así como la minimización de la tasa de generación de entropía.

Cada individuo del LFR fue construido en base a ecuaciones de diseño que permiten conocer la distancia entre cada espejo, su respectivo ángulo de inclinación, así como la apertura correcta del concentrador secundario. Así mismo, para la solución del modelo numérico, se toman en cuenta las ecuaciones gobernantes que son resueltas en condiciones de estado estable, flujo laminar y propiedades del aire variables en función de la temperatura.

Los resultados numéricos arrojaron una buena concordancia en comparación con los resultados experimentales obtenidos del prototipo LFR, por lo que el modelo numérico es

apropiado para la representación y evaluación del rendimiento real de un LFR. Además, el análisis al prototipo LFR arroja resultados relevantes como lo son: la distribución del flujo de radiación absorbida, la radiación incidente, gradientes de calor, velocidades del aire, así como la tasa de generación de entropía tanto de manera global como de manera local.

El proceso de optimización tuvo una convergencia en la séptima generación de donde se obtuvo el individuo NN, el cual cumple enteramente con la maximización del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor, junto con una minimización de la tasa de generación de entropía en el dispositivo.

Los resultados obtenidos del individuo NN fueron comparados con el prototipo LFR obteniendo un aumento del 16.4% y del 23.8% en cuanto a la eficiencia térmica y la eficiencia exergética respectivamente. Así mismo, el individuo NN presenta un incremento del 2.48% en cuanto al flujo promedio de radiación absorbida en el tubo receptor, así como una disminución del 20% para la tasa de generación de entropía. En términos de la tasa de generación de entropía local, el individuo NN muestra una disminución del 14.6%, 60% y 36.8% debido a la fricción de fluido, transferencia de calor y radiación respectivamente.

# *CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN*

## 1.1 Colectores Solares

La energía es un recurso necesario para el desarrollo de la humanidad, así mismo, es tomado como un indicativo del progreso y bienestar de la sociedad. En este sentido, a nivel mundial, las fuentes de energía provienen mayoritariamente de fuentes no renovables como lo es el petróleo, gas natural y carbón representando un 32%, 22.2% y 27.1% del total respectivamente [1], en otras palabras, el 81.3% del consumo energético mundial proviene de fuentes fósiles. La energía hace que la economía y los avances tecnológicos de los países se desarrollen, sin embargo, el uso de esta energía mediante la combustión de hidrocarburos ha traído como consecuencia diversas situaciones adversas, siendo la principal de ellas la contaminación al medio ambiente reflejada en la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera.

Por lo anterior, es necesario buscar alternativas energéticas que no conlleven situaciones adversas para el medio ambiente. Entre las estrategias adoptadas se tiene el desarrollo de equipos con mejores eficiencias, el ahorro de energía, así como la búsqueda y aprovechamiento de nuevas fuentes de energía renovables que puedan suministrar de manera sustentable las necesidades energéticas que la humanidad requiere. Entre las fuentes de energías renovables existentes se encuentran la eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica y sobre todo la solar, las cuales representan una alternativa energética.

La energía solar ha surgido como el recurso renovable más prometedor debido a su abundancia, disponibilidad gratuita, así como su potencial comercial [2]. Teóricamente, la energía solar posee el potencial para satisfacer de manera adecuada la demanda de energía alrededor del mundo si las tecnologías para su recolección estuvieran disponibles en su máxima eficiencia [3].

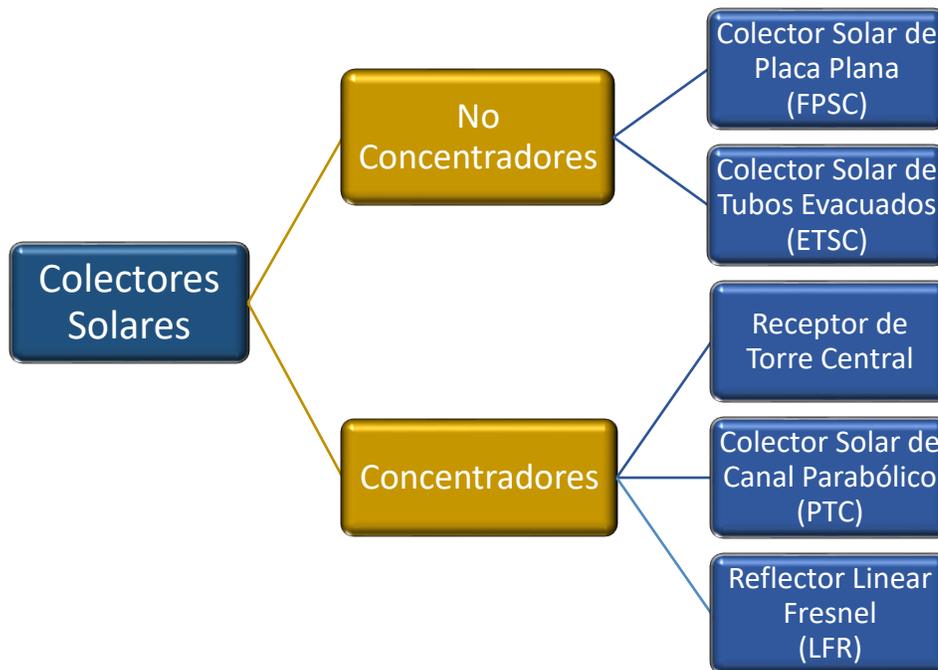
En cuanto a la energía solar en México, este se encuentra dentro de los cinco países más atractivos en el mundo para la inversión de proyectos solares, solo por debajo de China y Singapur [4]. El potencial de energía solar en México es uno de los más altos en el mundo, esto debido a que se encuentra en una zona privilegiada conocida como el cinturón solar, la cual es la franja de mayor intensidad de radiación en el mundo con valores promedios superiores a los 5 KWh/m<sup>2</sup> al día [5].

La energía solar puede ser convertida principalmente en dos tipos de energía, la energía eléctrica mediante el uso de celdas fotovoltaicas y la conversión a energía térmica mediante dispositivos conocidos como colectores solares. El principal componente de cualquier colector solar es una superficie que absorbe la energía solar, la convierte en energía térmica y transfiere dicha energía a un fluido que se encuentra confinado en el dispositivo. La energía térmica recolectada puede

ser llevada hasta un equipo en algún proceso que lo requiera o puede llevarse a un tanque de almacenamiento para su posterior uso (en tal caso el dispositivo se le conoce como calentador solar).

Los colectores solares se llegan a clasificar principalmente en dos tipos dependiendo de su razón de concentración: los no concentradores y los concentradores. En los primeros, el área de apertura (es decir, el área que recibe la radiación solar) es aproximadamente la misma que el área de absorción (es decir, el área que absorbe la radiación), mientras que, en los colectores solares concentradores, el área de apertura es mucho más grande que el área de absorción.

Los principales colectores solares tanto no concentradores como concentradores se mencionan en la **Figura 1.1**.



*Figura 1.1. Clasificación de los colectores solares.*

## 1.2 Colectores Solares No Concentradores

Como se mencionó anteriormente, en los colectores solares no concentradores, el área de apertura es aproximadamente igual al área de absorción, así mismo, este tipo de colectores se disponen en ciertas posiciones con el fin de poder ampliar la recolección de la radiación solar, es decir, su ubicación se establece en un ángulo de inclinación y orientación específica, la cual

depende de la latitud geográfica. Así mismo, los colectores solares no concentradores pueden recolectar la radiación solar global, es decir, tanto la radiación solar directa como la radiación solar difusa, contrario a los colectores solares concentradores que solo aceptan la radiación solar directa [6]. Generalmente, dentro de los colectores solares no concentradores se encuentran el colector solar de placa plana (FPSC, por sus siglas en inglés) y el colector solar de tubos evacuados (en inglés, ETSC).

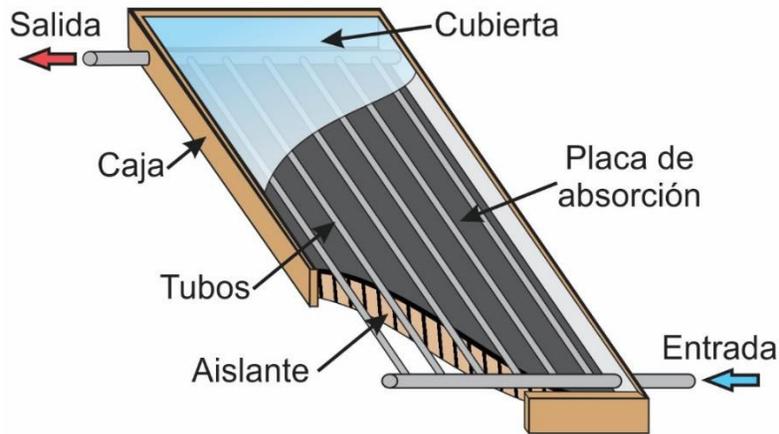
### 1.2.1 Colector Solar de Placa Plana

Un colector de placa plana consiste principalmente de una cubierta, un circuito de tubos, una placa de absorción, los cabezales de entrada y salida, así como un aislante (**Figura 1.2**). La cubierta de vidrio ayuda en la reducción de pérdidas de energía debido a los fenómenos de convección y radiación de la placa de absorción hacia el medio ambiente, no obstante, la acumulación de polvo en dicha cubierta de vidrio puede generar afectaciones en el rendimiento del colector de manera adversa.

La radiación solar pasa a través de la cubierta transparente hasta llegar a la placa de absorción, donde una alta porción de esta energía es absorbida y posteriormente transferida al circuito de tubos donde circula un fluido para ser posteriormente utilizado o almacenado, la parte inferior de la placa de absorción se encuentra bien aislada con el propósito de reducir las pérdidas de calor debido a los fenómenos de conducción y convección.

La eficiencia de un FPSC recae en la relación de aspecto (longitud/ancho) la cual tiene una relación con la eficiencia de los colectores, se ha encontrado que la eficiencia de éstos se incrementa con el incremento de la relación de aspecto del colector para un área constante [7].

Los colectores de placa plana son utilizados para aplicaciones de baja temperatura (menores a 80°C), así mismo son livianos y económicos en su costo de capital [8], sin embargo, sus beneficios se reducen considerablemente bajo condiciones de frío y lluvia.



*Figura 1.2. Colector solar de placa plana.*

### 1.2.2 Colector Solar de Tubos Evacuados

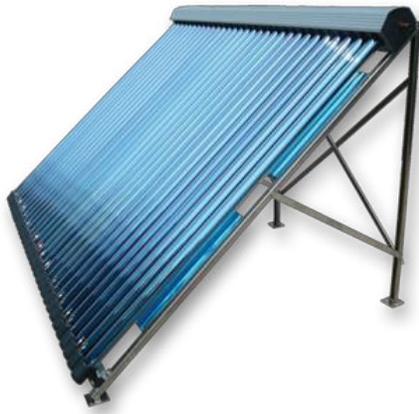
Los colectores de placa plana fueron desarrollados para su uso en climas soleados y templados, sin embargo, sus beneficios se reducen enormemente cuando las condiciones del clima se vuelven poco favorables como lo son días fríos, nublados o ventosos. Además, la condensación y la humedad causan deterioro de los materiales internos resultando en una reducción del rendimiento del sistema e incluso en la falla de este [9].

Por lo anterior, se tuvo el desarrollo de los colectores de tubos evacuados, los cuales pueden ser de tres tipos dependiendo si existe un elemento al interior de cada uno de ellos: i) si no existe algún elemento dentro del tubo más que el fluido de trabajo (Water-in-glass), ii) si se tiene un tubo de cobre en forma de U (U-type) y iii) si cuenta con un tubo termosifón bifásico (heat pipe), siendo éste último el más eficiente aunque también el que tiene los costos más elevados.

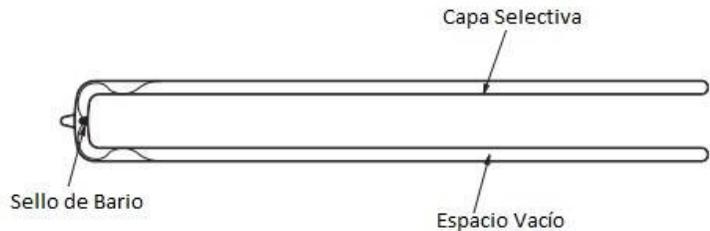
Independientemente del tipo de tubo evacuado a utilizar, el colector consiste en una serie de tubos conectados cada uno a un cabezal (**Figura 1.3**), cada uno de estos tubos se encuentra conformado por dos tubos de vidrio concéntricos. Entre el tubo interior y el tubo exterior se tiene un espacio vacío donde el aire es evacuado generando una presión de vacío que generalmente se encuentra en los rangos de  $5 \times 10^{-3} Pa$  [10].

Dentro del tubo interior de cada uno de los tubos evacuados circula el fluido de interés, y en la superficie del tubo interior se deposita una capa selectiva, de tal forma que dicho recubrimiento es expuesto a la radiación solar recibiendo el flujo de calor necesario para aumentar la temperatura del fluido del tubo interior, ambos tubos terminan en una unión realizada por un sello de bario (**Figura 1.4**).

El uso de un solo colector solar de tubos evacuados es raramente visto en la práctica, por lo que varios colectores se interconectan ya sea en un arreglo en serie o paralelo para poder alcanzar las temperaturas deseadas, las cuales pueden ir desde los 50°C hasta los 200°C [11].



**Figura 1.3.** Colector solar de tubos evacuados.



**Figura 1.4.** Detalle de un tubo evacuado.

## 1.3 Colectores Solares Concentradores

En los colectores solares concentradores el área de apertura (conocido también como concentrador) es mucho más grande que el área de absorción (conocido también como receptor), el principal objetivo de estos dispositivos es aumentar la densidad de flujo de radiación solar directa que se recibe de manera natural sobre la tierra. Esto se logra mediante dispositivos ópticos que desvían los rayos del sol desde la zona del concentrador hasta la zona del receptor, provocando con esto un aumento considerable de la temperatura del receptor. La desviación de la radiación solar directa se puede dar mediante mecanismos de refracción o reflexión de forma plana, cilíndrica o parabólica, mientras que el receptor puede ser de forma plana, cóncava, convexa o cilíndrica, así mismo, éste puede o no tener un recubrimiento especializado. En los colectores solares concentradores es importante que cuenten con un sistema óptico con el fin de que la zona del concentrador pueda seguir de forma correcta el movimiento aparente del sol durante el tiempo de operación del concentrador.

Los concentradores solares tienen diversas ventajas y desventajas sobre los colectores solares no concentradores, las cuales se muestran en la **Tabla 1.1**

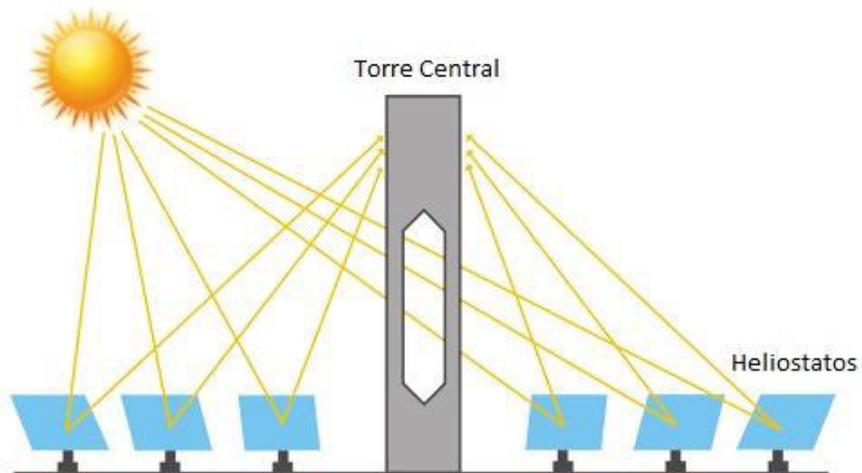
*Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de los concentradores solares.*

Ventajas	Desventajas
Mayor eficiencia térmica debido a las temperaturas que puede alcanzar el fluido de trabajo.	Los concentradores solares solo recolectan la radiación solar directa y requieren mecanismos de seguimiento.
El costo por unidad de área de la superficie de captación solar del sistema de concentración es menor.	Degradación de la superficie de concentración debido a cuestiones climatológicas, además de requerir una limpieza periódica.
La superficie de concentración requiere menos material.	

Entre los dispositivos de concentración solar más importantes, se encuentran el receptor de torre central, el colector solar de canal parabólico (PTC, por sus siglas en inglés) y el reflector lineal Fresnel (en inglés, LFR).

### 1.3.1 Receptor de Torre Central

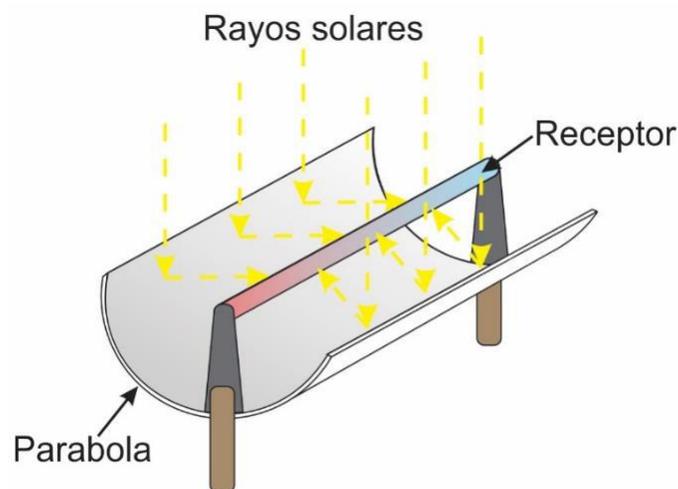
Este tipo de arreglo es empleado para instalaciones a gran escala en la generación de electricidad, consiste en una torre central rodeada de un gran número de espejos planos o heliostatos donde cada uno de ellos tiene un sistema de seguimiento (**Figura 1.5**). Estos heliostatos reflejan la energía solar concentrándola en una torre central, la energía térmica concentrada es absorbida y transferida a un fluido para posteriormente ser utilizado hasta en rangos de temperatura de 2000 °C este tipo de plantas solares han sido construidas en diversas zonas de España, Estados Unidos y China [12].



**Figura 1.5** Receptor de Torre Central

### 1.3.2 Colector Solar de Canal Parabólico

El colector solar de canal parabólico es llamado así debido a que están hechos de un material reflectivo en forma de parábola donde el tubo receptor es colocado a lo largo de la línea focal, dicho tubo puede estar cubierto para reducir pérdidas de calor, así, la radiación concentrada llega al tubo receptor y calienta el fluido que se encuentra circulando dentro de él (**Figura 1.6**).

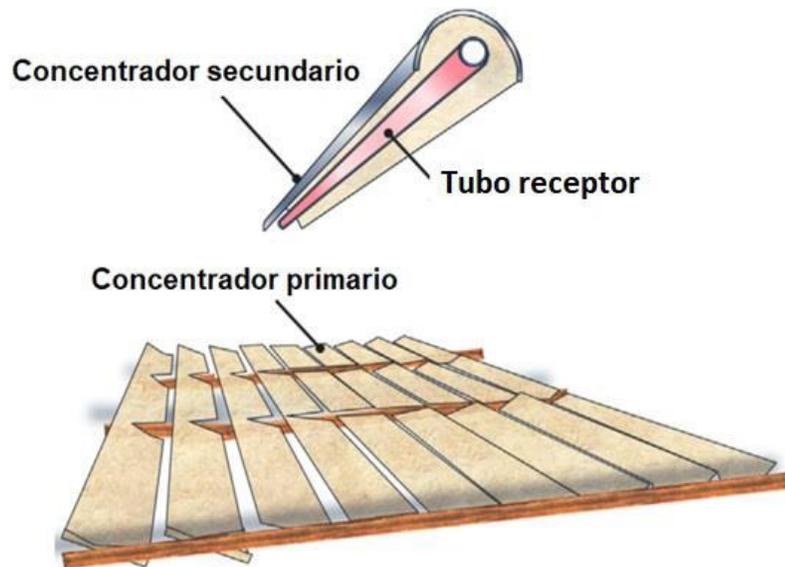


**Figura 1.6** Colector Solar de Canal Parabólico

El PTC puede alcanzar altas temperaturas del fluido de trabajo de hasta 400°C con buena eficiencia, en este sentido, los PTC han sido ampliamente utilizados dentro de plantas de generación de electricidad de diferentes capacidades (desde los 50 hasta los 280 MW) especialmente en Estados Unidos y España [13]. Sin embargo, también es posible llegar a tener dispositivos tipo PTC que operen y produzcan calor para procesos industriales en rangos de temperatura desde los 50°C hasta los 400°C [11].

### 1.3.3 Reflector Lineal Fresnel

Un LFR consiste en un conjunto de filas de superficies reflectoras o espejos (conocido como concentrador primario) que dirigen los rayos del sol a un tubo o conjunto de tubos receptores que se encuentran sobre una línea focal, en dichos tubos circula un fluido de trabajo para ser calentado (**Figura 1.7**). El tubo receptor es colocado dentro de un concentrador secundario, el cual es una cavidad que puede ser aislada con el fin de evitar pérdidas de calor [14].



**Figura 1.7** Reflector Lineal Fresnel

Un LFR tiene varias ventajas sobre un PTC como lo son: bajos costos de instalación, pocas piezas móviles [15], así como los espejos del concentrador secundario se encuentran localizados cerca del suelo [16,17]. Estas características reducen el riesgo de fuga del fluido de trabajo, así como fallas estructurales debido a las corrientes de viento. A pesar de que un LFR resulta ser simple y económico en su construcción, instalación y operación, aún es necesario encontrar las

zonas de mayor pérdidas del dispositivo solar con el fin de aumentar su eficiencia, además, los LFRs manejan temperaturas de operación más bajas y por ende operan a eficiencias menores en comparación con los PTCs, no obstante, se ha demostrado que este tipo de sistemas son los más rentables y baratos para temperaturas de hasta 300°C. [18].

Generalmente, la concentración solar permite que los dispositivos puedan ser utilizados en la generación de energía eléctrica o en otros procesos de altas temperaturas, sin embargo, en la actualidad se están dando diversas investigaciones y prototipos experimentales enfocadas en concentradores solares que obtienen rangos de temperaturas de bajas a medias en el fluido de trabajo (80 a 200°C). En este sentido, y debido a que el LFR sigue siendo una tecnología que requiere de mayor impulso en la investigación, el presente trabajo de tesis se centra en un colector solar concentrador tipo LFR que opera en un rango de 70°C a 110°C.

### 1.4 Pérdidas de Calor en Concentradores Solares

Con el fin de aumentar el rendimiento del LFR y poder contribuir a convertirlo a una tecnología de concentración solar madura, diversos trabajos se han enfocado en la cuantificación de las pérdidas de calor en el dispositivo. Saxena et al. [19] presentaron un estudio del concentrador secundario del LFR con forma trapezoidal utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), el objetivo del trabajo estuvo enfocado en el entendimiento de las pérdidas acopladas debido a los fenómenos de convección y radiación. Se observó que la radiación es el mecanismo predominante de transferencia de calor, ya que representa la mayor parte de las pérdidas totales.

Qiu et al. [20] realizaron un análisis por medio de CFD sobre el proceso de conversión de energía en un LFR utilizando un arreglo de tubos receptores dentro un concentrador secundario de forma trapezoidal. El estudio mostró que la radiación desde los tubos es la fuente predominante de pérdidas contribuyendo con alrededor del 80% del total de éstas, así mismo, se encontró que las pérdidas de calor totales de los tubos aumentan rápidamente en función con la emisividad del recubrimiento, por lo que se recomienda tener un recubrimiento con baja emisividad.

Mokhtar et al [21] desarrollaron un análisis numérico de un LFR el cual fue validado mediante un prototipo experimental en condiciones climatológicas de invierno. Dicho modelo numérico fue resuelto mediante el método de diferencias finitas. Así mismo, el modelo fue capaz de predecir las pérdidas térmicas, mostrando que éstas se incrementan rápidamente cuando se incrementa tanto la temperatura de entrada del agua como la temperatura de los tubos.

Mohan et al [22] llevaron a cabo un análisis del concentrador secundario por medio de CFD en un LFR incluyendo un modelo de conducción-radiación. Se observó que, debido a que el aire que se encuentra dentro del concentrador secundario es casi estático, no existe diferencia en los resultados de pérdidas de calor al incluir o no incluir las ecuaciones de Navier-Stokes en el modelo, lo anterior sugiere que el fenómeno de convección dentro de la cavidad puede ser ignorado.

Reddy et al [14] realizaron un análisis en CFD del concentrador secundario con forma parabólica de un LFR. El objetivo de dicho trabajo fue estudiar las pérdidas de calor asociadas a la convección natural, la convección forzada y la radiación. El trabajo mostró que, cuando los efectos del viento son incluidos, las pérdidas de calor asociadas con la convección son mayores que aquellas asociadas con la radiación, mientras que, al no incluir los efectos del viento, las pérdidas de calor radiativas dominan a las pérdidas de calor convectivas, por último, al no considerar una capa selectiva en el tubo receptor, las pérdidas de calor radiativas siguen siendo aún mayores.

Dabiri et al. [23] presentaron un análisis CFD del concentrador secundario trapezoidal de un LFR. El objetivo fue estudiar la tasa de transferencia de calor y las pérdidas de calor en la cavidad considerando los fenómenos de conducción, convección y radiación, así mismo, se tomó en cuenta el ángulo de la cavidad, así como el tamaño del tubo receptor como variables del modelo. El trabajo mostró que un aumento en el ángulo de la cavidad trapezoidal causó un aumento en la velocidad de transferencia de calor en los tubos receptores. Además, un aumento en el tamaño del tubo receptor provocó un aumento de la disipación de calor a través de la pared de aislamiento de la cavidad.

Todos estos trabajos se centraron en el estudio del concentrador secundario, así como en las pérdidas globales de energía en el dispositivo debido a los diferentes mecanismos de transferencia de calor. Sin embargo, resulta importante considerar otros aspectos del rendimiento del LFR como lo es la transferencia de energía por radiación entre los espejos y la zona del receptor, los efectos del aire circundante del LFR, así como la localización específica de las pérdidas energéticas y sus modos de transferencia. Por otra parte, es conveniente mencionar que existen otros trabajos enfocados en el análisis del LFR basado en la segunda ley de la termodinámica, conocido como tasa de generación de entropía.

### 1.4.1 Generación de Entropía

La tasa de generación de entropía es un tipo de análisis basado en la Segunda Ley de la Termodinámica, dicho análisis es capaz de identificar la localización exacta de las pérdidas energéticas (irreversibilidades), así como cuantificar la cantidad de energía útil que se ha perdido debido a diferentes fenómenos involucrados, todo ello tanto de una manera local como global [24,25]. De esta manera, conociendo dicha información, se pueden llevar a cabo mejoras en dichas zonas del colector solar donde se presentan las irreversibilidades y, por tanto, incrementar su eficiencia global [26].

Es importante mencionar que dentro de la literatura especializada existen pocos trabajos dedicados al análisis de la tasa de generación de entropía enfocados específicamente a LFRs, sin embargo, es posible encontrar análisis de la tasa de generación de entropía enfocados a otros tipos de dispositivos solares tanto concentradores como no concentradores. Mwesigye et al [27] presentaron resultados de la tasa de generación de entropía debido a los fenómenos de fricción del fluido y transferencia de calor sobre la zona del receptor de un colector PTC a diferentes razones de concentración, temperaturas de entrada y flujos másicos. Los resultados mostraron que la tasa de generación de entropía global decrece cuando la temperatura de entrada del fluido de trabajo se incrementa. Por otro lado, la tasa de generación de entropía global se incrementa a medida que también se incrementa las razones de concentración. Cabe mencionar que este trabajo no presenta la cantidad ni localización de las irreversibilidades de manera local dentro del dispositivo.

Javaniyan et al [28] llevaron a cabo un análisis experimental de la tasa de generación de entropía global debido a los fenómenos de fricción del fluido y transferencia de calor en un colector solar de placa plana en el cual se estudiaron dos tipos de configuraciones. La primera de ellas se utilizó un canal poroso completamente lleno, y la segunda configuración utilizó un canal poroso vacío. Los resultados mostraron que las irreversibilidades debido a la fricción del fluido no muestran una influencia significativa en la tasa de generación de entropía total para ambos casos. Además, las irreversibilidades debido a la transferencia de calor resultan ser dominantes en ambas configuraciones.

Zhu et al. [29] desarrollaron un análisis por medio de CFD en tres dimensiones (3D) del tubo receptor de un PTC con un promotor de turbulencia. El análisis consideró la tasa de generación de entropía debido a los fenómenos de fricción de fluido y transferencia de calor. Los resultados mostraron que el fenómeno de fricción de fluido es dominante en la tasa de generación de

entropía del tubo receptor del PTC. Además, el promotor de turbulencia incrementa la transferencia de calor dentro del tubo y disminuye la tasa de generación de entropía global dentro del tubo receptor.

Mansour et al. [30] presentaron un análisis en dos dimensiones (2D) de un PTC basado en los efectos de parámetros operacionales y ambientales sobre la tasa de generación de entropía global, tomando en cuenta los efectos de fricción del fluido y transferencia de calor. Los resultados mostraron que un incremento en el flujo másico causa un incremento en la tasa de generación de entropía a bajas temperaturas, además, un incremento en la temperatura del fluido ocasiona un decremento en la tasa de generación de entropía global.

Okonkwo et al [31] realizaron un análisis experimental y numérico de la tasa de generación de entropía sobre un PTC, el cual utiliza nanofluidos ( $\text{TiO}_2/\text{agua}$ ), el estudio se realizó bajo diversas condiciones de operación. El trabajo mostró que un incremento en la concentración de las nanopartículas disminuye de forma considerable la tasa de generación de entropía en el sistema, además, se pudo encontrar un valor del flujo másico del fluido de trabajo que minimiza los efectos de la tasa de generación de entropía.

Bellos et al. [32] presentaron un análisis de CFD de un LFR que opera con nanofluidos, estos se utilizaron como indicadores para la evaluación de la eficiencia exergética, la eficiencia global, así como la tasa de generación de entropía global bajo los fenómenos de transferencia de calor y fricción del fluido. Se observó que la eficiencia exergética y la tasa de generación de entropía se incrementan a altas temperaturas de entrada del fluido, además, el fenómeno de fricción de fluido muestra una pequeña contribución a la generación de entropía global.

Liu et al. [33] realizaron un análisis de la tasa de generación de entropía global de un PTC con insertos de tiras cónicas como promotores de turbulencia utilizando técnicas de CFD. El estudio consideró los fenómenos de fricción del fluido y transferencia de calor. Los resultados mostraron que la tasa de generación de entropía en el dispositivo está dominada por los fenómenos de transferencia de calor en números de Reynolds bajos, así mismo, a números de Reynolds altos, el fenómeno dominante resulta ser la fricción de fluidos.

Es importante observar que los trabajos presentados se centraron en el análisis de la tasa de generación de entropía de un dispositivo solar considerando solo los fenómenos de fricción de fluido, así como de transferencia de calor, omitiendo la contribución de la radiación a la tasa de generación de entropía. Además, estos trabajos previos presentan solo resultados de la tasa de

generación de entropía global, ignorando la identificación local de la tasa de generación de entropía, así mismo, se utilizan modelos simplificados, por ejemplo, consideran el aire circundante a las superficies del colector solar como estático o simplemente no es considerado. Por tanto, como parte del presente trabajo, se llevó a cabo un análisis de la tasa de generación de entropía aplicado a un LFR tanto de manera global como local considerando los fenómenos de fricción de fluido, transferencia de calor y radiación.

### 1.5 Optimización en Reflector Lineal Fresnel

La optimización es una rama de las matemáticas aplicadas que se encarga de la determinación de las mejores soluciones respecto a una función objetivo aplicado a problemas que pueden ser matemáticamente modelados y que representen lo más fielmente posible el problema de la vida real, en esencia, un problema de optimización es un problema de decisión. Conociendo la información obtenida mediante el análisis de la tasa de generación de entropía, es posible llevar a cabo un proceso de optimización mediante una modificación a los dispositivos solares con el fin de mejorar su eficiencia global mediante la reducción de la tasa de generación de entropía [26]. En este sentido, algunos trabajos se han desarrollado con el objetivo de optimizar el dispositivo PTC mediante la minimización de la tasa de generación de entropía [34–36]. Sin embargo, no hay un estudio reportado en la literatura enfocado en la optimización de un LFR mediante la minimización de la tasa de generación de entropía.

Por otro lado, existen algunos trabajos cuyo objetivo es la optimización de un LFR con el fin de incrementar su rendimiento. Barbon et al. [37] realizaron una optimización de la longitud y posición del tubo receptor de un LFR de pequeña escala. El estudio consideró numerosas simulaciones numéricas para diferentes configuraciones basadas en un método de algoritmo geométrico. Los resultados mostraron la importancia de la ubicación del tubo receptor con respecto al centro longitudinal de las filas de espejos del concentrador primario.

Zhu [38] propuso un método de optimización adaptativo enfocado al concentrador secundario de una configuración de LFR genérica. El método propuesto no asume alguna forma particular del concentrador secundario sino más bien, comienza en un único punto de borde y construye adaptativamente el siguiente punto de superficie para maximizar la radiación reflejada. El concentrador secundario óptimo redirige la radiación en una amplia gama de ángulos solares incidentes.

Prasad et al. [39] presentaron un estudio de optimización para lograr una distribución circunferencial de flujo de calor casi uniforme en el tubo receptor de un LFR utilizando un método de trazado de rayos. Para llevar a cabo la optimización, los autores llevaron a cabo la modificación de la orientación y la distancia focal de las filas de espejos del LFR, así como del concentrador secundario. Los autores obtuvieron una mejora significativa en la distribución del flujo de calor cuando los ángulos de inclinación de los espejos se optimizan de manera iterativa.

Iparraguirre et al. [40] desarrollaron un diseño optimizado de un LFR para la producción de calor de proceso, para lo cual se empleó un código de trazado de rayos para evaluar los diferentes tipos de opciones geométricas con el fin de maximizar su rendimiento. Las modificaciones geométricas tomadas en cuenta fueron la inclinación de las filas de los espejos, la inclinación de los tubos receptores, así como el desplazamiento del concentrador secundario. El proceso de optimización logró una mejora significativa en comparación con el dispositivo LFR estándar.

Bellos et al. [41] llevaron a cabo un proceso de optimización enfocado en el concentrador secundario de un LFR utilizando la parametrización polinómica de Bezier, dicha parametrización se basó en el movimiento de tres puntos de control para determinar la geometría óptima del concentrador secundario. El diseño óptimo condujo a una distribución de flujo de calor relativamente uniforme sobre la periferia del tubo receptor en comparación con el diseño inicial.

Se puede observar que muchos de estos trabajos se centran en la optimización del trazado de rayos de un LFR, sin embargo, también es importante tener en cuenta la optimización del rendimiento térmico del concentrador solar a través de la tasa de generación de entropía, lo anterior debido a que el método de generación de entropía es capaz de identificar, localizar y cuantificar la tasa de irreversibilidades dentro de todo el dominio del LFR.

Por otro lado, debido a la naturaleza fuertemente discontinua de las funciones objetivo utilizadas en los procesos de optimización [42], existe un creciente interés en el uso de métodos de optimización metaheurísticos en LFRs. Los métodos metaheurísticos consisten generalmente en procedimientos iterativos de tal manera que se puede explorar de manera adecuada el espacio de búsqueda de las soluciones.

Se trata de algoritmos que se utilizan cuando no existe un método exacto de resolución o que se requiere de mucho tiempo de cálculo, además, producen soluciones sin tener una garantía total de la obtención del valor óptimo global pero que, sin embargo, tratan de huir de óptimos locales orientando la búsqueda dependiendo de la evolución del proceso. Este tipo de métodos pueden

clasificarse en constructivos (colonia de hormigas), aquellos basados en trayectorias (recocido simulado) o los evolutivos, algunos ejemplos de estos métodos, así como sus características principales se presentan a continuación [43]:

**Colonia de Hormigas.** Método de tipo constructivo cuya idea original proviene de la observación de la explotación de los recursos alimentarios por enjambres de hormigas, en el que las características de las hormigas son individualmente limitadas y en conjunto son capaces de buscar el menor camino existente entre la fuente de comida y su nido o colonia.

**Recocido Simulado.** Método basado en trayectoria que se basa en la analogía de calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan desplazarse de sus posiciones iniciales (un mínimo local de energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recristalizar en configuraciones con menor energía que la inicial (mínimo global). En el argot de optimización, el método de recocido simulado permite que la función objetivo pueda escapar de mínimos locales, y logre continuar explorando soluciones de la función objetivo que se establezcan, con fortuna en un mínimo local.

**Algoritmos Evolutivos** Son llamados así porque se inspiran en la evolución biológica y su base genético-molecular. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos someténdola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio con el cual se puede llegar a decidir cuáles son los individuos más adaptados que llegan a sobrevivir y cuáles los menos aptos los cuales son descartados. Dentro de estos, se pueden encontrar los métodos de Algoritmos Genéticos y el método de Programación Evolutiva.

Debido a las características ya mencionadas, algunos de los métodos mencionados, han sido utilizados en trabajos de optimización de LFRs. Moghimi et al. [44] realizaron una optimización del concentrador secundario de forma trapezoidal de un LFR. El estudio se llevó a cabo mediante el método Multi-Objetivo de Algoritmos Genéticos (MOGA, por sus siglas en inglés) en conjunto con CFD. Se utilizaron siete parámetros geométricos como variables de diseño con el fin de encontrar la geometría más adecuada para minimizar las pérdidas de calor, así como la carga de viento lateral.

Qiu et al. [45] llevaron a cabo una estrategia de optimización a través de la combinación del método MOGA junto con el método de trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT, por sus siglas

en inglés) enfocado en el concentrador secundario del LFR. Las funciones objetivos del estudio fueron la minimización del índice de no uniformidad de flujo en el tubo receptor, así como la minimización de las pérdidas ópticas.

Cheng et al. [46] realizaron un proceso de optimización óptica para un LFR basado en el método conocido como optimización de enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) en combinación con el método MCRT. La función objetivo del trabajo fue llevar a cabo la maximización de la eficiencia óptica del concentrador solar. En ese mismo sentido, Ajdad et al. [47] también llevaron a cabo un estudio basado en la combinación de PSO y MCRT para realizar una optimización de tipo óptico-geométrica de un LFR. Los autores concluyeron que el tamaño de enjambre mínimo requerido es de 30 partículas para las tres configuraciones estudiadas, esto con el fin de maximizar la eficiencia óptica diaria.

Se observa que los estudios previos se llegan a centrar solo en la optimización óptica del LFR modificando los parámetros geométricos del concentrador secundario, así mismo, dichos trabajos no se auxilian de técnicas de CFD ni de la obtención de la tasa de generación de entropía, además de que solo utilizan los métodos de optimización de Algoritmos Genéticos (GA) y el PSO, dejando de lado otros métodos con mayor flexibilidad en su aplicación como lo es la Programación Evolutiva (EP).

El uso de las técnicas de CFD permite considerar aspectos del rendimiento del LFR tales como: la transferencia de calor radiativa entre los espejos y la zona del concentrador secundario, así como la transferencia de calor convectiva entre el aire y las superficies del LFR. además, la tasa de generación de entropía permite localizar las pérdidas de energía debido a los diversos mecanismos de transferencia como lo es la disipación viscosa (fricción del fluido), transferencia de calor y radiación. Por último, el EP es un algoritmo evolutivo utilizado como una variante del método GA con el fin de evitar la degradación del rendimiento del método cuando se utiliza el cruzamiento [48] así como permitir una flexibilidad en la representación de los individuos.

Basado en lo anterior, en el presente trabajo se lleva a cabo la optimización de un Reflector Lineal Fresnel a través de técnicas de CFD (utilizando el software comercial Ansys-Fluent®), la tasa de Generación de Entropía y la Programación Evolutiva, teniendo como función objetivo la maximización del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor, así como la minimización de la tasa total de generación de entropía. Es importante mencionar que el dispositivo considerado en este estudio es basado en un prototipo real LFR para la producción de calor de proceso, el cual

se encuentra en la ciudad de Temixco, Morelos dentro de las instalaciones del Instituto de Energías Renovables (IER), perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México.

## 1.6 Justificación

Como se mencionó anteriormente y debido al actual problema ambiental que se tiene mundialmente, surge la necesidad de investigar en el desarrollo de tecnología que utilicen fuentes alternativas más limpias y perdurables que sean capaces de satisfacer de manera paulatina la demanda energética, en este sentido, como se ha mencionado, la energía solar resulta ser una opción viable para satisfacer dicha demanda.

La distribución geográfica de la radiación solar alrededor del mundo está dividida en 4 zonas de acuerdo con la intensidad de radiación, teniendo que las zonas más favorables se encuentran entre las latitudes 15°N y 35°N, así como entre las latitudes 15°S y 35°S, siendo que nuestro país se encuentra en la primera zona (entre 15°N y 35°N) [49].

México tiene una posición ideal para la implementación de tecnologías solares debido a dicha ubicación geográfica favorable conocida como cinturón solar, y es que la insolación promedio anual estimada es superior a los 5 kWh/m<sup>2</sup> por día en todo el país, en particular, en los estados del noroeste, dicha insolación puede alcanzar los 6.15 kWh/m<sup>2</sup> por día (**Figura 1.8**).



**Figura 1.8** Atlas de Potencial Solar en México

Este recurso solar de alta calidad hace que en casi todo el territorio nacional sea ideal la implementación de tecnologías de concentración solar para diversas aplicaciones como lo es la generación de energía eléctrica, la producción de combustibles solares como el hidrógeno e incluso la generación de energía térmica para calor de proceso.

Existen varios posibles campos de aplicación de la energía solar térmica a un nivel de temperatura media (80 a 200°C), el más importante de ellos es la producción de calor para procesos industriales, lo que representa una cantidad de alrededor del 25% de la demanda global de las necesidades de energía final en los países industrializados [50].

Con base en una serie de estudios sobre las demandas de calor industrial, se han identificado varios sectores industriales para la aplicación de energía solar como fuente primaria de suministro de calor. Dentro de los procesos industriales más importantes que utilizan calor a un nivel de temperatura media son: esterilización, pasteurización, secado, cocimiento, destilación, blanqueo y lavado. Algunos de los procesos más importantes y el rango de las temperaturas requeridos se describen en la **Tabla 1.2** [8].

*Tabla 1.2 Procesos industriales de baja y mediana temperatura.*

<b>Industria</b>	<b>Proceso</b>	<b>Temperatura °C</b>
Lechera	Pasteurización	60-80
	Esterilización	100-120
	Secado	120-180
	Concentrados	60-80
	Agua de alimentación de caldera	60-80
Comida enlatada	Esterilización	110-120
	Pasteurización	60-80
	Cocimiento	60-90
	Blanqueo	60-90
Textil	Blanqueo, teñido	60-90

	Secado, desengrasado	100-130
	Fijación	160-180
	Cocción, secado	60-80
Papel	Agua de alimentación de caldera	60-90
	Blanqueo	130-150
	Espesamiento	110-130
Química	Destilación	100-200
	Tratamiento térmico	120-180
	Pre calentamiento de agua	60-90
Carne	Lavado, esterilización	60-90
	Cocción	90-100
Bebidas	Lavado, esterilización	60-80
	Pasteurización	60-70
Harinas y subproductos	Esterilización	60-80
	Termoformado de vigas	80-100
Subproductos de la madera	Secado	60-100
	Preparación de pulpa	120-170
Ladrillos y bloques	Curado	60-140
	Preparación	120-140
Plásticos	Destilación	140-150
	Separación	200-220

---

Secado	180-200
Mezclado	120-140

---

Basado en lo anterior, resulta viable llevar a cabo investigaciones enfocadas en mejorar el rendimiento térmico de tecnologías de concentración solar cuyo objetivo sea la generación de calor de proceso a mediana temperatura para diversos procesos industriales.

## 1.7 Hipótesis

La localización y posterior minimización de las irreversibilidades de un Reflector Lineal Fresnel a través de las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional, tasa de generación de entropía y el método de optimización de Programación Evolutiva, permitirá hacer más eficiente el prototipo actual del Reflector Lineal Fresnel cuya finalidad es la producción de calor de proceso de mediana temperatura en el sector industrial.

## 1.8 Objetivos

### 1.8.1 Objetivo General

Realizar la optimización de un Reflector Lineal Fresnel con fines de producción de calor de proceso de mediana temperatura obteniendo la minimización de la tasa de generación de entropía junto con la maximización del flujo de radiación absorbida, todo ello auxiliándose de técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional y el método de optimización de Programación Evolutiva para obtener un diseño del LFR con desempeño óptimo.

### 1.8.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos geométricos y experimentales de un LFR de mediana temperatura que sirva como caso base (prototipo) para el análisis óptico, térmico y de generación de entropía.
- Realizar el análisis óptico, térmico y radiativo por medio de CFD del prototipo LFR.

- Efectuar el análisis de tasa de generación de entropía del LFR mediante CFD tanto de manera global como de manera local, con el fin de identificar las principales irreversibilidades de este tipo de dispositivos.
- Llevar a cabo el proceso de optimización mediante el método de Programación Evolutiva, tomando en cuenta la minimización de la generación de entropía, así como la maximización del flujo de radiación absorbida.
- Realizar la comparación entre la geometría optimizada y el prototipo LFR.

# *CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA*

## 2.1 Prototipo

Como se mencionó anteriormente, el prototipo LFR usado como base de estudio en este trabajo se encuentra en las instalaciones del IER perteneciente a la UNAM. La misión del IER se centra en la realización de investigación científica básica y aplicada en energías renovables, que coadyuven al desarrollo de tecnologías energéticas sustentables, así como formar recursos humanos especializados.

Para llevar a cabo su objetivo, el IER cuenta con diversos laboratorios y campos de pruebas, así como con equipo e instrumentos especializados. En el caso particular de la energía solar, el IER cuenta con diversos laboratorios, entre ellos un campo solar con la infraestructura adecuada para la realización de pruebas experimentales (**Figura 2.1**).



**Figura 2.1** Campo Solar

Así mismo el IER cuenta con el Laboratorio de Pruebas de Equipos de Calentamiento Solar (LAPECAS). El laboratorio entró en funcionamiento en el año 2008 como proveedor de servicios de pruebas de alta calidad a la industria solar, contando con amplia experiencia en pruebas solares, investigación científica y desarrollo tecnológico.

Dentro de los servicios ofrecidos se encuentran:

- Dictamen técnico de energía solar térmica en vivienda, que establece las especificaciones que deben cumplir sistemas de calentamiento de agua, cuya fuente de energía sea solar y como respaldo utilicen un calentador de agua con fuente de energía de gas LP o gas natural, energía eléctrica o cualquier otra. También establece los métodos de prueba para su verificación y los requisitos de marcado y etiquetado.
- Certificación bajo la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005, que establece los métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico y las características de funcionalidad de los colectores solares teniendo agua como fluido de trabajo y comercializados en México.
- Certificación bajo la norma NMX-ES-004-NORMEX-2010, la cual es una norma mexicana que establece el método de ensayo para evaluar y comparar el comportamiento térmico de sistemas solares de calentamiento de agua, principalmente para uso doméstico hasta una capacidad máxima de 500 L y hasta una temperatura de 90 °C como dominio de agua caliente.

### 2.1.1 Construcción

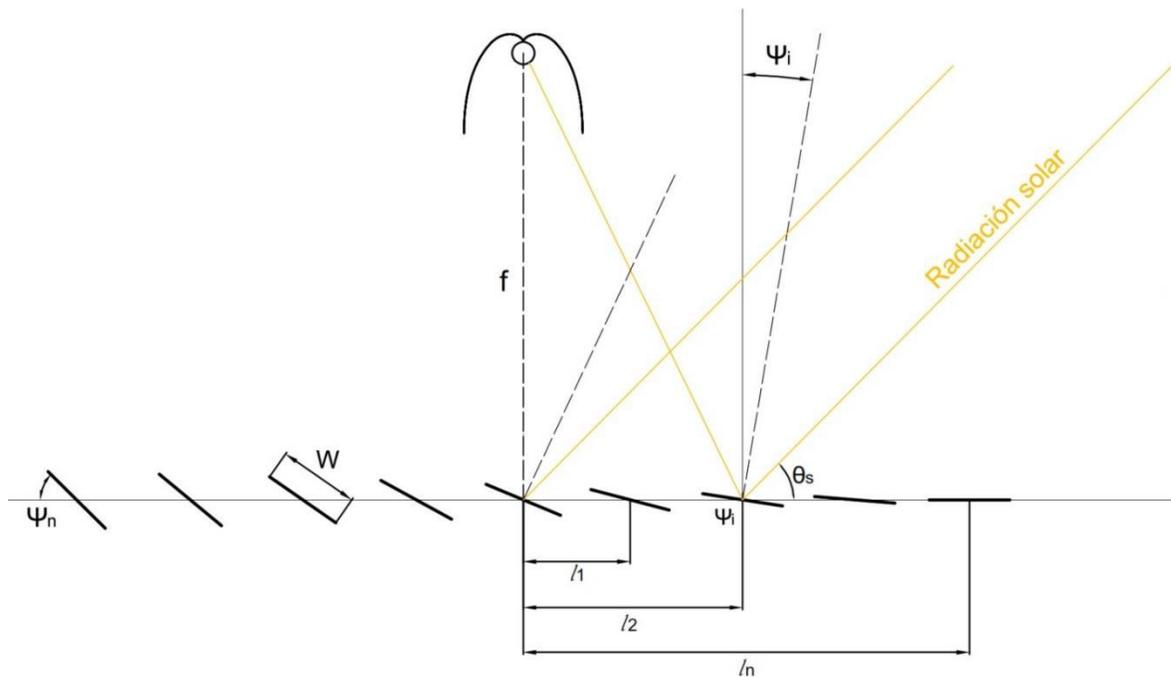
Para la construcción del prototipo LFR, así como las geometrías utilizadas en el proceso de optimización, se utilizaron las ecuaciones de diseño desarrolladas por Jaramillo et al. [51]. Dichas ecuaciones son modificaciones de ecuaciones propuestas por Mathur et al. [52] (otras variaciones de las ecuaciones de diseño del LFR pueden encontrarse en [53,54]). Así mismo, detalles acerca del diseño óptico, mecánico y térmico puede encontrarse en [55].

De manera general, las ecuaciones de diseño toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- Los espejos del LFR presentan una reflexión especular perfecta y están libres de deformaciones.
- Cada espejo del área de concentración primaria es móvil y se encuentra pivotada al centro de su eje longitudinal.
- Los rayos solares sustentan un ángulo de aceptación  $\xi = 32' = 4.65 \text{ mrad}$ , siendo independiente de las condiciones ambientales.
- Todos los espejos tienen el mismo ancho  $W$  y la misma longitud  $L$ .

- Se utiliza un concentrador secundario conocido como concentrador secundario parabólico de cúspide CUSP-CPC (o simplemente CPC) el cual es colocado en la parte superior del LFR.

La **Figura 2.2** muestra un diagrama esquemático de la geometría del LFR



**Figura 2.2** Representación Esquemática de la Geometría del LFR

El ángulo de inclinación  $\Psi_i$  de cada espejo es calculado con el fin de redirigir la radiación solar directa hacia el plano focal donde se encuentra el concentrador secundario, así mismo, el concentrador secundario se localiza por encima del espejo central del LFR con una distancia focal  $f$ .

El conjunto de **Ecuaciones 1-2** son parte de las ecuaciones de diseño y son tomadas en cuenta para calcular el ángulo de inclinación de cada uno de los espejos, así como la distancia entre cada uno de ellos ( $l_i$ ) [51].

$$\Psi_i = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{l_{i-1}}{f} + \frac{W}{2f} \left( \frac{\sin \Psi_{i-1} + \sin \Psi_i}{\tan(90^\circ - \theta_s - \xi)} + \cos \Psi_{i-1} + \cos \Psi_i \right) \right] + \frac{\theta_s}{2} \quad (1)$$

$$l_i = l_{i-1} + \frac{W}{2} \left[ \frac{\sin \Psi_{i-1} + \sin \Psi_i}{\tan(90^\circ - \theta_s - \xi)} + \cos \Psi_{i-1} + \cos \Psi_i \right] \quad (2)$$

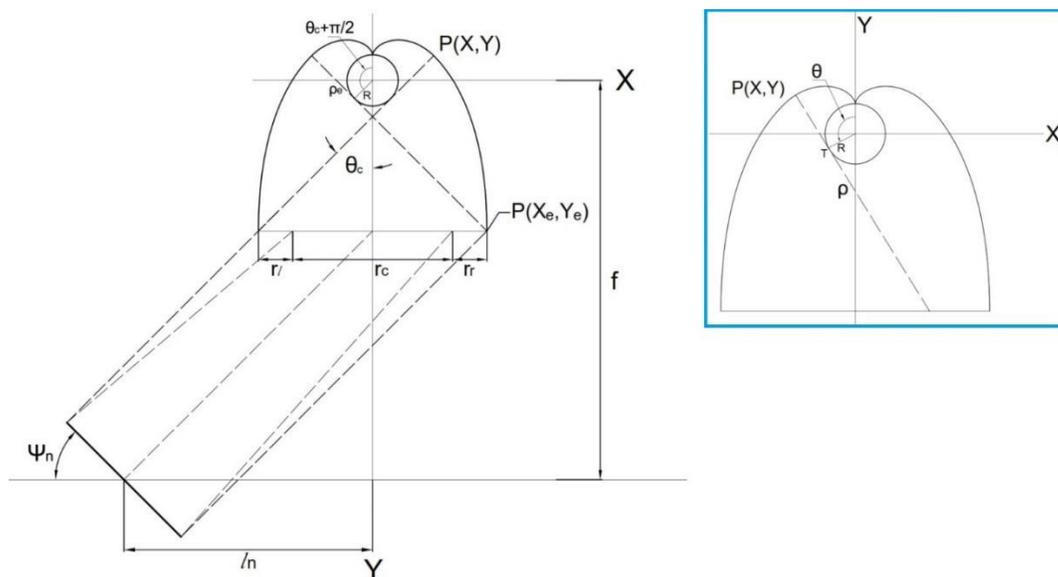
Donde  $f$  es la distancia focal,  $W$  es el ancho del espejo y  $n$  es el número de espejos a la izquierda del LFR como se muestra en la **Figura 2.2**. Las **Ecuaciones 1-2** se resuelven de manera iterativa ( $1 \leq i \leq n$ ) tomando en cuenta como condiciones iniciales:  $l_0 = 0$ ;  $\Psi_0 = 22.5^\circ$  (correspondiente al espejo central) y  $\theta_s = 45^\circ$ .

La distancia entre los espejos, así como los ángulos de inclinación a la derecha del LFR están determinadas por las **Ecuaciones 3-4** respectivamente (donde  $1 \leq r \leq n$ ) [51].

$$l_l = l_r \quad (3)$$

$$\Psi_r = \frac{\theta_s - \arctan\left(\frac{l_r}{f}\right)}{2} \quad (4)$$

Con el fin de determinar la apertura correcta del concentrador secundario CPC ( $R_{pl}$ ), es necesario tomar en cuenta la proyección del último espejo a la izquierda del LFR (**Figura 2.3**).



**Figura 2.3** Elementos del Reflector Secundario CPC

La apertura del concentrador secundario CPC se obtiene mediante la **Ecuación 5** [51].

$$R_{pl} = r_l + r_c + r_r \quad (5)$$

donde

$$r_l = \left( f + \frac{W}{2} \sin \Psi_n \right) \left\{ \tan \left[ \arctan \left( \frac{l_n}{f} + \xi \right) \right] - \tan \left[ \arctan \left( \frac{l_n}{f} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$r_c = W \cos \Psi_n + W \sin \Psi_n \tan \left[ \arctan \left( \frac{l_n}{f} \right) \right] \quad (7)$$

$$r_r = \left( f - \frac{W}{2} \sin \Psi_n \right) \left\{ \tan \left[ \arctan \left( \frac{l_n}{f} \right) \right] - \tan \left[ \arctan \left( \frac{l_n}{f} - \xi \right) \right] \right\} \quad (8)$$

Por otro lado, en un concentrador secundario CPC con un receptor cilíndrico (tubo), el radio del tubo,  $R$ , el ángulo medio de aceptación,  $\theta_c$  y la distancia  $\rho$  (distancia a lo largo de una tangente desde el tubo receptor hasta la curva) están relacionados con el ángulo  $\theta$  (el cual es trazado entre el radio del tubo receptor y el radio del punto tangente,  $T$ , como se muestra en la **Figura 2.3**) mediante las siguientes ecuaciones válidas para las dos secciones de la curva del CPC [56].

$$\rho = R\theta, \quad |\theta| \leq \theta_c + \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

$$\rho = R \left[ \frac{\theta + \theta_c + \frac{\pi}{2} - \cos(\theta - \theta_c)}{1 + \sin(\theta - \theta_c)} \right], \quad \theta_c + \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_c \quad (10)$$

Las dos expresiones resultan equivalentes para  $\rho$  en el punto P, donde  $\theta = \theta_c + \frac{\pi}{2}$ . La curva es generada mediante el incremento de  $\theta$  en radianes, calculando  $\rho$  y obteniendo las coordenadas  $X$  y  $Y$  por medio de [56].

$$X = R \sin \theta - \rho \cos \theta \quad (11)$$

$$Y = -R \cos \theta - \rho \sin \theta \quad (12)$$

La coordenada final,  $X_e$ , se obtiene mediante:

$$X_e = \frac{r_c}{2} + r_l \quad (13)$$

Finalmente, las siguientes ecuaciones acopladas son utilizadas para calcular el radio,  $R$ , del tubo receptor, así como los valores extremos en la geometría del CPC ( $Y_e$  y  $\rho_e$ ) [51].

$$\frac{r_c}{2} + r_l = R \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_c\right) - \rho_e \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_c\right) \quad (14)$$

$$Y_e = -R \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_c\right) - \rho_e \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_c\right) \quad (15)$$

$$\rho_e = R \left[ \frac{2\pi - \cos\left(\frac{3\pi}{2} - 2\theta_c\right)}{1 + \sin\left(\frac{3\pi}{2} - 2\theta_c\right)} \right] \quad (16)$$

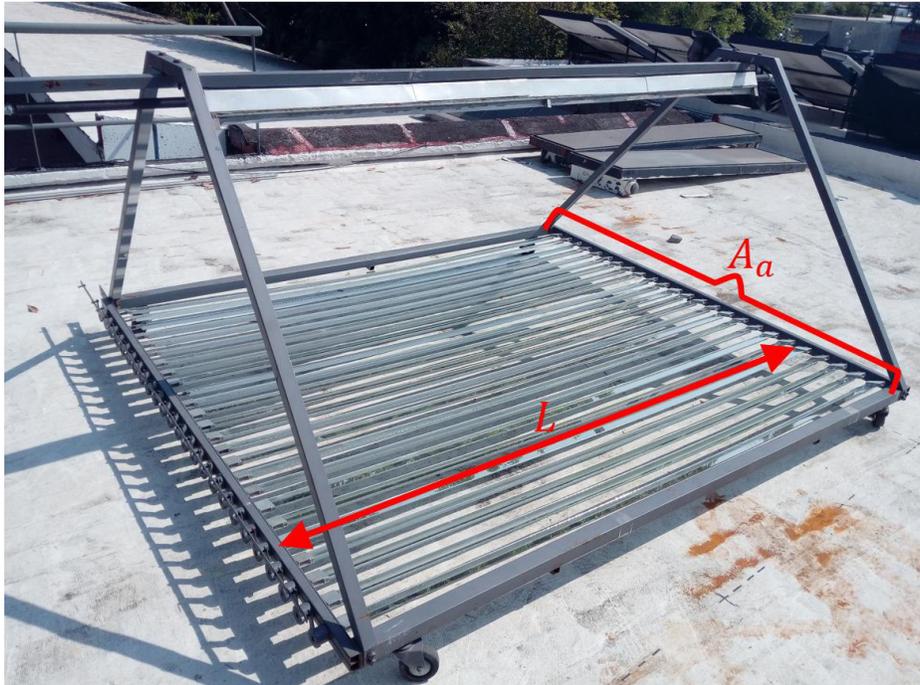
Por tanto, bajo las suposiciones realizadas, así como de acuerdo con las ecuaciones de diseño (1-16) el prototipo LFR consta de los parámetros geométricos mostrados en la **Tabla 2.1**.

**Tabla 2.1** Dimensiones del Prototipo LFR

Parámetro	Valor
Número total de elementos	25
Ancho de espejos $W$	0.06 m
Longitud de los espejos $L$	2.44 m
Distancia focal $f$	1 m
Área de apertura $A_a$	3.6 m <sup>2</sup>

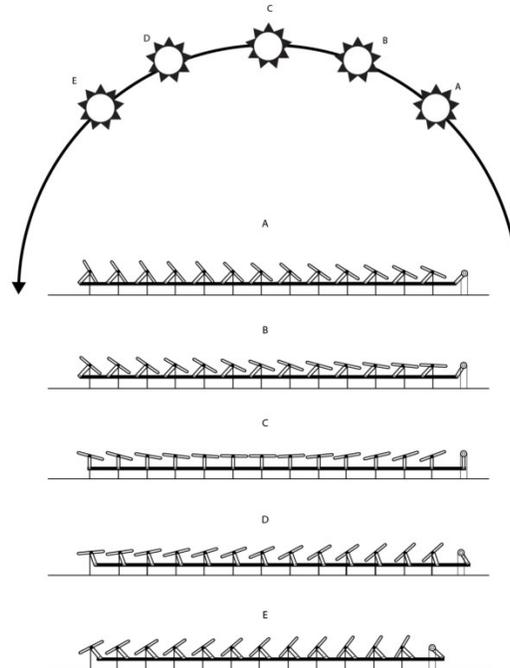
Es importante mencionar que, con el fin de agilizar la construcción de las geometrías de los LFRs en el proceso de optimización, las ecuaciones de diseño fueron programadas en el software Matlab, como se muestra en el **Anexo A.1**.

El prototipo construido y armado se muestra en la **Figura 2.4**.



**Figura 2.4** Prototipo LFR desarrollado en el IER UNAM

En el caso de la cinemática del dispositivo, la base de diseño es una orientación Norte-Sur con un seguimiento Este-Oeste, aunque cada una de las superficies reflectoras debe tener una inclinación específica diferente para poder direccionar los rayos hacia el mismo plano, al hacer el seguimiento del sol, todas las superficies deben moverse de la misma forma y a la misma velocidad durante el día en el barrido del movimiento aparente del sol ( $15^\circ$  por hora) sobre el ecuador como es mostrado en la **Figura 2.5**.



**Figura 2.5** Configuración cinemática del dispositivo para el seguimiento del sol

### 2.1.2 Pruebas experimentales

El prototipo LFR fue caracterizado de manera experimental mediante la aplicación de la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005. Para llevar a cabo las pruebas experimentales se utilizaron equipos especializados, los cuales se encuentran dispuestos en una plataforma diseñada para la realización de pruebas a calentadores y concentradores solares (**Figura 2.6**). Dicha plataforma se encuentra en el laboratorio LAPECAS descrito anteriormente, teniendo los equipos, así como la instalación hidráulica necesaria para llevar a cabo la circulación adecuada del fluido de trabajo (agua en este caso).



**Figura 2.6** Plataforma solar LAPECAS en el IER UNAM

Para la medición de la radiación solar global, se utilizó un piranómetro de la marca Kipp & Zonen modelo CMP6 de primera clase (**Figura 2.7**). El término “primera clase” se refiere a la calibración del instrumento siguiendo la norma ISO 9060. Dicha norma distingue tres clases, la mejor de ellas en términos de calibración es llamada “estándar secundario”, en el cual el instrumento es calibrado mediante la comparación directa con un instrumento primario, la segunda mejor clase es llamada “primera clase”, donde el instrumento es calibrado mediante la comparación directa con el estándar secundario y la última clase es llamada “segunda clase”, en donde el instrumento es calibrado por comparación con la primera clase.



**Figura 2.7** Piranómetro CMP6

La diferencia entre clases se debe además a diversas propiedades en los sensores: tiempo de respuesta, dependencia de temperatura, error direccional, selectividad espectral, respuesta a la inclinación, etcétera. Las propiedades del piranómetro utilizado son mostradas en la **Tabla 2.2**.

*Tabla 2.2 Propiedades del piranómetro*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Clasificación ISO 9060:1990	Primera clase
Rango espectral	285 a 2800 nm
Sensibilidad	5 a 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tiempo de respuesta	<6s
Selectividad espectral	<3%
Respuesta de inclinación	<1%
Radiación máxima	2,000W/m <sup>2</sup>
Temperatura de funcionamiento	-40 a 80 °C

Así mismo, se utilizó otro piranómetro CMP6 adecuado con un anillo de sombra mostrado en la **Figura 2.8**. La combinación del piranómetro junto con el anillo de sombra ofrece una solución simple para la medición de la radiación difusa. El anillo requiere sólo de un simple ajuste cada cierto tiempo con el fin de asegurarse que la cúpula del piranómetro quede cubierta por completo en función del movimiento del sol.



**Figura 2.8.** Piranómetro CMP6 con anillo de sombra

Así mismo, es de destacar que la plataforma cuenta con medidores de flujo, temperatura, velocidad del viento, etcétera, todos dispuestas en una posición estratégica para poder evaluar adecuadamente los dispositivos solares.

El procedimiento para la caracterización experimental del LFR se llevó a cabo mediante el seguimiento de la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005, la cual determina el desempeño térmico por medio de la obtención de la eficiencia instantánea por medio de la primera ley de la termodinámica a través de la **Ecuación 17**. Es importante mencionar que dicha norma está enfocado a calentadores y colectores solares, y no a concentradores solares, sin embargo, se decidió utilizar esta norma al no existir alguna que determine el desempeño térmico de concentradores [57].

$$\eta = \frac{\dot{m}c_w(T_{out} - T_{in})}{A_a G_D} \quad (17)$$

Así mismo, la norma establece los siguientes aspectos y condiciones necesarias para la realización de las pruebas experimentales:

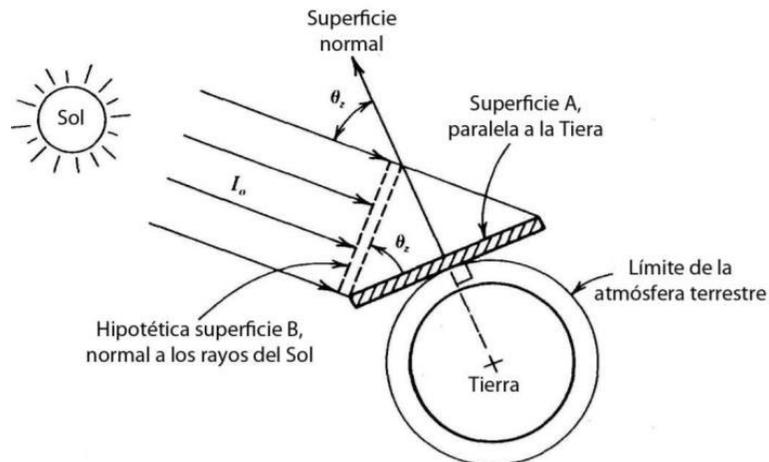
- Las pruebas deben ser desarrolladas de tal manera que el promedio de la irradiancia global medida en una superficie normal a la dirección de incidencia del flujo de energía solar directa no sea menor de 800 W/m<sup>2</sup>.
- El valor de temperatura ambiente para todos los puntos de prueba reportados que comprendan la curva de eficiencia debe ser menor a 30°C.

- El flujo de agua está especificado de acuerdo con el área de captación:  
 $0.02kg/sm^2(A) = 0.02kg/sm^2(3.6m^2) = 0.072 kg/s \approx 4.25 l/min.$
- Se toma en cuenta una distribución de temperaturas de 0%, 30%, 60% y 90% de la temperatura de operación máxima del dispositivo, así mismo, por lo menos 4 puntos deber ser tomados por cada valor de temperatura de entrada.
- Para obtener condiciones de estado estable o cuasi estable el fluido debe circular a través del dispositivo a los valores adecuados de temperatura de entrada y de fluido hasta que permanezca constante dentro del  $\pm 2\%$  y  $\pm 0.000315$  l/s respectivamente.

Por tanto, para la caracterización del LFR se realizaron 4 pruebas experimentales, cada una con un valor diferente de temperatura de entrada de agua ( $T_{in} = T_{env}$ ,  $T_{in} = 42.5^\circ C$ ,  $T_{in} = 61^\circ C$  y  $T_{in} = 78^\circ C$ ), obteniendo así una gráfica de eficiencia de 4 puntos, en donde se puede obtener una línea de tendencia de la forma  $y = b - mx$ , así mismo, la orientación del LFR fue de Norte-Sur (N-S), mientras que el seguimiento aparente del sol fue en dirección Este-Oeste (E-O).

Así mismo, en las 4 pruebas realizadas, el LFR junto con la plataforma solar del laboratorio LAPECAS fueron inclinados de acuerdo con la altura angular del sol correspondiente a los días donde se realizaron las pruebas (aproximadamente  $42^\circ$  de inclinación), esto con el fin de disminuir el efecto coseno.

El efecto coseno es llamado así a la reducción de la radiación incidente debida al coseno del ángulo entre la radiación solar y una superficie normal denotado por  $\theta_z$  en la **Figura 2.9**, dicho de otra manera, si una superficie hipotética se coloca de forma normal a los rayos del sol, la radiación que incide sobre ésta será la máxima posible.



**Figura 2.9** Efecto coseno

Es así como se realizó el acomodo del concentrador LFR junto con la plataforma solar tal como se muestra en la **Figura 2.10**. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo los días 7,12,13 y 14 de Diciembre del año 2017 a partir del mediodía solar (aproximadamente a las 12:14 horas) midiendo y guardando cada minuto datos de temperatura de entrada y salida, radiación global y difusa, flujo másico, así como velocidad y dirección del viento, todo ello durante un periodo de 40 minutos aproximadamente.

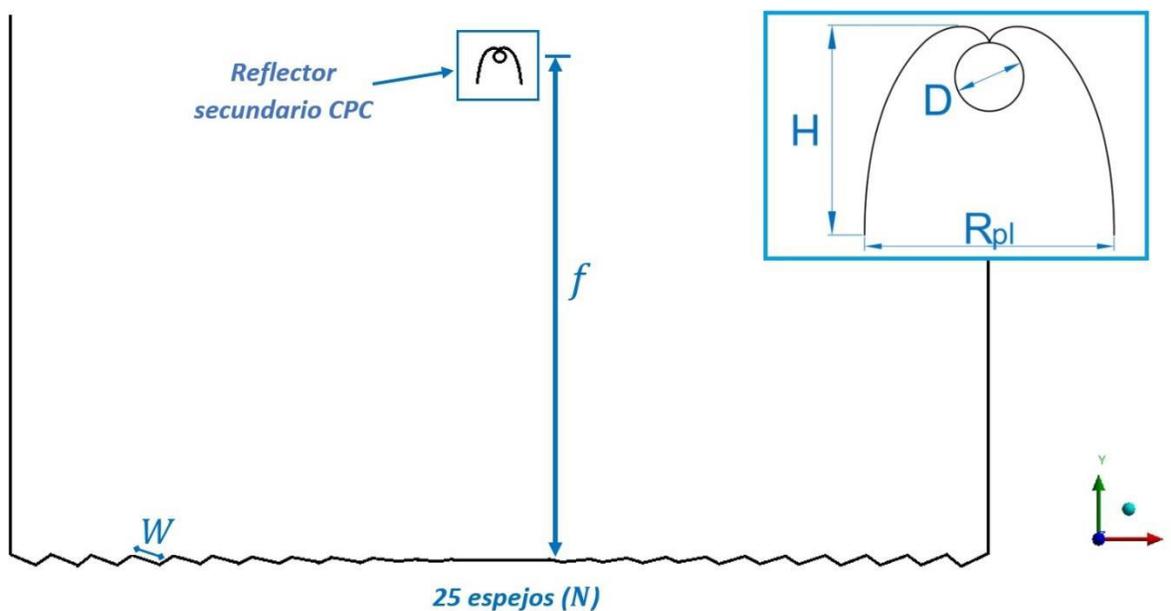


**Figura 2.10** Acomodo del LFR

## 2.2 Geometría

A partir de los parámetros geométricos del prototipo LFR se realizó la construcción del modelo geométrico del prototipo LFR en 2D utilizando el software comercial CFD Ansys Fluent®. La **Figura 2.11** muestra el modelo geométrico en 2D, como se ha mencionado, el prototipo LFR consta de 25 espejos como concentrador primario con una distancia focal de 1 m (dimensiones expuestas en la **Tabla 2.1**), un área de apertura de  $3.6 \text{ m}^2$  y un área de receptor de  $0.226 \text{ m}^2$ , las cuales fueron calculadas de acuerdo a la referencia [58].

El tubo receptor está hecho de cobre y se encuentra dentro del concentrador secundario CPC, llamado propiamente concentrador parabólico compuesto de tipo cúspide (**Figura 2.11**).



**Figura 2.11** Modelo 2D de geometría del LFR

La

**Tabla 2.3** muestra otros parámetros geométricos de la geometría del prototipo LFR.

**Tabla 2.3** Dimensiones de la Geometría del Prototipo LFR

Parámetro	Valor
Diámetro del tubo receptor ( $D$ )	0.0254 m
Área de apertura ( $A_a$ )	3.6 m <sup>2</sup>
Área de receptor ( $A_r$ )	0.226 m <sup>2</sup>
Apertura del CPC ( $R_{pl}$ )	0.094 m
Altura del CPC ( $H$ )	0.078 m

Así mismo, es importante mencionar que las geometrías construidas durante el proceso de optimización tienen una disposición similar a la mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.Figura 2.11.**

## 2.3 Ecuaciones Gobernantes

El modelo numérico de todas las geometrías generadas del LFR toman en cuenta las ecuaciones gobernantes que incluyen: conservación de la masa, cantidad de movimiento, así como de la energía [59,60] (ver Ecuaciones. 18-19). Las ecuaciones gobernantes son resueltas mediante el método numérico de volumen finito, así mismo el modelo numérico se basa en condiciones de estado estable, flujo laminar y propiedades del aire variables en función de la temperatura.

La ecuación de continuidad y cantidad de movimiento se definen como [59,60]:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{18}$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla^2 (\mu \mathbf{v}) + \rho g_y \tag{19}$$

Así mismo, con el fin de tomar en cuenta los efectos boyantes del aire, las propiedades, como densidad,  $\rho$ , conductividad térmica,  $k$ , calor específico,  $c$ , y viscosidad,  $\mu$  son aproximadas por medio de polinomios en función de la temperatura de la forma  $\phi = \sum_{i=0} \delta_i T^i$  [61], donde  $\phi$  representa la propiedad del fluido,  $\delta_i$  es el coeficiente de regresión

y  $T$  es la temperatura en escala absoluta Kelvin. Los coeficientes son dados en la **Tabla 2.4** con un rango de validez de temperatura de 274 K a 874K.

**Tabla 2.4** Parámetros de Propiedades del Fluido como Función de la Temperatura.

	$\rho$	$k$	$c$	$\mu$
$\delta_0$	3.60653	$1.000 \times 10^{-3}$	1050.3	$6.941 \times 10^{-7}$
$\delta_1$	-0.0141735	$9.040 \times 10^{-5}$	-0.3810	$7.635 \times 10^{-8}$
$\delta_2$	$2.682 \times 10^{-5}$	$-2.900 \times 10^{-8}$	$8.900 \times 10^{-4}$	$-6.933 \times 10^{-11}$
$\delta_3$	$-2.450 \times 10^{-8}$	$4.640 \times 10^{-12}$	$-4.260 \times 10^{-7}$	$4.960 \times 10^{-14}$
$\delta_4$	$8.667 \times 10^{-12}$	$-1.84 \times 10^{-27}$	$2.434 \times 10^{-12}$	$-1.568 \times 10^{-17}$

Además, la ecuación de la energía es acoplada a la transferencia de calor radiativa mediante el termino  $q_R$  [60,62]:

$$\mathbf{v} \cdot \nabla(\rho c T) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot q_R \quad (20)$$

Donde el término a la izquierda representa la transferencia de energía convectiva. El primer y segundo término a la derecha representa la transferencia de calor debido a la conducción y radiación respectivamente. El término radiativo está dado por la **Ecuación. 21** [60,62].

$$\nabla \cdot q_R = \kappa \left( 4\sigma T^4 - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (21)$$

Donde  $\kappa$  es el coeficiente de absorción,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $I$  es la intensidad radiativa y  $\Omega$  es el ángulo sólido. Además, el término radiativo se reduce a la ecuación estándar de Steffan-Boltzmann una vez que la intensidad radiativa se integra sobre todo el espectro [60,62].

La intensidad de radiación se obtiene resolviendo la ecuación de transferencia radiativa (RTE, por sus siglas en inglés) mediante su integración sobre la dirección y variable espectral, utilizando el método de ordenadas discretas (DOM). La ecuación RTE toma en

cuenta la intensidad del campo radiativo como una función de la ubicación, dirección y variable espectral [62].

$$\frac{\partial I_{\eta}}{\partial s} = j_{\eta} - \kappa_{\eta} I_{\eta} - \sigma_{s\eta} I_{\eta} + \frac{\sigma_{s\eta}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\eta}(\hat{s}_i) \Phi_{\eta}(\hat{s}_i, \hat{s}) d\Omega_i \quad (22)$$

La ecuación RTE rige el comportamiento de transferencia de calor por radiación en presencia de un medio de absorción, emisión y dispersión. Así mismo, los términos negativos representan la atenuación de la intensidad de radiación debido a la absorción y dispersión hacia afuera ( $\kappa_{\eta} I_{\eta}$  y  $\sigma_{s\eta} I_{\eta}$ , respectivamente), mientras que los términos positivos a la derecha de la ecuación representan el aumento de la intensidad de radiación debido a la emisión y dispersión hacia dentro, ya que al mismo tiempo que un rayo pierde energía al pasar por medio participativo (hacia afuera), también obtiene energía por emisión ( $j_{\eta}$ ) desde otras direcciones. Finalmente se asume un medio gris, así como una dispersión isotrópica ( $\kappa_{\eta} = \kappa$ ), obteniendo con ello el término fuente para la ecuación de la energía.

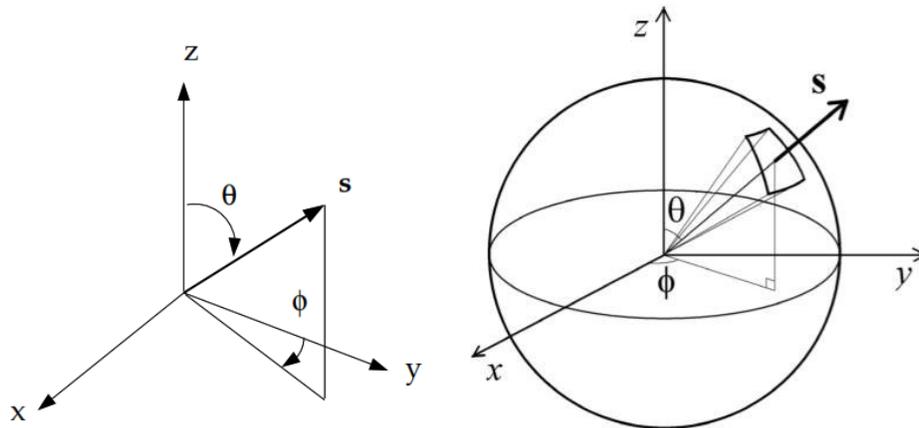
Es importante mencionar que el método de ordenadas discretas (también conocido como método  $S_n$ ), es una forma de resolver de manera aproximada la ecuación RTE al discretizar tanto el dominio “xyz” como las variables angulares que especifican la dirección de la radiación, dicha discretización se realiza tanto de manera espacial (que es la que se lleva a cabo en la gran mayoría de los problemas) como de manera angular. A continuación, se mencionan los aspectos más importantes de la discretización angular.

### 2.3.1 Discretización angular

A diferencia de un sistema de coordenadas cartesianas que se utiliza para la generación de la malla con la que se llega a obtener la solución asociada al flujo de fluido, la discretización angular de la RTE (por medio del método DO) se basa, de manera general, en un sistema de coordenadas esféricas centrado en el origen global (discretización angular), dicha discretización resulta ser independiente a la malla asociada al flujo de fluido.

Dentro del software de Ansys Fluent®, se tiene el control de la discretización angular al especificar el número de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  (polar y acimutal, respectivamente) teniendo una discretización de ángulos sólidos  $N_{\theta} \times N_{\phi}$ , llamados ángulos de control (**Figura 2.12**). En cálculos asociados específicamente a geometrías en 2D, solo se toman en cuenta cuatro

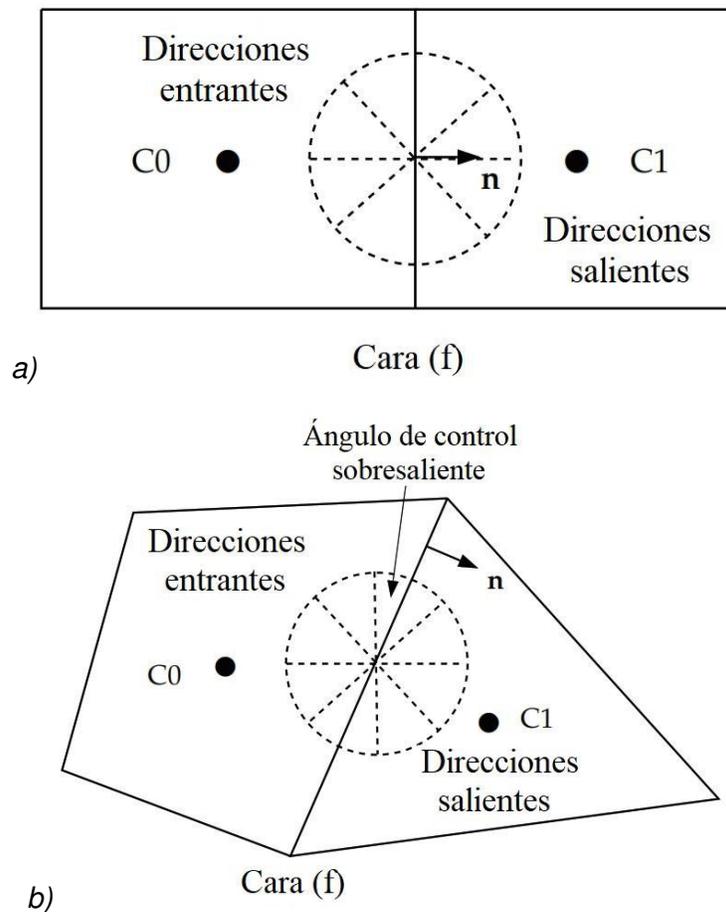
octantes debido a la simetría existente, por tanto, se resuelven un total de  $4N_\theta N_\phi$  direcciones  $s$ , así mismo, en 2D, el número de divisiones del ángulo polar resulta irrelevante.



**Figura 2.12** Ángulos de control

Así mismo, es importante mencionar que cada discretización angular puede ser subdividida en elementos más pequeños conocidos como pixeles. Los pixeles en el método DO son análogos al refinamiento de la malla y su contribución a la solución general global depende de la calidad de la malla en la zona del fluido. Las mallas estructuradas requieren un menor número de pixeles por discretización angular, mientras que las mallas no estructuradas requieren un mayor número de pixeles para obtener el mismo nivel de precisión [63].

Cuando se utilizan mallas estructuradas es posible alinear la discretización angular global con la cara del volumen de control (**Figura 2.13a**), sin embargo, cuando las caras del volumen de control no se alinean con la discretización angular global, se llega a tener un problema conocido como ángulo de control sobresaliente (**Figura 2.13b**).



**Figura 2.13** Cara del volumen de control a) sin ángulo de control sobresaliente b) con ángulo de control sobresaliente

Por tanto, cada ángulo de control sobresaliente es dividido en  $N_{\theta_p} \times N_{\phi_p}$  píxeles. Para problemas que involucran simetría, periodicidad, especularidad y geometrías semi-transparentes, un número de píxeles de  $3 \times 3$  resulta suficiente.

## 2.4 Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera utilizadas tanto para el prototipo LFR como para todo el proceso de optimización son mostradas en la geometría en 2D de la **Figura 2.14**. Así mismo, la **Tabla 2.5** resume las condiciones ambientales consideradas para el modelo numérico [51] (tanto para el prototipo como para el proceso de optimización). En general, las condiciones de frontera toman en cuenta los fenómenos de transferencia de calor por convección y conducción para las paredes del tubo receptor y los espejos del LFR, así mismo, se

consideran las propiedades radiativas de todas las superficies, la temperatura ambiente, velocidad del viento y la radiación incidente. Los valores para las propiedades de los espejos y tubo receptor son mostrados en la **Tabla 2.6** [64,65].

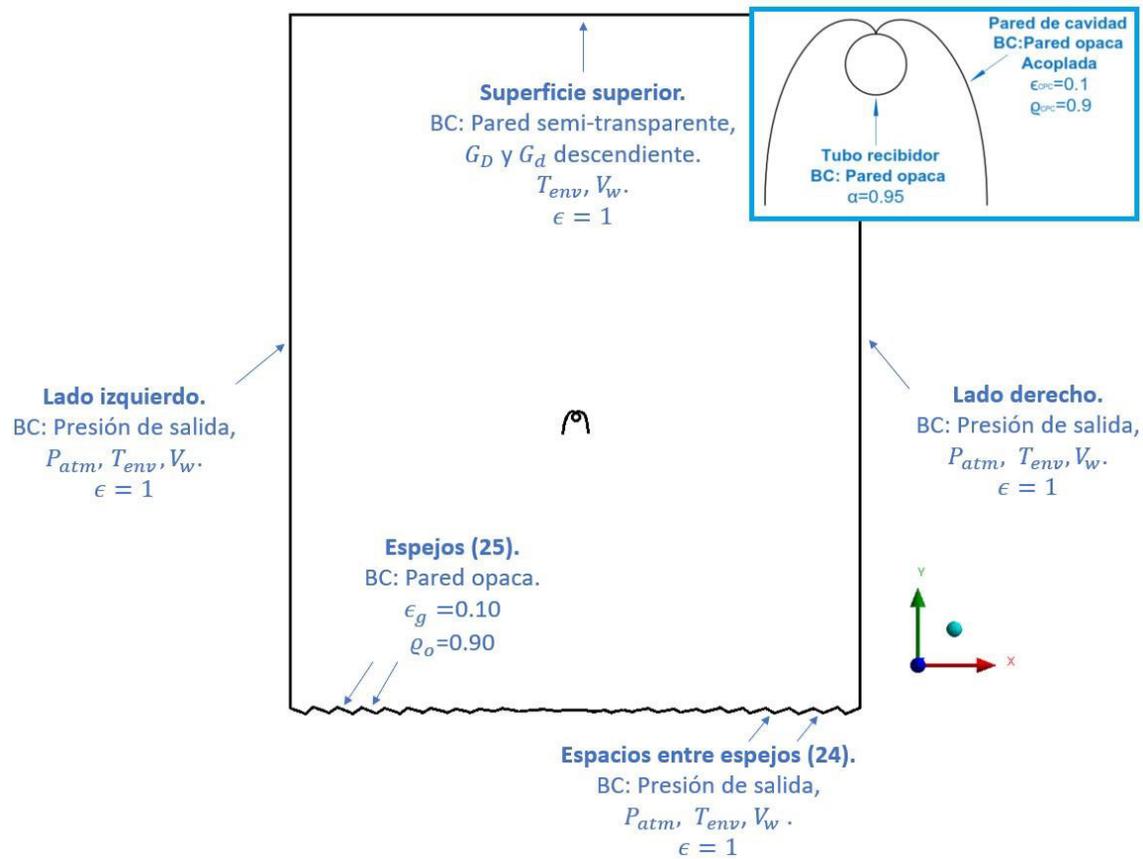


Figura 2.14 Condiciones de frontera del modelo numérico

Tabla 2.5 Condiciones ambientales consideradas.

Parámetro	Valor (Prototipo)	Valor (Proceso optimización)
Temperatura ambiente, $T_{env}$	26.3 °C	24.3 °C
Radiación directa, $G_D$	905.7 $W/m^2$	811.1 $W/m^2$
Radiación difusa, $G_d$	131.6 $W/m^2$	131.7 $W/m^2$
Presión atmosférica, $P_{atm}$	101.325 $kPa$	101.325 $kPa$
Velocidad del viento, $V_w$	0.63 $m/s$	0.6 $m/s$

Tabla 2.6. Propiedades de los materiales.

Material	Parámetro	Valor
Tubo receptor	Densidad, $\rho_t$	8978 $kg/m^3$
	Conductividad térmica, $k_t$	387.6 $W/m\ ^\circ C$
	Calor específico, $c_t$	381 $J/kg\ ^\circ C$
	Absortividad, $\alpha$	0.95
Espejos	Densidad, $\rho_g$	2650 $kg/m^3$
	Conductividad térmica, $k_g$	1.5 $W/m\ ^\circ C$
	Calor específico, $c_g$	786 $J/kg\ ^\circ C$
	Emisividad, $\epsilon_g$	0.10
	Reflectividad, $\rho_o$	0.90
Pared cavidad CPC	Densidad, $\rho_{cpc}$	2719 $kg/m^3$
	Conductividad térmica, $k_{cpc}$	202.4 $W/m\ ^\circ C$
	Calor específico, $c_{cpc}$	871 $J/kg\ ^\circ C$
	Emisividad, $\epsilon_{cpc}$	0.10
	Reflectividad, $\rho_{CPC}$	0.90

## 2.5 Enfoque Numérico

El modelo numérico del LFR es resuelto utilizando el método numérico de volumen finito en el software comercial CFD, ANSYS-Fluent® v16.0 utilizando una computadora con 8 núcleos Intel® Core™ i7-6820HQ con 16 GB en RAM. Las ecuaciones gobernantes de continuidad, cantidad de movimiento, energía y RTE son resueltas con el fin de obtener la distribución de velocidad, temperatura y radiación. Para la discretización espacial de las ecuaciones de cantidad de movimiento, energía y ordenadas discretas se elige un esquema “upwind” de segundo orden con un acoplamiento de presión-velocidad de tipo SIMPLE.

Los valores de los residuales se monitorearon para todas las variables y se consideró un criterio de convergencia cuando éstos son inferiores a  $1 \times 10^{-6}$  para todas las ecuaciones. Finalmente, la generación de entropía tanto de forma local como global es calculada y guardada como un postproceso a través de un algoritmo iterativo implementado por medio de una función definida por el usuario (UDF), la cual es mostrada en el **Anexo A.2**. La **Figura 2.15** muestra un esquema general del procedimiento para la solución de las ecuaciones.

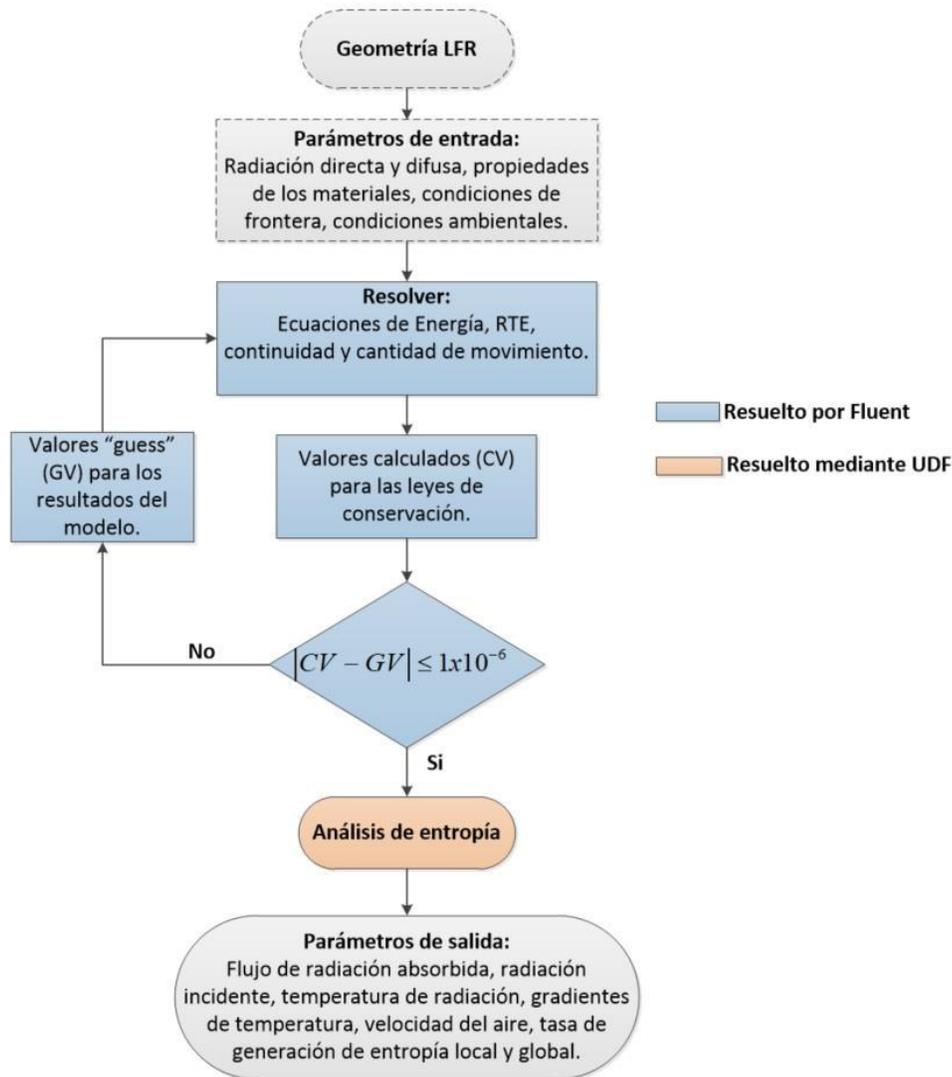


Figura 2.15 Diagrama de flujo para el modelado del LFR

## 2.6 Formulación de Análisis de Independencia

Con el fin de disminuir dos de los errores inherentes al modelo numérico, se llevó a cabo un análisis de independencia de malla, así como un análisis de independencia angular. Al unir el método DO junto con el método numérico de volumen finito se llega a tener dos deficiencias principales que afectan la exactitud de los resultados. Estas deficiencias son conocidas como la falsa dispersión (false scattering) y efecto de rayo (ray effect) [66]. La falsa dispersión es un error vinculado a la discretización espacial del dominio cuando la

dirección de propagación de la radiación forma un ángulo con las líneas de la malla. Este error puede contrarrestarse mediante la refinación de la malla utilizada en el modelo o alineando la malla con la dirección de propagación del haz de radiación [66], sin embargo, ésta última estrategia llega a ser complicada de implementar en geometrías más complejas donde la propagación del haz de radiación se produce en múltiples direcciones diferentes.

El efecto de rayo, también conocido como concentración de rayo, es un error numérico que surge al aproximar la intensidad de radiación a un número finito de direcciones [67] y está asociado al DOM. Este error numérico es independiente de la discretización espacial y sus efectos pueden ser reducidos utilizando una discretización angular más fina, es decir, aumentando el número de subdivisiones de los ángulos de control.

Los análisis de sensibilidad se llevaron a cabo mediante la variación en el número de elementos en la malla con una discretización angular constante de  $3 \times 100$  para el ángulo polar ( $N_\theta$ ) y acimutal ( $N_\phi$ ) respectivamente, una vez que los resultados del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor se estabilizaron a un determinado número de elementos se procedió a realizar el análisis de independencia angular mediante la variación en los ángulos de control hasta que no existiera variación en los valores de los parámetros de salida [67]. Debido a que el presente trabajo se tiene una geometría en dos dimensiones, el ángulo polar,  $N_\theta$ , es irrelevante [59]. Es importante mencionar que en el método DO, la fineza de la discretización angular es análoga a escoger un mayor número de rayos cuando se utilizan otros tipos de métodos como el de Monte Carlo (MCRTM) o el modelo de transferencia de radiación discreta (DTRM) [63]. Todas las simulaciones fueron realizadas para un número de 1200 iteraciones con el fin de asegurar que los valores de residuales para todas las variables fueran menores a  $1 \times 10^{-6}$ , además, se considera que el sol se encuentra en la posición cenit, es decir, con un ángulo de incidencia solar igual a cero tanto para las simulaciones realizadas al prototipo como en todo el proceso de optimización. Lo anterior debido a que en la posición cenit (medio día solar) se tiene el máximo valor de radiación solar en el día.

## 2.7 Formulación de la Validación del Modelo Numérico

Para la validación del modelo numérico, se realizó la comparación de la eficiencia térmica, eficiencia exergética, así como de la temperatura de salida del fluido de trabajo como sigue:

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia térmica es calculada tanto para el modelo numérico como para los experimentos a través de [68].

$$\eta_j = \frac{\dot{m}c_w(T_{out,j} - T_{in})}{A_a G_D} \quad (23)$$

Donde  $j$  es el subíndice tanto para el modelo ( $\eta_{mod}$  y  $T_{out,mod}$ ) como para los experimentos ( $\eta_{exp}$  y  $T_{out,exp}$ ).

La temperatura de salida del modelo numérico CFD,  $T_{outmod}$ , se obtiene de acuerdo con

$$T_{outmod} = \frac{Q_{mod} \cdot A_r}{\dot{m}c_w} + T_{in} \quad (24)$$

Donde  $Q_{mod}$  es la tasa de transferencia de calor promedio en el tubo receptor calculado por el modelo numérico en W/m<sup>2</sup>, y  $A_r$  es el área del tubo receptor en m<sup>2</sup>. La temperatura de salida experimental,  $T_{out,exp}$ , se obtiene a partir de las pruebas experimentales.

La eficiencia exergética experimental del LFR tanto para el modelo numérico como para las pruebas experimentales se calcula como [69].

$$\eta_{e_j} = \frac{\Delta \dot{E}x_w}{\dot{E}x_{solar,in}} \quad (25)$$

La tasa total de exergía del agua,  $\Delta \dot{E}x_w$ , se obtiene como [70]

$$\Delta \dot{E}x_w = \dot{E}x_{w,out} - \dot{E}x_{w,in} \quad (26)$$

$$\dot{E}x_{w,out} = \dot{m}c_w \left[ (T_{out,j} - T_{env}) - T_{env} \ln \left( \frac{T_{out,j}}{T_{env}} \right) \right] \quad (27)$$

$$\dot{E}x_{w,in} = \dot{m}c_w \left[ (T_{in} - T_{env}) - T_{env} \ln \left( \frac{T_{in}}{T_{env}} \right) \right] \quad (28)$$

Donde  $\dot{E}x_{w,out}$  es la exergía del agua a la salida, mientras que  $\dot{E}x_{w,in}$  es la exergía a la entrada del agua. La exergía de la radiación solar,  $\dot{E}x_{solar,in}$ , está dada por [71].

$$\dot{E}x_{solar,in} = A_r G_D \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{env}}{T_{sun}} \right) \right] \quad (29)$$

Donde  $T_{sun}$  es la temperatura del sol (5777 K) [69].

## 2.8 Formulación de la Generación de Entropía

La generación de entropía dentro del LFR es obtenida por los mecanismos de transferencia de calor y fricción del fluido (aire). La formulación local de la tasa de generación de entropía se puede obtener utilizando un balance de entropía para un volumen infinitesimal

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{J}_s + s_p \quad (30)$$

Donde  $Ds/Dt$  es la derivada sustancial de la entropía específica,  $\vec{J}_s$  es el flujo de entropía y  $s_p$  es la tasa de generación de entropía. En el caso de un fluido Newtoniano, ambos tensores pueden ser expresados en términos tanto de la viscosidad dinámica como del gradiente de velocidad [72], por lo que la densidad de generación de entropía se reduce a

$$s_p = \frac{k(\nabla T)^2}{T^2} + \frac{\Delta : \tau}{T} \quad (31)$$

Donde  $\Delta$  y  $\tau$  son los tensores de deformación y esfuerzo respectivamente, además, “:” es el doble producto punto. La tasa de generación de entropía ( $s_p$ ) se separa en dos contribuciones,  $s_h$  es la contribución debido a la transferencia de calor y  $s_v$  es la contribución debido a la fricción del fluido. En el caso de dos dimensiones, cada contribución es expresada como:

$$s_h = \frac{k}{T^2} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (32)$$

$$s_v = \frac{\mu}{T} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (33)$$

Además, para un dispositivo LFR es importante considerar la generación de entropía local debido a la radiación ( $s_r$ ), la cual es determinada en cada celda del LFR como

$$s_r = \frac{Y_{loss}}{T_{rad}} = \frac{Y_{s/inc} - Y_{refl}}{T_{rad}} \quad (34)$$

Donde  $Y_{s/inc}$  es el flujo local de radiación incidente,  $Y_{refl}$  es el flujo local de radiación reflejada y  $T_{rad}$  es la temperatura de radiación expresada como [59].

$$T_{rad} = \left( \frac{G_{inc}}{4\sigma} \right)^{1/4} \quad (35)$$

Siendo  $G_{inc}$  la radiación incidente en las superficies y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann. La temperatura de radiación es la temperatura cuando la superficie es considerada como un cuerpo negro cuando es calentada únicamente por la radiación incidente.

Por tanto, la generación total de entropía local en el LFR es modificada al incluir la contribución radiativa:

$$s_p = s_h + s_v + s_r \quad (36)$$

La generación de entropía global debido a transferencia de calor, fricción de fluido y radiación se obtiene mediante la integración de las **Ecuaciones. 32-34**.

$$S_i = \int s_i dA \quad (37)$$

Para  $i = \{h, v, r\}$ . Por tanto, la generación de entropía total en el LFR es calculada a través de la suma de las tres contribuciones.

## 2.9 Proceso de Optimización

Con el fin de poder obtener la geometría óptima del LFR, se procedió a realizar el método de Programación Evolutiva (EP). El cual es un método de optimización metaheurístico basado en los algoritmos evolutivos, tales como los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés). La principal ventaja del EP sobre el GA es la flexibilidad en la representación de cada uno de los individuos que se toman en cuenta. En este trabajo, cada individuo generado del LFR es representado como una secuencia de números reales para los valores de los diferentes parámetros geométricos. La **Tabla 2.7** muestra una secuencia general del algoritmo EP utilizado en el proceso de optimización.

**Tabla 2.7** Algoritmo de Programación Evolutiva

---

Generación Inicial
Realizar
{
Exponer la generación al ambiente;
Calcular la función fitness a cada individuo de la generación;
Mutar aleatoriamente cada padre;
Comparar la función fitness entre padres y descendencia;
Seleccionar los mejores individuos para formar una nueva generación;
}
Terminar (Hasta que se satisfice la condición final)

---

Los individuos de cada generación se obtienen con base en las ecuaciones de diseño mostradas en la Sección 2.1.1. Cada uno de los individuos es resuelto a través de las ecuaciones gobernantes (Sección 2.3) tomando en cuenta las condiciones ambientales, así como las propiedades de los materiales (Sección 2.4), esto con el fin de poder llevar a cabo el análisis de generación de entropía (Sección 2.7) a manera de un postproceso, todo esto por medio de técnicas de CFD (**Figura 2.15**).

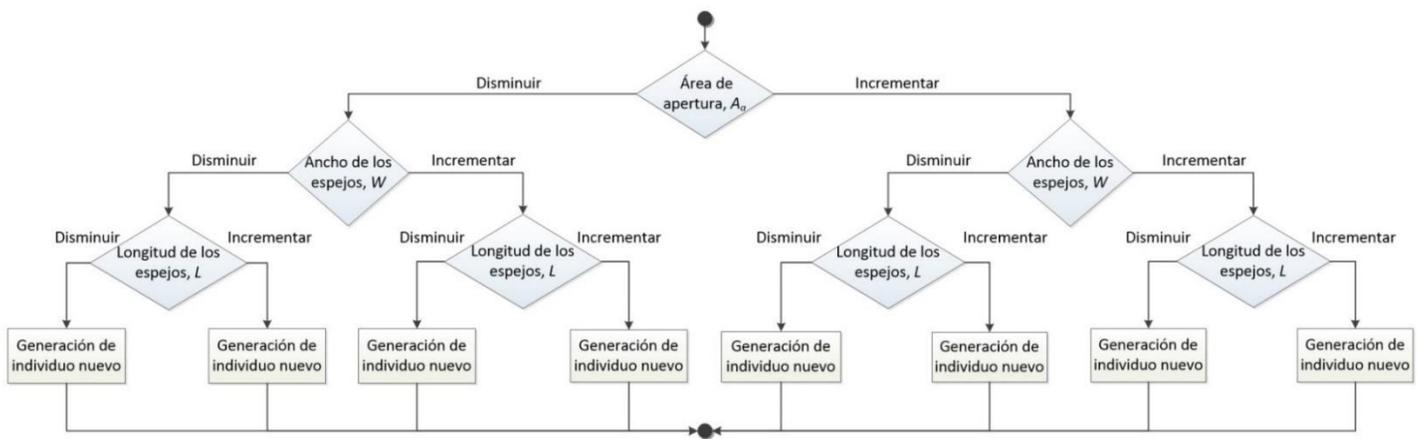
Con el fin de obtener una medida del rendimiento de cada individuo, se estableció una función fitness. La función fitness ( $F_f$ ) toma en cuenta la maximización del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor ( $R_{abs}$ ) junto con la minimización de la tasa total de generación de entropía en el LFR ( $S_{gen}$ ).

$$F_f = \frac{R_{abs}}{S_{gen}} \quad (38)$$

Así mismo, se definieron ciertas restricciones con el fin de tener un espacio de búsqueda para los soluciones. Las restricciones tomadas en cuenta fueron el área de apertura, el ancho de los espejos, así como la longitud de éstos para cada uno de los individuos del LFR:

$$\begin{aligned}
 1 &\leq A_a \leq 8 && (m^2) \\
 0.04 &\leq W \leq 0.1 && (m) \\
 1 &\leq L \leq 3 && (m)
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

En cada iteración, el operador de mutación se aplica a cada individuo del LFR en la población del método EP con el fin de generar un nuevo individuo (descendencia). El operador de mutación altera cada individuo con el fin de explorar el espacio de búsqueda del diseño. En cada individuo del LFR se puede incrementar o disminuir lo siguiente: el área de apertura, el ancho de los espejos y la longitud de éstos, con el fin de poder generar un nuevo individuo. La **Figura 2.16** muestra un diagrama de flujo sobre el operador de mutación que se siguió en el presente trabajo.



**Figura 2.16** Operador de mutación

En cada iteración, se obtiene el doble del número de individuos correspondientes a los padres y su descendencia (obtenida a partir del operador de mutación). Del total de individuos de cada generación, la mejor mitad en términos de su función fitness es seleccionada para formar parte de la siguiente generación y posteriormente ser mutada nuevamente. En el presente trabajo, se consideró una pequeña población por generación (es decir, 6 individuos), esto es debido al tiempo computacional requerido para realizar la simulación CFD asociada a cada individuo. Así mismo, con el objetivo de agilizar la

mutación de las geometrías, el operador de mutación fue programada en el software Matlab como se muestra en el **Anexo A.3**.

## 2.10 Proceso Global

El proceso global llevado a cabo en el presente trabajo, así como la interacción entre el EP, la tasa de generación de entropía y las técnicas de CFD se muestra en la **Figura 2.17**.

El proceso comienza con una generación inicial formada por 6 configuraciones geométricas diferentes (individuos) del LFR. Cada individuo es sometido al operador de mutación mostrado en la **Figura 2.16**, con ello se obtiene el doble de individuos en la generación (12 en este caso). Cada uno de los 12 individuos es transformado en geometrías por medio de técnicas de CFD con el fin de que cada una pueda ser resuelta de acuerdo con lo mostrado en la **Figura 2.15**, posterior a la realización de la simulación correspondiente, es posible obtener como resultado el flujo de radiación absorbida en el tubo receptor en cada uno de los individuos. Después, y como se mencionó, la generación de entropía local y global es calculada y guardada como un postproceso a través de un algoritmo iterativo implementado por medio de una función definida por el usuario (UDF). Con ambos resultados se realiza el cálculo de la función fitness.

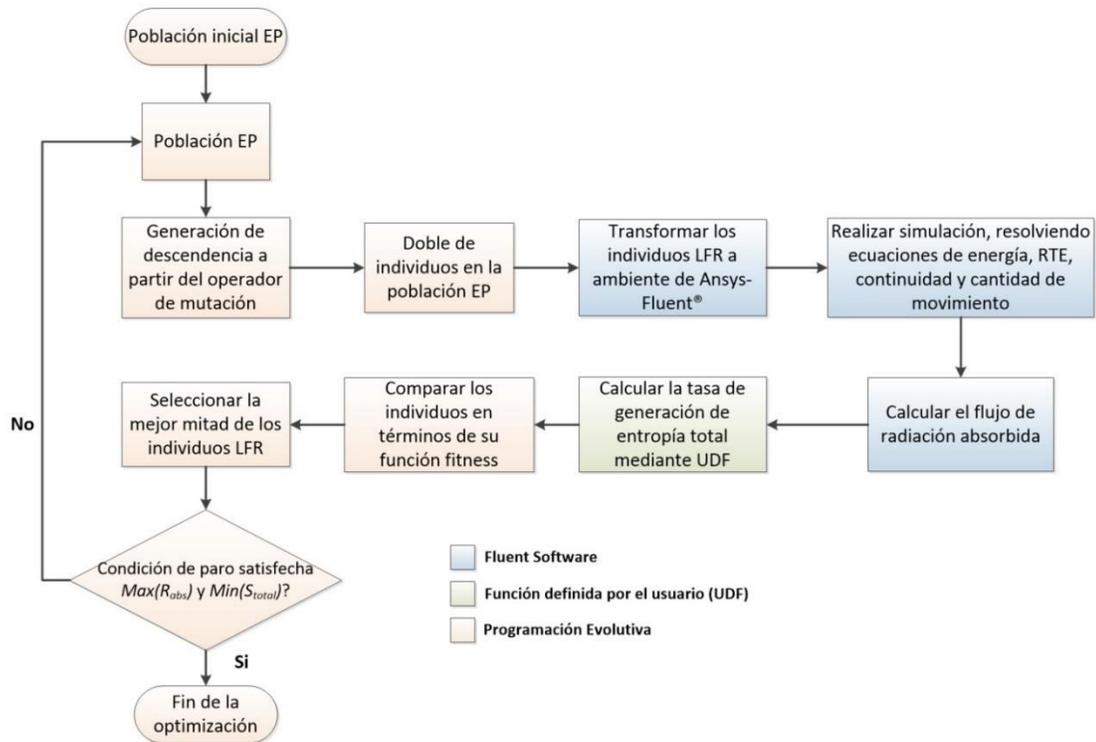


Figura 2.17 Proceso global

Posteriormente, se lleva a cabo el cálculo de la función fitness de cada uno de los 12 individuos, esto con la finalidad de realizar su comparación y poder seleccionar la mejor mitad de los individuos. Seleccionados los mejores individuos para una nueva generación, se procede a analizar la condición de paro del proceso de optimización, en caso de que la condición aún no se cumpla, los individuos de la nueva generación se someten de nueva cuenta al operador de mutación repitiendo el proceso.

*CAPÍTULO 3.  
RESULTADOS DEL  
PROTOTIPO LFR*

La primera parte de los resultados obtenidos en el presente trabajo se basan en el análisis de energía, así como el análisis de la tasa de generación de entropía tanto global como local en el prototipo LFR. En primera instancia, la Sección 3.1 presenta los resultados obtenidos de manera experimental al prototipo LFR localizado en las instalaciones del IER. Después, se muestran los resultados del análisis de sensibilidad tanto de independencia de malla como de independencia angular (Sección 3.2), con el fin de que el modelo a validar tenga la cantidad de elementos suficientes y así evitar un uso excesivo de recursos computacionales. La sección 3.3 presenta la comparación entre los resultados experimentales y los resultados obtenidos por medio del modelo numérico. Posteriormente, la Sección 3.4 presenta los resultados térmicos de la geometría del prototipo LFR. Finalmente, la Sección 3.5 muestra los resultados obtenidos del análisis de la generación de entropía aplicado al prototipo LFR.

### 3.1 Resultados Experimentales

Como se mencionó anteriormente, el prototipo LFR fue caracterizado de manera experimental a través de la aplicación de la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 por medio de cuatro pruebas realizadas durante el mes de Diciembre del año 2017. Las condiciones y resultados experimentales se muestran en la Tabla 3.1. La autoreferencia al marcador no es válida., es importante mencionar que, en el caso de la radiación directa, temperaturas y velocidad del viento, los datos mostrados corresponden al promedio de las mediciones experimentales respetando los decimales de precisión de los dispositivos utilizados.

**Tabla 3.1** Condiciones y resultados experimentales

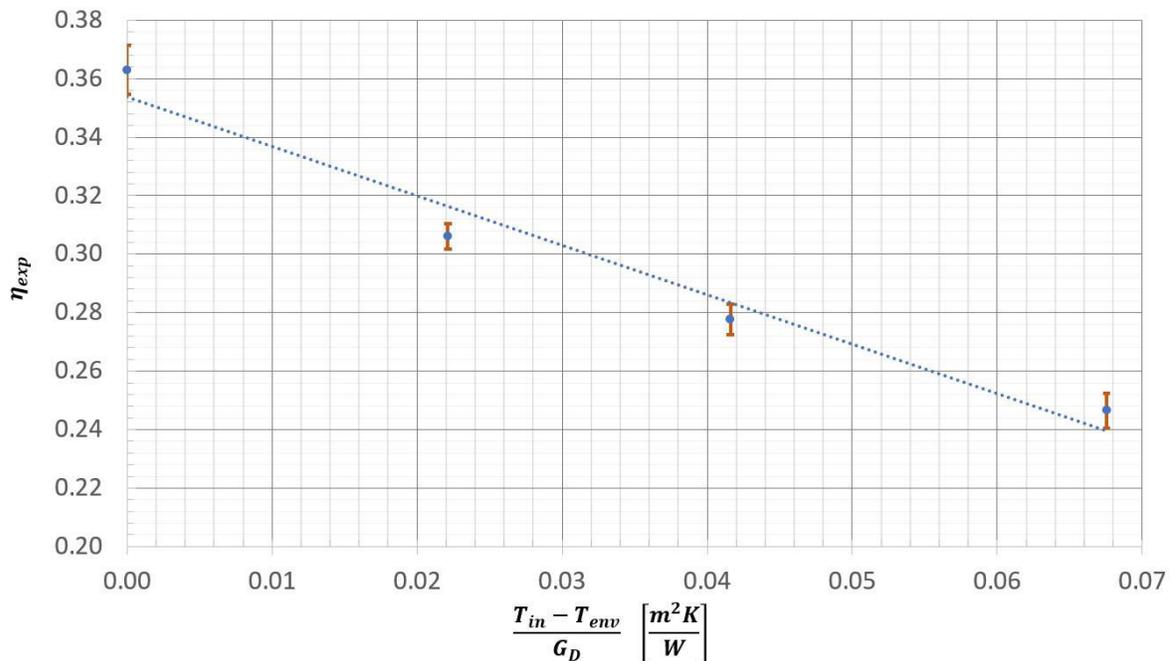
Prueba	$G_D$ ( $W/m^2$ )	$T_{env}$ ( $^{\circ}C$ )	$V_w$ ( $m/s$ )	$T_{in}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{outexp}$ ( $^{\circ}C$ )	$\eta_{exp}$
1	$905.7 \pm 1.2$	$26.3 \pm 0.1$	$0.64 \pm 0.07$	$26.5 \pm 0.1$	$30.4 \pm 0.1$	$0.362 \pm 0.008$
2	$889.6 \pm 0.7$	$22.8 \pm 0.1$	$0.82 \pm 0.08$	$42.5 \pm 0.1$	$45.7 \pm 0.1$	$0.306 \pm 0.004$
3	$904.5 \pm 0.9$	$23.5 \pm 0.1$	$0.71 \pm 0.07$	$61.1 \pm 0.1$	$64.1 \pm 0.1$	$0.277 \pm 0.005$
4	$811.1 \pm 1.3$	$24.3 \pm 0.1$	$0.59 \pm 0.04$	$78.6 \pm 0.1$	$81.1 \pm 0.1$	$0.247 \pm 0.006$

Los resultados del análisis de incertidumbre se obtuvieron de acuerdo con la metodología presentada por Taylor [73] tanto para las mediciones directas ( $G_D$ ,  $T_{env}$ ,  $V_w$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{outexp}$ ) como para la medición indirecta ( $\eta_{exp}$ ).

## Resultados del Prototipo LFR

Se puede observar que, en cada una de las pruebas, la radiación directa siempre fue mayor a  $800 \text{ W/m}^2$ , así mismo, la temperatura ambiente fue menor a  $30^\circ\text{C}$ . Además, se realizó el monitoreo de los valores de temperatura de entrada y flujo en tiempo real, manteniéndose en un rango de  $\pm 2\%$  y  $\pm 0.000315 \text{ l/s}$  respectivamente. Con lo anterior, se llega a respetar las condiciones establecidas por la propia norma.

Además, los valores de la eficiencia térmica obtenidos son graficados en la **Figura 3.1**. Se observa que la eficiencia térmica llega a disminuir a medida que la temperatura de entrada del fluido es mayor.

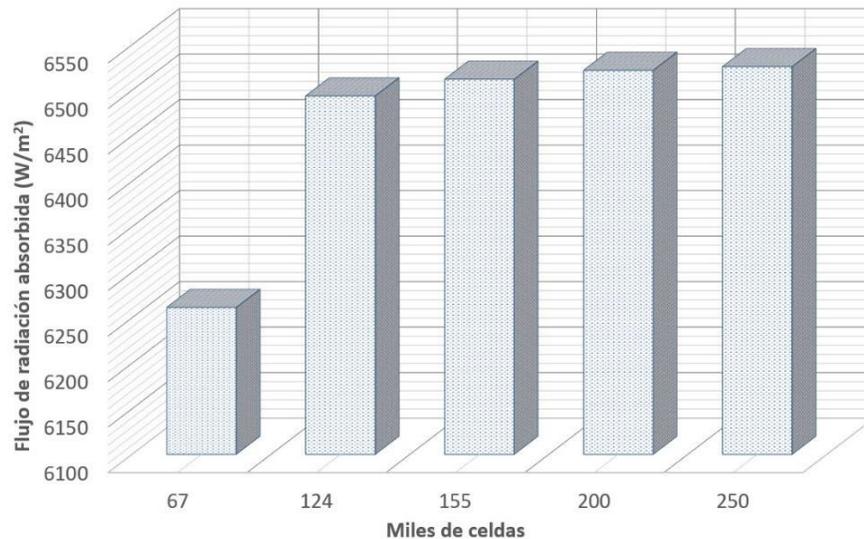


**Figura 3.1** Curva de eficiencia térmica

## 3.2 Resultados del Análisis de Independencia

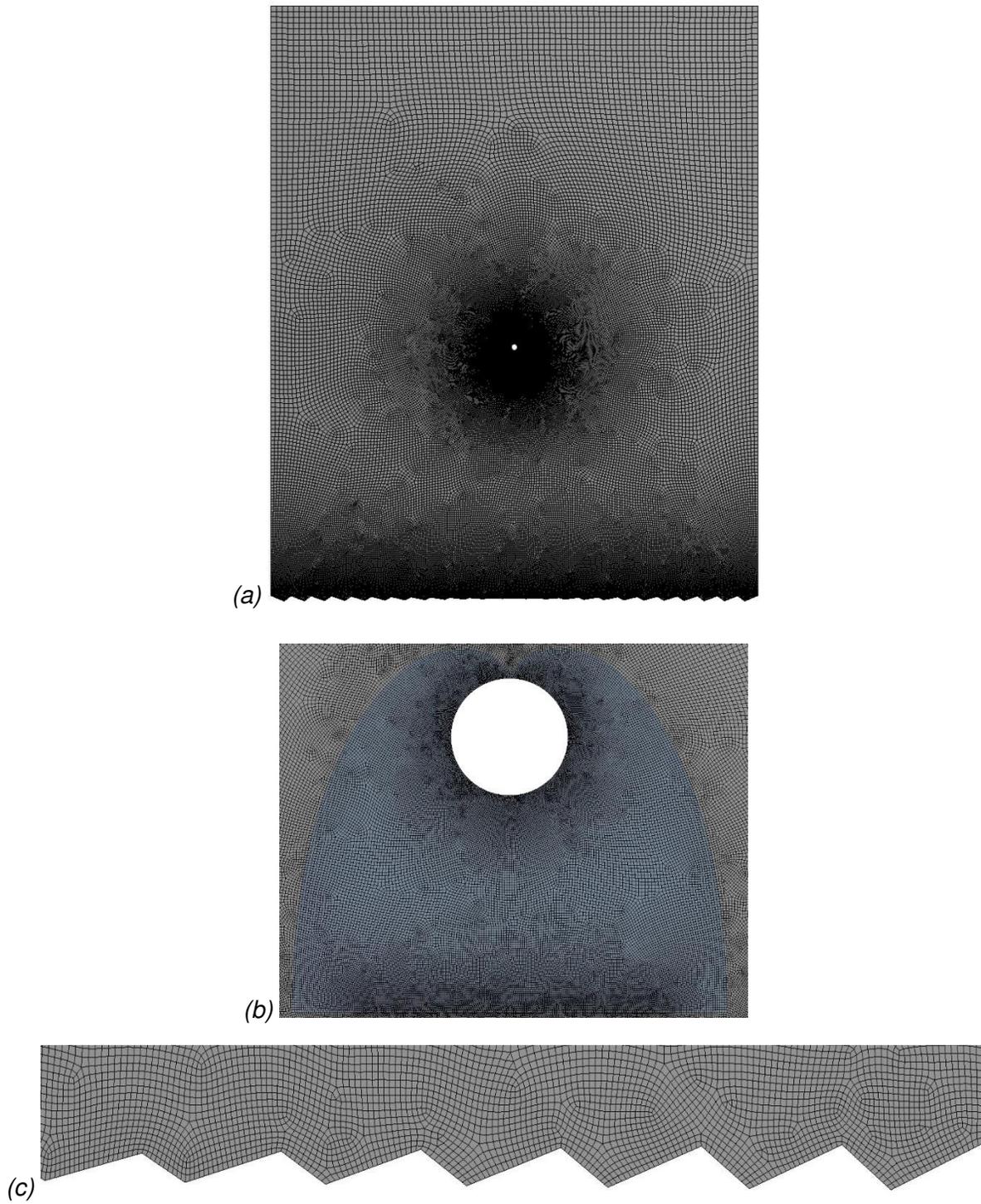
Para el análisis de independencia de malla en el modelo numérico del prototipo LFR, se consideró la variación de los elementos en un rango desde 67,000 a 250,000. La **Figura 3.2** muestra el flujo de radiación absorbida promedio alrededor del tubo receptor.

## Resultados del Prototipo LFR



**Figura 3.2** Resultados del análisis de independencia de malla

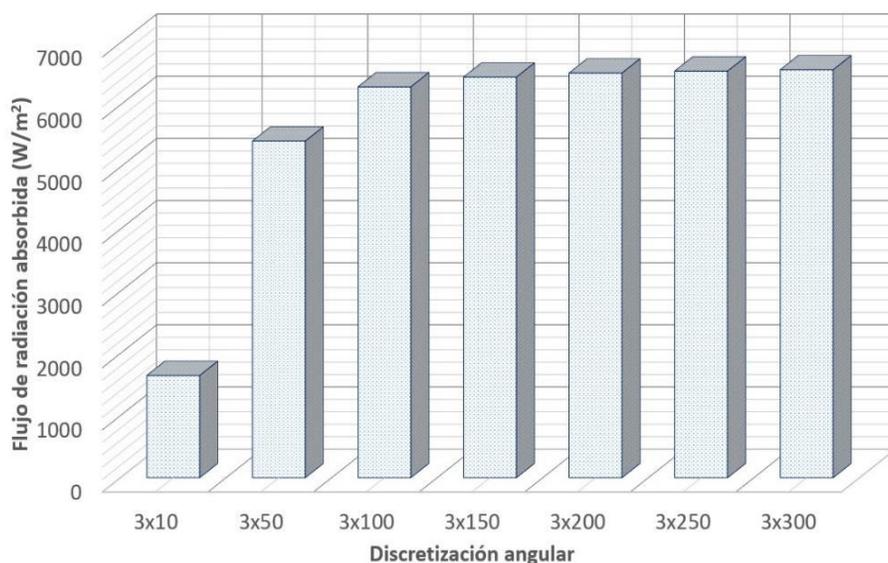
Se observa que, en dicho rango, la diferencia en el valor promedio de flujo de radiación absorbida entre la malla con menos elementos y la malla más fina es de aproximadamente 4%. Además, para un número mayor a 155 mil elementos, el flujo promedio de radiación absorbida es independiente de la malla utilizada, por tanto, con el fin de evitar el alto uso de recursos computacionales con nulo incremento en la precisión de la solución, se decide considerar un mínimo de 160 mil elementos para el modelo del LFR tanto para el modelo numérico del prototipo LFR como para todo el procedimiento de optimización. La **Figura 3.3** muestra el mallado del prototipo LFR.



**Figura 3.3** Malla utilizada en el modelo para: a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos

## Resultados del Prototipo LFR

Los resultados del análisis de independencia angular se muestran en la **Figura 3.4**. Se observa que la división del ángulo polar,  $N_\theta$ , es irrelevante debido a que la geometría construida es en 2D, por lo tanto, solo se realizó la variación de la división del ángulo acimutal,  $N_\phi$ . Además, se puede observar que para  $N_\phi > 200$  divisiones, el flujo de radiación absorbida es independiente a la discretización angular, por tanto, para el modelo numérico tanto del prototipo LFR como para el proceso de optimización, se utilizó una división de  $3 \times 200$  ( $N_\theta \times N_\phi$ ).



**Figura 3.4** Resultados del análisis de independencia angular

Los resultados tanto para el análisis de independencia de malla y angular son resumidos en la **Tabla 3.2**. Se observa que la diferencia del flujo de radiación absorbida tiende a un valor mínimo a medida que el número de celdas se incrementa. En el mismo sentido, a medida que la discretización angular se vuelve más fina, la diferencia en el flujo de radiación absorbida alcanza un valor mínimo de diferencia del 0.32%. Finalmente, los valores utilizados para las simulaciones numéricas para el número de celdas y división angular fueron de 155 mil celdas y  $3 \times 200$   $N_\theta \times N_\phi$  respectivamente, teniendo con dichos parámetros un porcentaje de diferencia de 0.28% y 1.02% respectivamente.

Tabla 3.2 Resultados del análisis de independencia de malla y angular

Independencia de malla			Independencia angular		
Número de celdas	Flujo de calor absorbido promedio ( $W/m^2$ )	Diferencia del flujo de calor absorbido (%)	División angular $N_\theta \times N_\phi$	Flujo de calor absorbido promedio ( $W/m^2$ )	Diferencia del flujo de calor absorbido (%)
66796	6261.41	-	3x10	1645.19	-
123912	6493.87	3.71	3x50	5416.51	229.23
155122	6512.15	0.28	3x100	6289.34	16.11
200258	6521.99	0.15	3x150	6446	2.49
250180	6525.98	0.06	3x200	6512.15	1.02
			3x250	6542.94	0.47
			3x300	6564.406	0.32

### 3.3 Validación del Modelo Numérico

Como se mencionó anteriormente, para la validación del modelo numérico, se realizó la comparación de la eficiencia térmica, eficiencia exergética, así como de la temperatura de salida del fluido de trabajo entre el modelo numérico CFD del prototipo LFR y los datos experimentales mostrados en la **Tabla 3.3**.

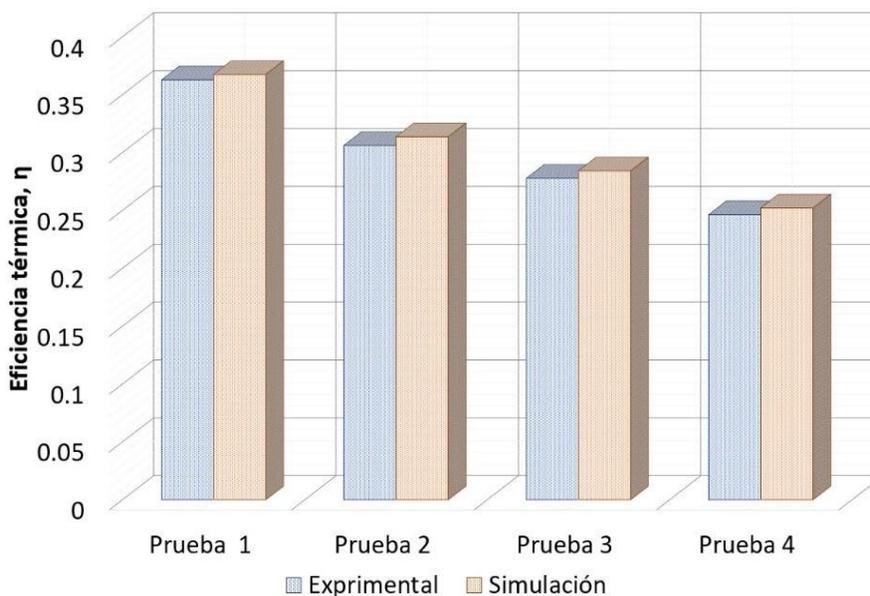
En el caso de la eficiencia térmica, se observa que los errores relativos entre  $\eta_{exp}$  y  $\eta_{mod}$  muestran valores inferiores a 2.36% para las cuatro pruebas. En cuanto a las eficiencias exergéticas el máximo valor de error relativo entre  $\eta_{e_{exp}}$  y  $\eta_{e_{mod}}$  es de 5.15%, es importante mencionar que los bajos valores registrados en la eficiencia exergética están relacionados a la gran disponibilidad termodinámica ofrecida por el sol en comparación con la cantidad de energía utilizada para calentar el fluido de trabajo (agua). En cuanto a la temperatura de salida, los porcentajes de error relativo muestran valores inferiores al 2.23% entre  $T_{outmod}$  y  $T_{outexp}$  (alrededor de 1.05°C).

## Resultados del Prototipo LFR

**Tabla 3.3** Comparación del comportamiento térmico para las diferentes pruebas.

Prueba	$\eta$		% Error relativo entre $\eta_{exp}$ y $\eta_{mod}$	$\eta_e$		% Error relativo entre $\eta_{e_{exp}}$ y $\eta_{e_{mod}}$	$T_{outexp}$ (°C)	$T_{outmod}$ (°C)	% Error relativo entre $T_{outexp}$ y $T_{outmod}$
	$\eta_{exp}$	$\eta_{mod}$		$\eta_{e_{exp}}$	$\eta_{e_{mod}}$				
1	0.362	0.367	1.29	0.0027	0.0028	3.76	30.42	30.83	1.34
2	0.306	0.313	2.36	0.021	0.022	5.15	45.75	46.80	2.23
3	0.277	0.284	2.26	0.034	0.035	4.36	64.14	65.50	2.07
4	0.246	0.252	2.29	0.036	0.038	4.68	81.05	82.81	2.11

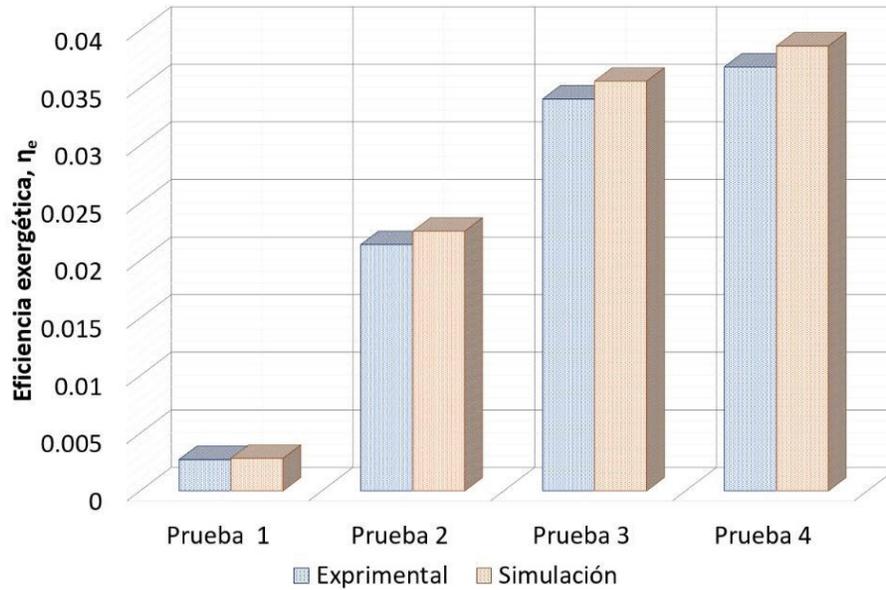
Así mismo, los resultados de la validación en términos de la eficiencia térmica se muestran en forma gráfica en la **Figura 3.5**. Se puede observar que la eficiencia térmica tiene un comportamiento decreciente debido al incremento en la temperatura de entrada.



**Figura 3.5** Resultados de la validación del modelo para la eficiencia térmica

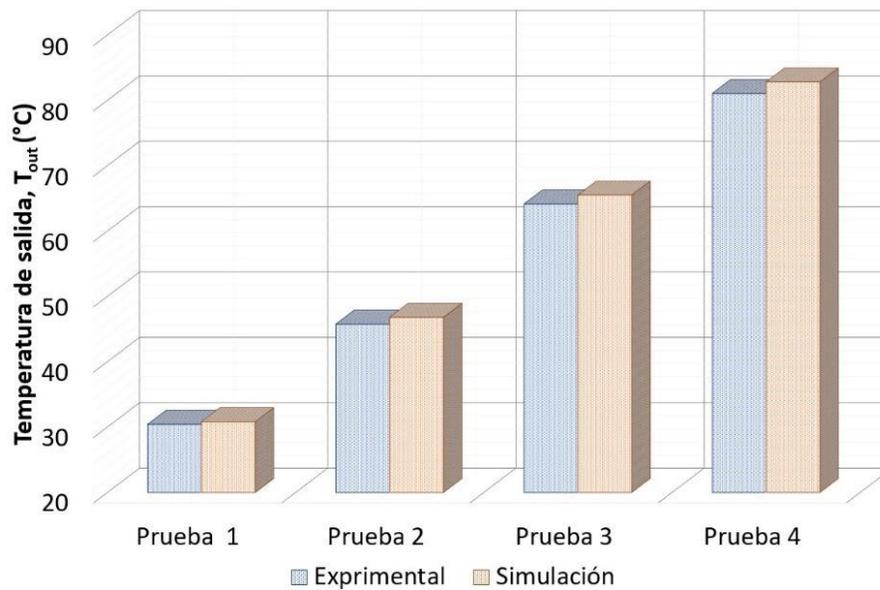
La **Figura 3.6** muestra la validación en términos de la eficiencia exergética, en la cual se tiene un comportamiento creciente debido a que se tiene un incremento en el uso de la energía disponible ofrecida por el sol.

## Resultados del Prototipo LFR



**Figura 3.6** Resultados de la validación del modelo para la eficiencia exergetica

Finalmente, la **Figura 3.7** muestra la validación en términos de la temperatura de salida del fluido de trabajo. Se observa un comportamiento creciente debido al incremento de la temperatura de entrada, sin embargo, la diferencia entre  $T_{out}$  y  $T_{in}$  decrece.



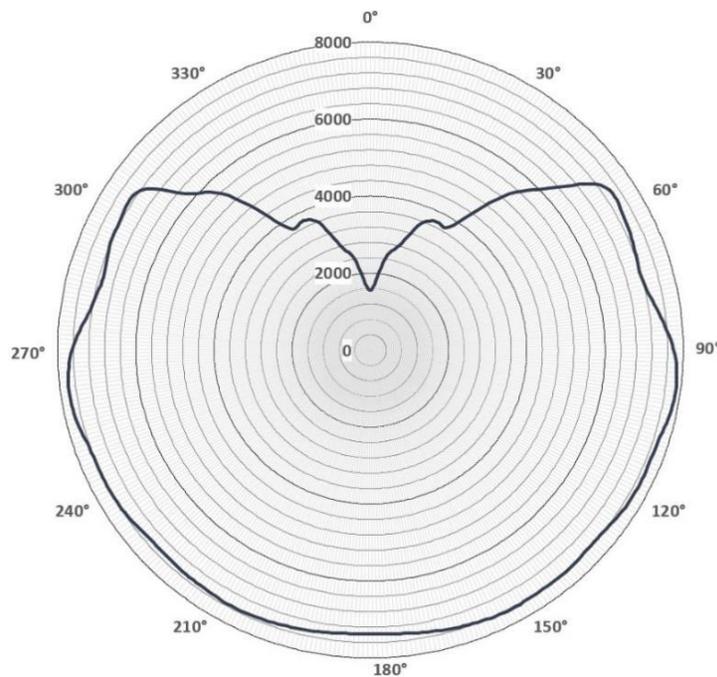
**Figura 3.7** Resultados de la validación del modelo para la temperatura de salida

De acuerdo con los bajos errores relativos mostrados, se concluye que el modelo numérico es apropiado para la representación y evaluación del rendimiento real del LFR.

### 3.4 Resultados Radiativos y Térmicos

En primer instancia, la gráfica radial de la **Figura 3.8** muestra el perfil de radiación absorbida alrededor del tubo receptor del prototipo LFR. Se puede observar que el valor máximo de radiación absorbida es de aproximadamente  $7,800 \text{ W/m}^2$ , donde la máxima distribución ocurre en la parte baja del tubo entre  $100^\circ$  y  $260^\circ$ , de cara hacia los espejos. El valor mínimo es de alrededor de  $1,550 \text{ W/m}^2$ , localizándose en la parte superior del tubo (entre  $300^\circ$  y  $60^\circ$ ).

Así mismo, se puede ver que existe una distribución uniforme del flujo de radiación absorbida entre  $90^\circ$  y  $270^\circ$  alrededor del tubo receptor debido a la influencia del concentrador secundario CPC. Además, a medida que el CPC se cierra, el flujo de radiación absorbida decrece hasta el valor mínimo a  $0^\circ$  del tubo. El valor promedio del flujo de radiación absorbida alrededor del tubo es de aproximadamente  $6,430 \text{ W/m}^2$ .

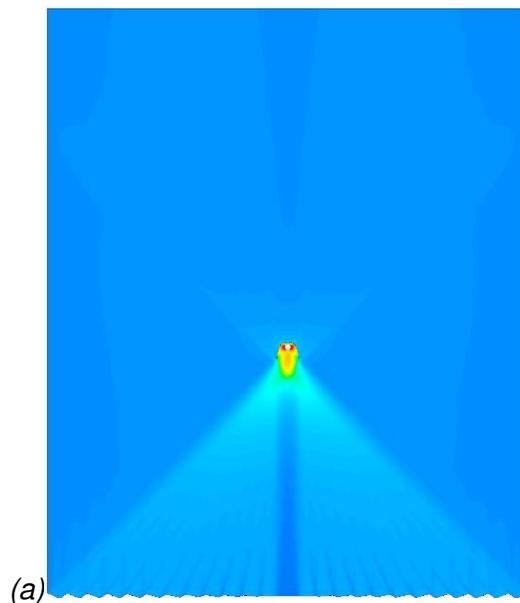


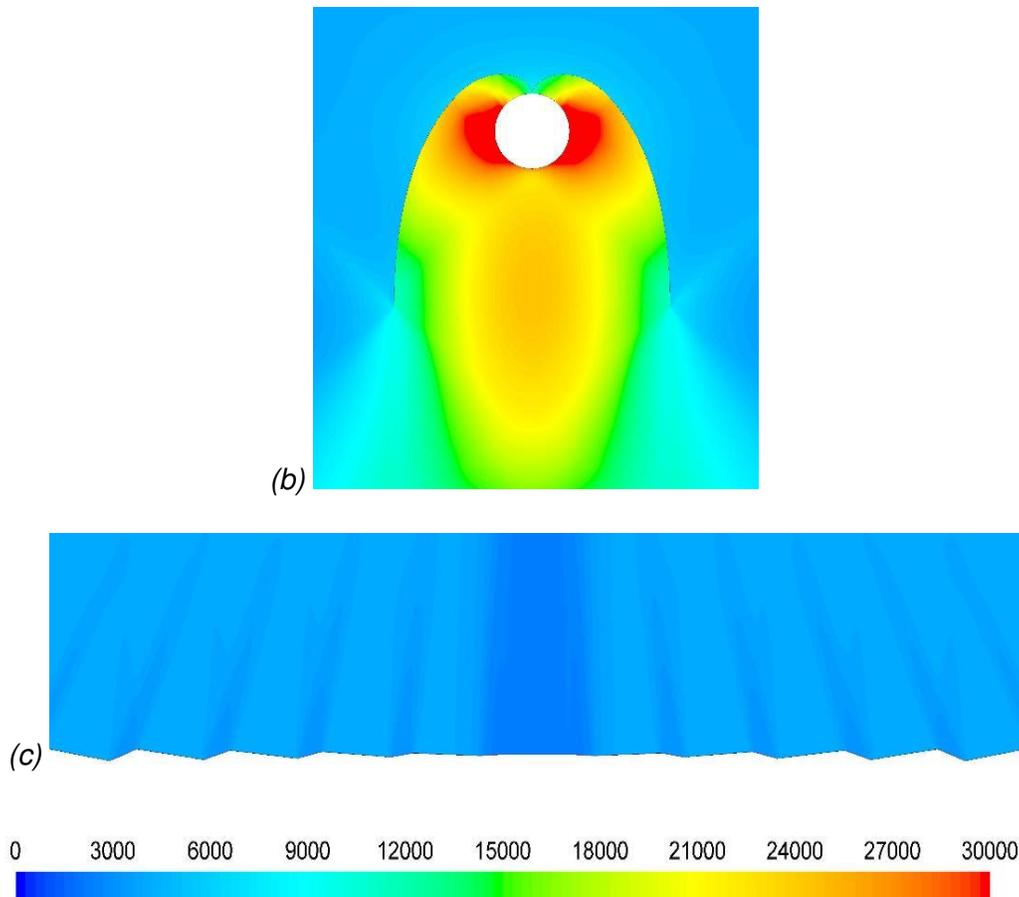
**Figura 3.8** Distribución del flujo de radiación absorbida ( $\text{W/m}^2$ )

## Resultados del Prototipo LFR

Por otro lado, la radiación incidente en la geometría completa del prototipo LFR se muestra en la **Figura 3.9a**, mientras que la radiación incidente en la zona del concentrador secundario CPC es mostrada en la **Figura 3.9b**. Se observa que se obtiene un valor mínimo de  $15,000 \text{ W/m}^2$  en la parte superior del tubo receptor. Además, se un valor máximo de  $30,000 \text{ W/m}^2$  a los lados del tubo receptor debido a la radiación proveniente de los espejos y del concentrador secundario. Así mismo, se observa un efecto de uniformidad de la radiación incidente en la parte baja del tubo (como se ve en la **Figura 3.8**). Los valores promedios de la radiación incidente en la pared del tubo receptor, así como en la cavidad del CPC son  $28,741 \text{ W/m}^2$  y  $17,857 \text{ W/m}^2$  respectivamente.

El efecto de la concentración de la radiación en cada espejo se puede observar en la **Figura 3.9c**, donde se muestra una uniformidad en la radiación incidente con un valor promedio de alrededor de  $3,921 \text{ W/m}^2$ . Así mismo, dicho contorno resulta útil para poder observar los efectos de bloqueo y sombreado sobre los espejos adyacentes del LFR. También se observa que, debido a que las simulaciones se especifican al medio día solar, el espejo central se encuentra en una posición horizontal, teniendo un bloqueo por parte del concentrador secundario CPC, lo que lleva a causar una nula contribución a la concentración de radiación.





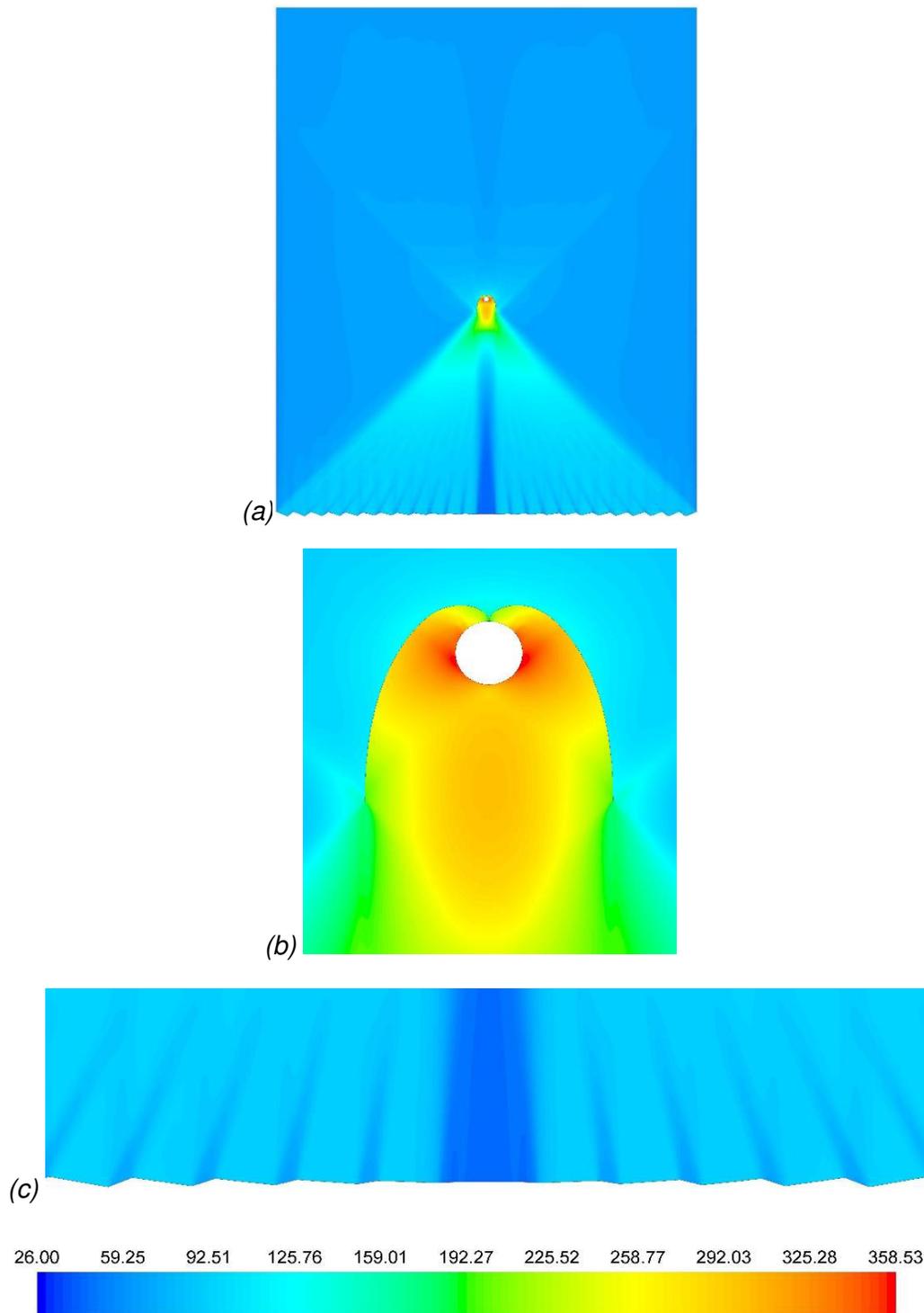
**Figura 3.9** Contorno de radiación incidente ( $W/m^2$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos

La temperatura de radiación (mencionada en la **Ecuación 35**) se muestra en la **Figura 3.10a** para la geometría completa del LFR. Se observa un incremento en la temperatura de radiación cerca de los espejos y el concentrador secundario, mientras que fuera de la influencia de dichas superficies, la temperatura de radiación es cercana a la temperatura ambiente ( $26^{\circ}C$ ). En la **Figura 3.10b**, se observa un incremento en la temperatura de radiación sobre el concentrador CPC, alcanzando valores de alrededor de  $350^{\circ}C$  cerca de la parte baja del tubo receptor, mientras que para la parte superior del tubo se alcanzan valores de alrededor de  $190^{\circ}C$ . En la pared del tubo receptor, se obtiene un valor promedio de  $319.1^{\circ}C$ , mientras que para la pared del CPC se tiene un valor promedio de  $253.51^{\circ}C$ .

La **Figura 3.10c** muestra la temperatura de radiación en los espejos, en donde se observa un comportamiento uniforme con un valor medio de  $92^{\circ}C$  en cada espejo. Se observa, además, que el espejo central presenta una temperatura de radiación igual a la temperatura

## Resultados del Prototipo LFR

ambiente debido a la obstrucción causada por el receptor secundario al encontrarse en el medio día solar.

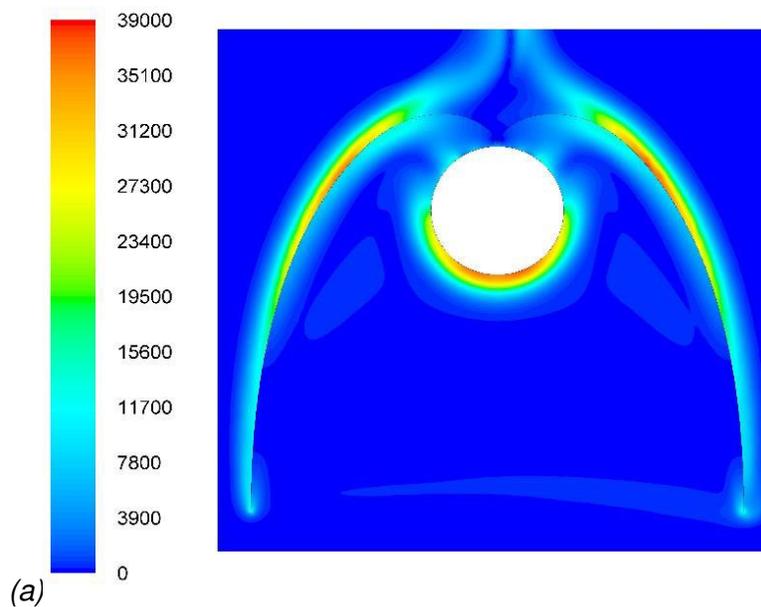


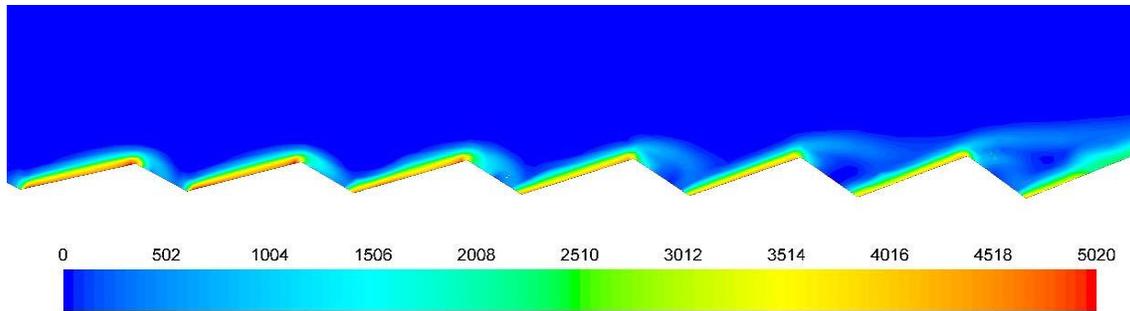
**Figura 3.10** Contorno de temperatura de radiación ( $^{\circ}\text{C}$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos

## Resultados del Prototipo LFR

La suma de los gradientes de temperatura (obtenidos de la **Ecuación 32**) se muestran en la **Figura 3.11** para la zona del concentrador CPC y para los espejos. Para la zona del CPC (**Figura 3.11a**), se observa un alto gradiente de temperatura en la parte baja del tubo receptor, así como en la parte alta del CPC, ambos con un valor máximo de 39,000 K/m. El gradiente de temperatura promedio en la pared del tubo y en la pared del CPC tuvieron un valor de 27,893.1 K/m y 26,363 K/m respectivamente. Cerca de la zona de los espejos (**Figura 3.11b**), el gradiente de temperatura alcanza un valor máximo de 5,020 K/m, un valor mínimo de 2,312 K/m y un valor promedio de 4,271 K/m.

En general, los gradientes de temperatura muestran valores importantes solo cerca de las superficies sólidas. Además, es importante mencionar que el gradiente de temperatura es una parte importante de la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor, ya que tienen una relación directa.



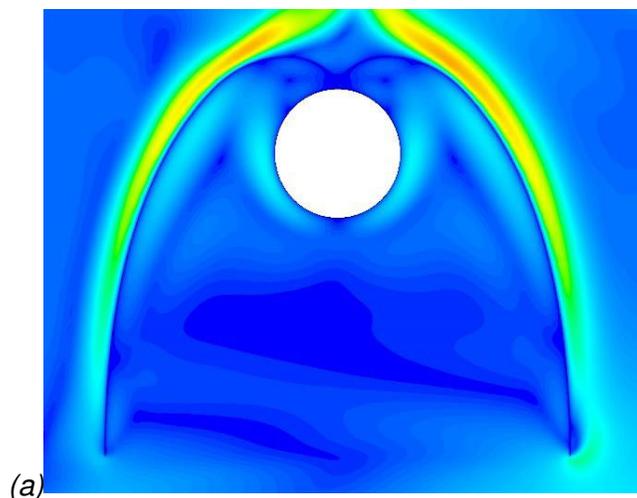


(b)

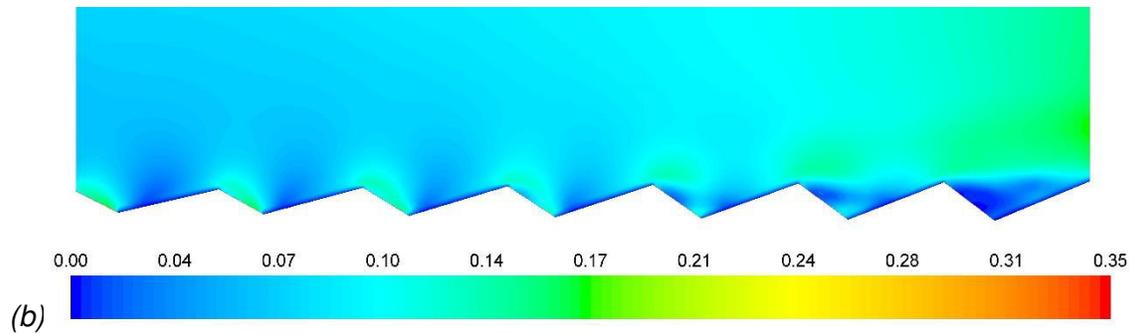
**Figura 3.11** Contorno de gradiente de temperatura (K/m) en a) Concentrador secundario CPC y b) Espejos

Los contornos de la velocidad del aire para la zona del CPC y espejos se muestran en la **Figura 3.12a** y **Figura 3.12b** respectivamente. En la zona del CPC, se observa una velocidad máxima en la parte superior del perfil CPC de alrededor de 0.35 m/s debido al incremento en sus gradientes de temperatura desde la parte inferior hasta la parte superior del CPC. Al interior del CPC, la velocidad del aire se encuentra entre 0 y 0.07 m/s, así mismo la velocidad promedio cerca del tubo receptor es de 0.05 m/s, y para el concentrador secundario CPC es de 0.18 m/s.

Para la zona de los espejos (**Figura 3.12b**), la velocidad máxima del aire se observa en los espacios entre éstos, con un valor de 0.10 m/s y un valor promedio de 0.03 m/s. En general, para todas las zonas, la velocidad del aire es muy baja, lo que conduce a una muy baja generación de entropía debido a la fricción del fluido (aire).



(a)



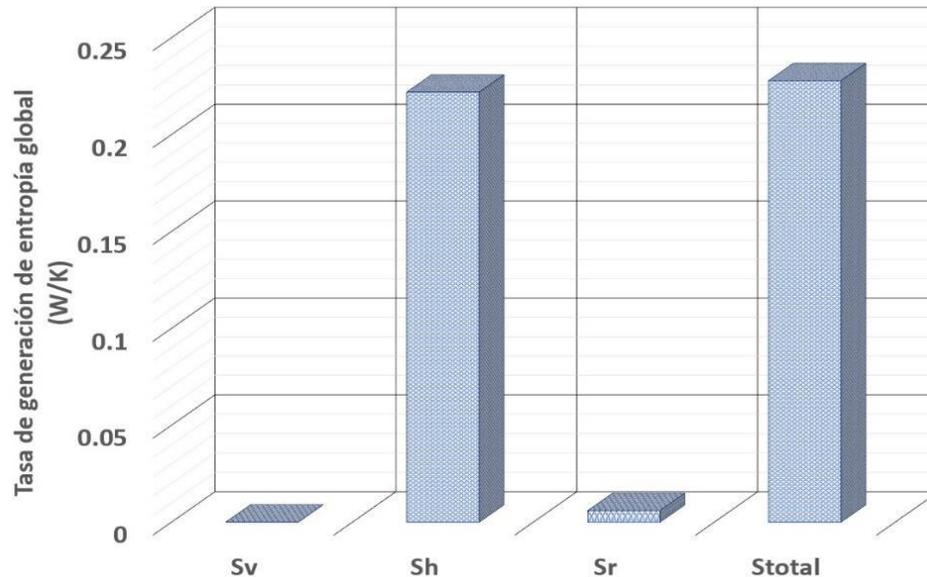
**Figura 3.12** Contorno de velocidad del aire (m/s) en a) Concentrador secundario CPC y b) Espejos

### 3.5 Generación de Entropía

La **Figura 3.13** muestra los resultados de la tasa generación de entropía global en el prototipo LFR debido a los fenómenos de transferencia de calor ( $S_h$ ), fricción del fluido ( $S_v$ ) y radiación ( $S_r$ ). La tasa de generación de entropía debido a la transferencia de calor alcanza un valor de alrededor del 97.4% del total de la tasa de generación de entropía, lo anterior debido a los grandes gradientes de temperatura existentes en el dominio del LFR (como se ve en la **Figura 3.11**).

Por otro lado, se observa que la tasa de generación de entropía debido al fenómeno de fricción del fluido resulta despreciable, lo anterior debido a la baja velocidad del aire circundante (como se ve en la **Figura 3.12**), por lo tanto, los esfuerzos viscosos no son relevantes en este trabajo. Así mismo, la tasa de generación de entropía debido a la radiación tiene un valor de alrededor del 2.59% del total de la tasa generación de entropía, lo anterior es ocasionado por la radiación incidente en las superficies, así como la radiación reflejada. Por tanto, basándose en los resultados, las pérdidas predominantes para este modelo presentado son aquellas debido a los fenómenos de transferencia de calor y radiación.

## Resultados del Prototipo LFR

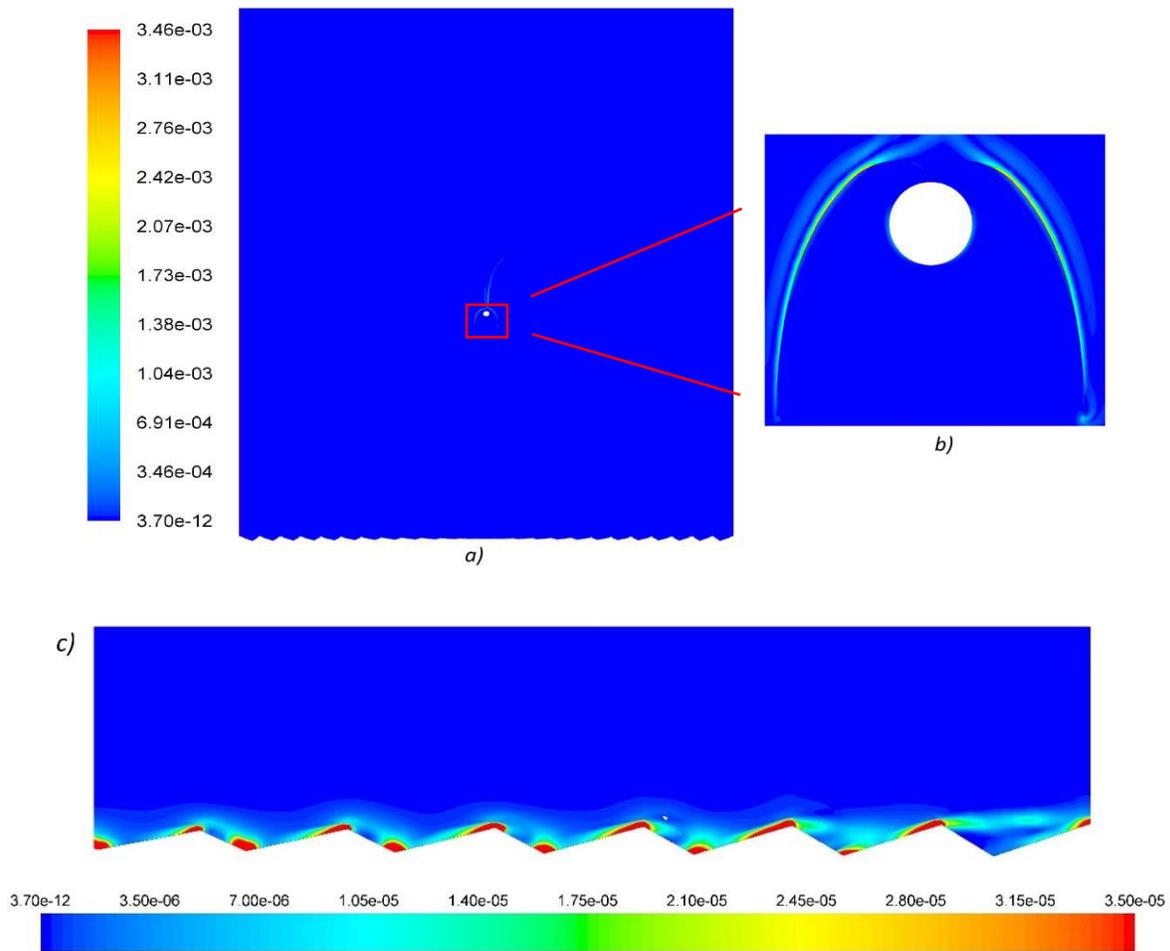


**Figura 3.13** Tasa de generación de entropía global

La **Figura 3.14a** y la **Figura 3.14b** muestra la tasa de generación de entropía local debido a la fricción del fluido en la geometría del prototipo LFR y en la zona del concentrador secundario respectivamente. Se puede observar que la mayor pérdida se encuentra en la parte alta del CPC con un valor máximo de  $3.46 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$ , y un valor promedio de  $1.5 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$ . Además, se obtiene una muy baja tasa de generación de entropía local debido a la fricción del fluido en el tubo receptor con un valor promedio de  $8.71 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Estos resultados son consistentes con las bajas velocidades del aire presentadas en la **Figura 3.12**, por lo tanto, se tiene una relación directa entre la velocidad del aire y la tasa de generación de entropía debido a fricción del fluido. En la zona de los espejos (**Figura 3.14c**) se alcanza un valor máximo de  $3.5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$  en la orilla de cada espejo (consistente con lo observado en la **Figura 3.12b**). Además, el valor promedio de la tasa de generación de entropía debido a la fricción del fluido sobre los espejos es de  $2.7 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$ . Por tanto, basándose en los resultados anteriores, la generación de entropía debido al fenómeno de fricción de fluido resulta despreciable.

## Resultados del Prototipo LFR



**Figura 3.14** Tasa de generación de entropía local debido a fricción del fluido ( $W/m^2K$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos

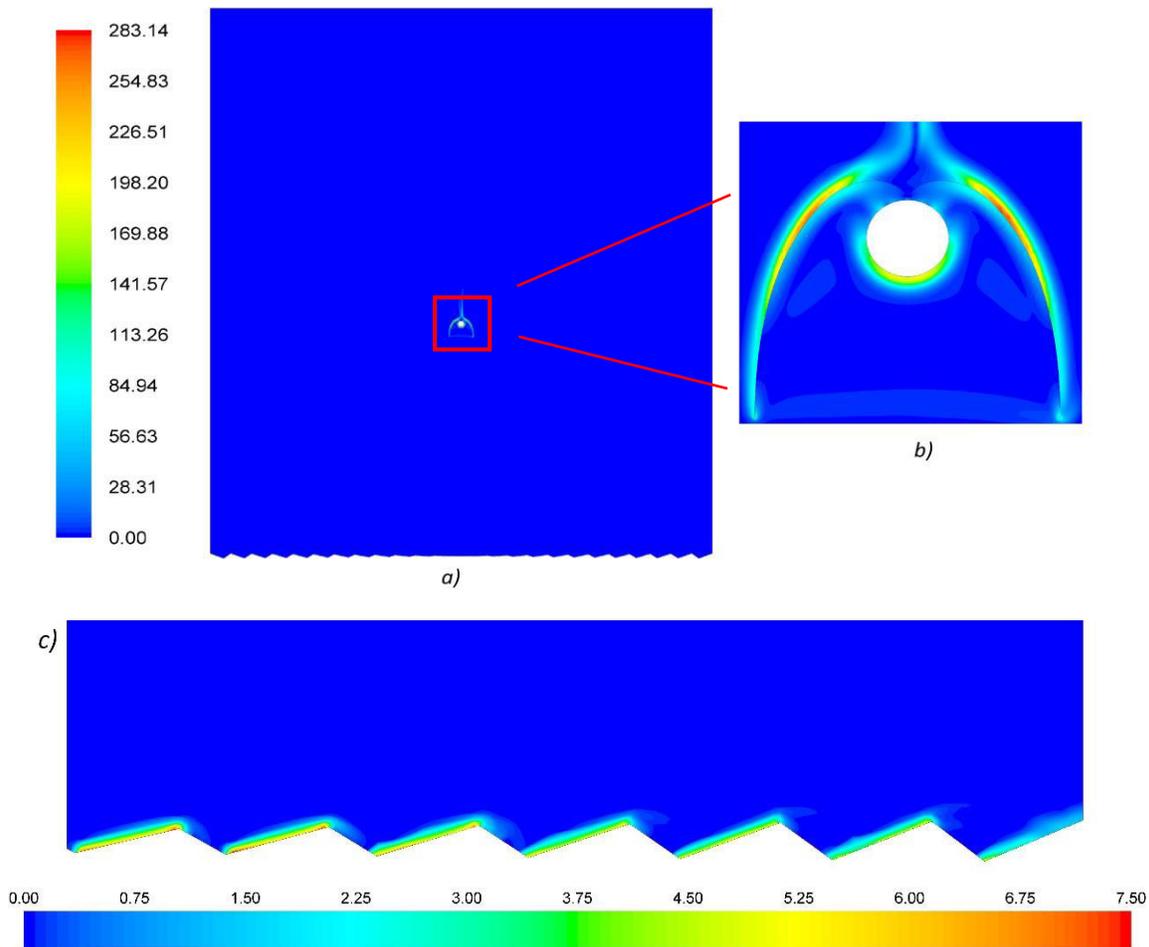
La **Figura 3.15a** y **Figura 3.15b** muestra la tasa de generación de entropía local debido al fenómeno de transferencia de calor en la geometría del prototipo LFR y en la zona del concentrador secundario respectivamente. Se observa que el concentrador secundario tiene las mayores irreversibilidades en la parte superior con un valor máximo de  $283.14 W/m^2K$  y un valor promedio de  $139.03 W/m^2K$ . Además, en el tubo receptor, la mayor tasa de generación de entropía local se encuentra en la parte baja con un valor promedio de  $102.81 W/m^2K$  y un valor máximo de  $198.20 W/m^2K$ .

Así mismo, se observa una muy baja tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor sobre la parte superior del tubo receptor. Por otro lado, en la zona de los espejos (**Figura 3.15c**), la mayor tasa de generación de entropía tiene un valor de  $7.5 W/m^2K$  y se

## Resultados del Prototipo LFR

presenta en el espejo cercano a la mitad del LFR, así mismo, se tiene un valor promedio de  $4.96 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  para todos los espejos.

Los resultados de la generación de entropía debido a transferencia de calor tanto para la zona del CPC como para los espejos se encuentran en concordancia con los gradientes de temperatura mostrados en la **Figura 3.11**.

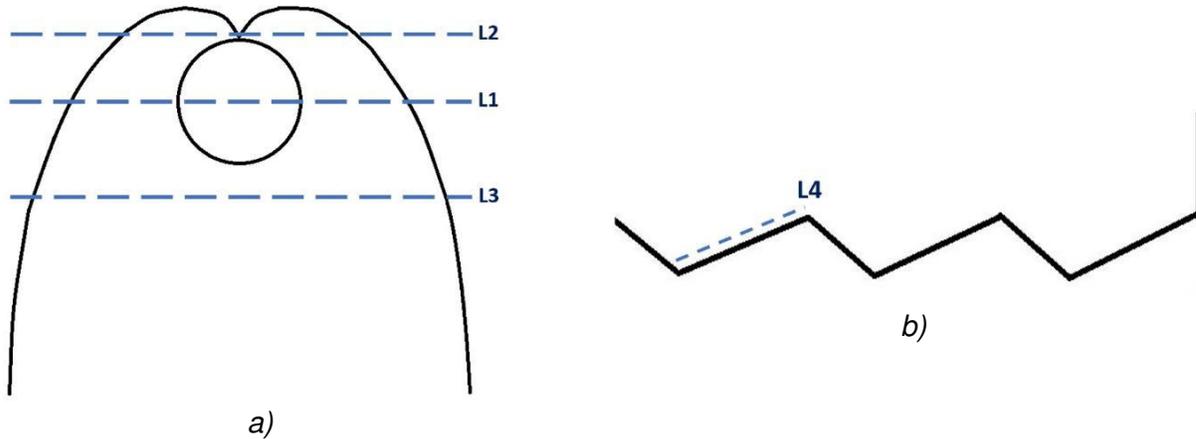


**Figura 3.15** Generación de entropía local debido a transferencia de calor ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos

Con el fin de mostrar la relación existente entre la generación de entropía debido a transferencia de calor y los gradientes de temperatura, se obtuvieron datos de estas dos variables en 4 posiciones específicas del LFR (ver **Figura 3.16**). L1, L2, L3 y L4 son líneas

## Resultados del Prototipo LFR

posicionadas a la mitad, por encima y por debajo del tubo receptor respectivamente, mientras que L4 es una línea localizada sobre la superficie de uno de los espejos.

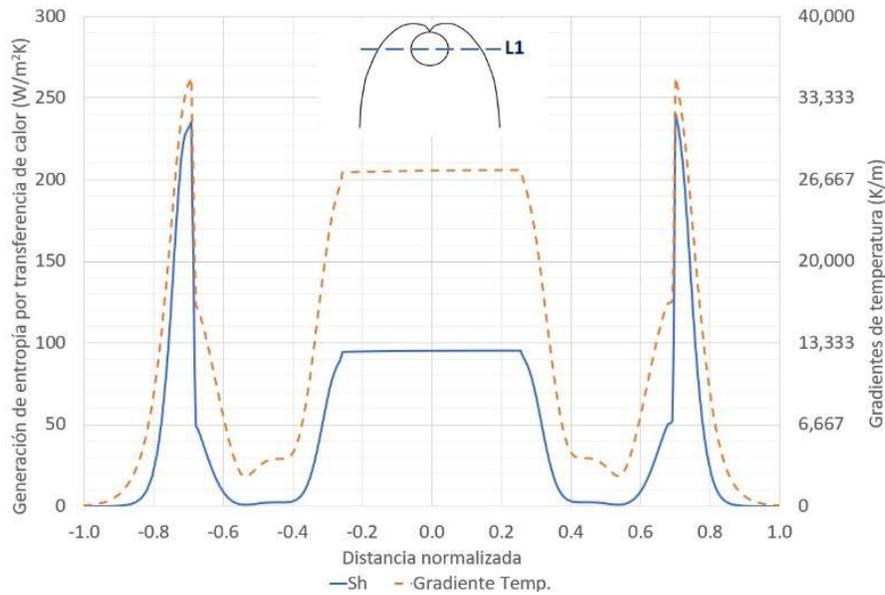


**Figura 3.16** Ubicación de líneas en a) Zona del CPC y b) Espejo

De la **Figura 3.17** a la **Figura 3.20** se muestran los datos obtenidos de las variables en cada una de las posiciones mencionadas. Se observa que, para todos los casos, a medida que los gradientes de temperatura se incrementan, también lo hace la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor.

En el caso de L1 de la **Figura 3.17**, los valores más altos de la tasa generación de entropía y gradientes de temperatura son  $240 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $33,300 \text{ K/m}$  respectivamente, los cuales se encuentran localizados entre 0.65 y 0.7 de la distancia normalizada.

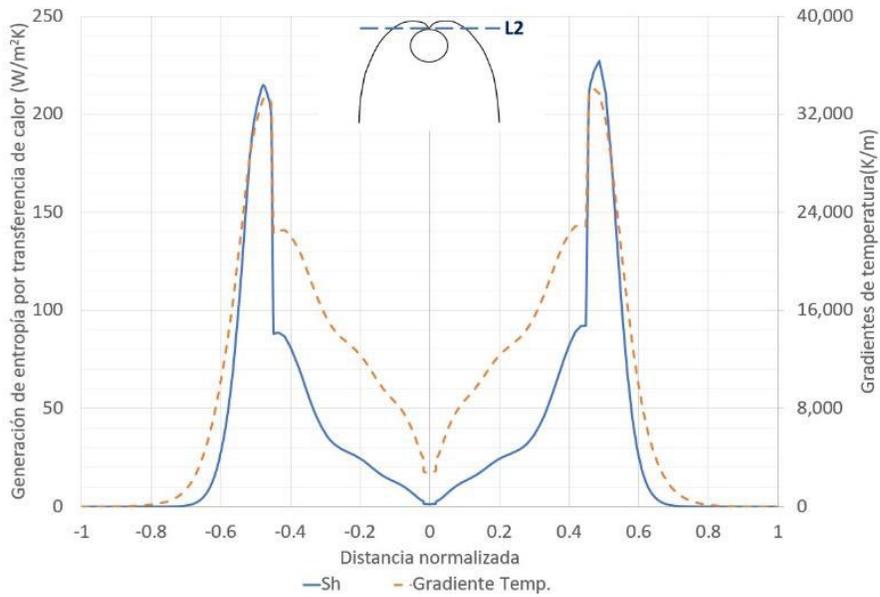
## Resultados del Prototipo LFR



**Figura 3.17** Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L1

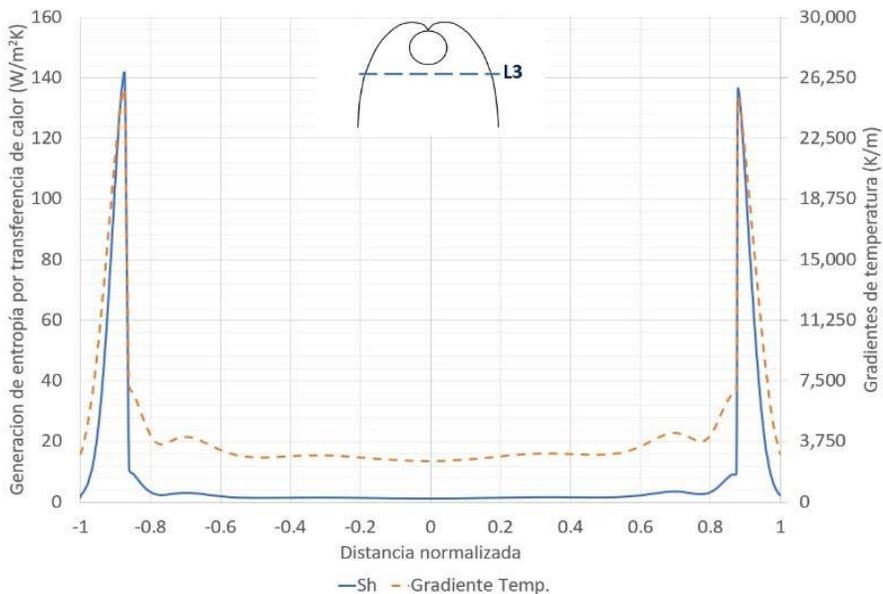
Para L2 de la **Figura 3.18**, los valores máximos son de 230 W/m<sup>2</sup>K y 32,000 K/m para la tasa de generación de entropía y el gradiente de temperatura respectivamente, dichos valores se encontraron entre 0.45 y 0.5 de la distancia normalizada de la línea. Así mismo, los valores mínimos son cercanos a 0 W/m<sup>2</sup>K y 3000 K/m para la tasa de generación de entropía y gradiente de temperatura respectivamente, dichos valores se presentan en la mitad de la línea.

## Resultados del Prototipo LFR



**Figura 3.18** Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L2

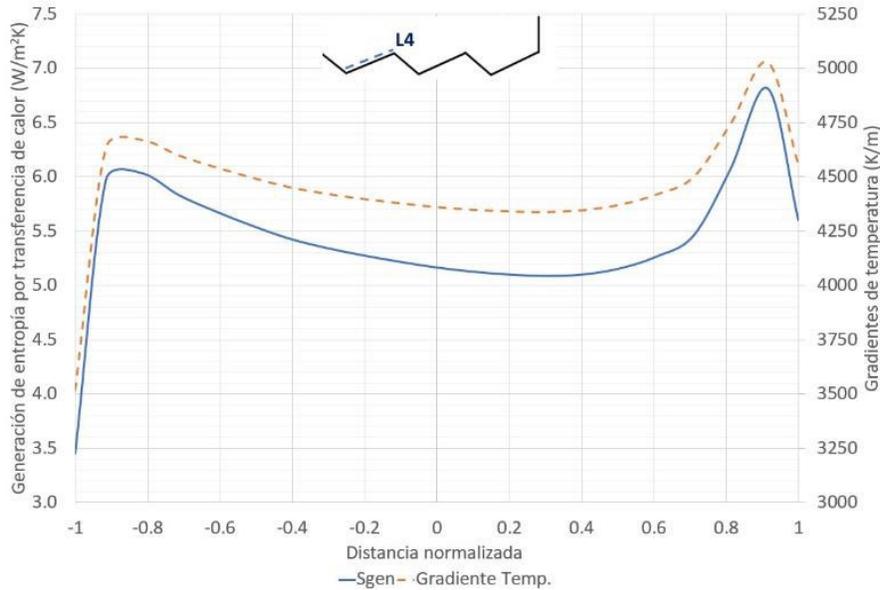
En el caso de L3 de la **Figura 3.19**, se tiene un mínimo en casi toda la línea alcanzando, así mismo, se obtienen valores máximos de 140 W/m<sup>2</sup>K y 26,000 K/m para la tasa de generación de entropía y gradiente de temperatura respectivamente, dichos valores son localizados en -0.95 y 0.9 de la distancia normalizada de la línea, así mismo, los valores caen a un mínimo entre -0.8 y 0.8 de la distancia normalizada.



**Figura 3.19** Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L3

## Resultados del Prototipo LFR

Para L4 de la **Figura 3.20** se alcanzan valores máximos de  $6.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $5,000 \text{ K/m}$  para la tasa de generación de entropía y gradiente de temperatura respectivamente, encontrándose entre 0.8 y 0.9 de la distancia normalizada.



**Figura 3.20** Comparación entre la tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor y gradiente de temperatura para L4

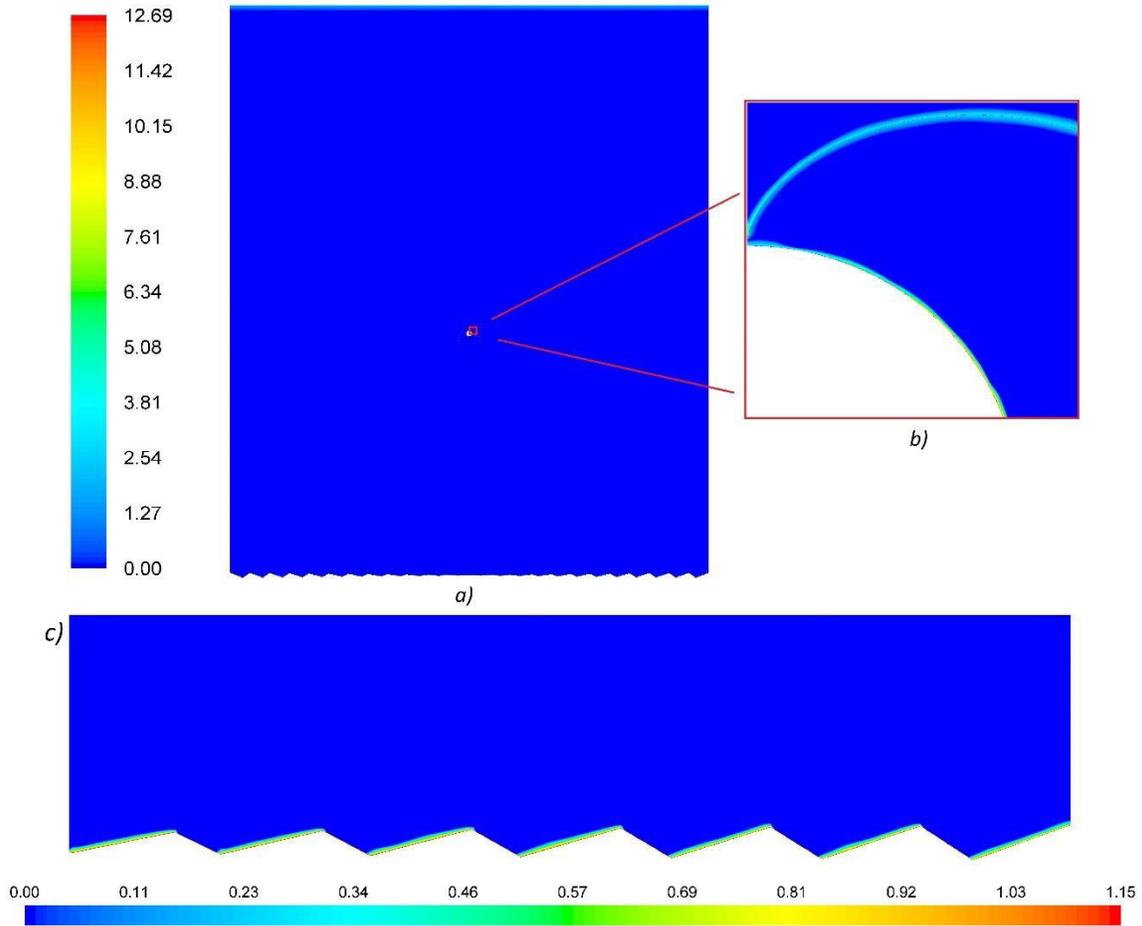
Por lo tanto, y debido a lo explicado anteriormente, se comprueba la existencia de una relación directa entre los gradientes de temperatura y la tasa de generación de entropía debido a la transferencia de calor.

En la **Figura 3.21a** y **Figura 3.21b** se muestra la tasa de generación de entropía por radiación en la geometría del LFR, así como en el concentrador secundario CPC respectivamente. Se puede observar un comportamiento homogéneo tanto en el tubo absorbedor como en el perfil CPC con valores promedios de  $9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  y  $3.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  respectivamente. Además, se puede apreciar que la generación de entropía debido a radiación no depende del gradiente de temperatura local, pero si del flujo radiativo incidente y reflejado.

Así mismo, en la **Figura 3.21c** se muestra la tasa de generación de entropía por radiación en la zona de los espejos, teniendo un valor máximo de  $1.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , así como un valor

## Resultados del Prototipo LFR

promedio de  $1.03 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Además, se puede notar un comportamiento similar en cada uno de los espejos debido a que la radiación incidente y reflejada es semejante.



**Figura 3.21** Tasa de generación de entropía local debido a radiación ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) en a) Geometría completa, b) Concentrador secundario CPC y c) Espejos

# *CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN*

La segunda parte de los resultados obtenidos en el presente trabajo se basan en el proceso de optimización llevado a cabo en el prototipo LFR, así como su comparación térmica, radiativa y de generación de entropía con la geometría optima alcanzada. En primera instancia, la Sección 4.1 muestra los resultados de las generaciones obtenidas durante el proceso de optimización. Posteriormente, y con el fin de poder visualizar la geometría óptima, la Sección 4.2 muestra el frente de Pareto construido a partir de todas las geometrías simuladas durante el proceso de optimización. Finalmente, la Sección 4.3 muestra la comparación entre el prototipo LFR y la geometría óptima, todo ello en términos de características térmicas, radiativas y de generación de entropía, éste último tanto de manera global como de manera local. Es importante mencionar que los resultados mostrados fueron tomando en cuenta las condiciones ambientales y de radiación más adversas, las cuales se muestran en la **Tabla 2.5**.

### 4.1 Generaciones

Como se mencionó anteriormente, se crearon siete generaciones mediante el algoritmo EP, cada una de las generaciones fue formada por seis individuos. La **Tabla 4.1** muestra las siete generaciones con cada uno de sus individuos. Desde la primera hasta la cuarta generación, los individuos son nombrados A hasta X, mientras que, a partir de la quinta hasta la séptima generación, los individuos son nombrados AA, BB, CC, ... hasta RR. Además, para cada individuo, se muestran los parámetros requeridos para la construcción completa de la geometría a través de las ecuaciones de diseño, (**Ecuaciones 1-16**). Los parámetros requeridos son: el ancho de los espejos,  $W$ , la longitud de los espejos,  $L$  y el número de los espejos a la derecha o a la izquierda del LFR,  $n$ .

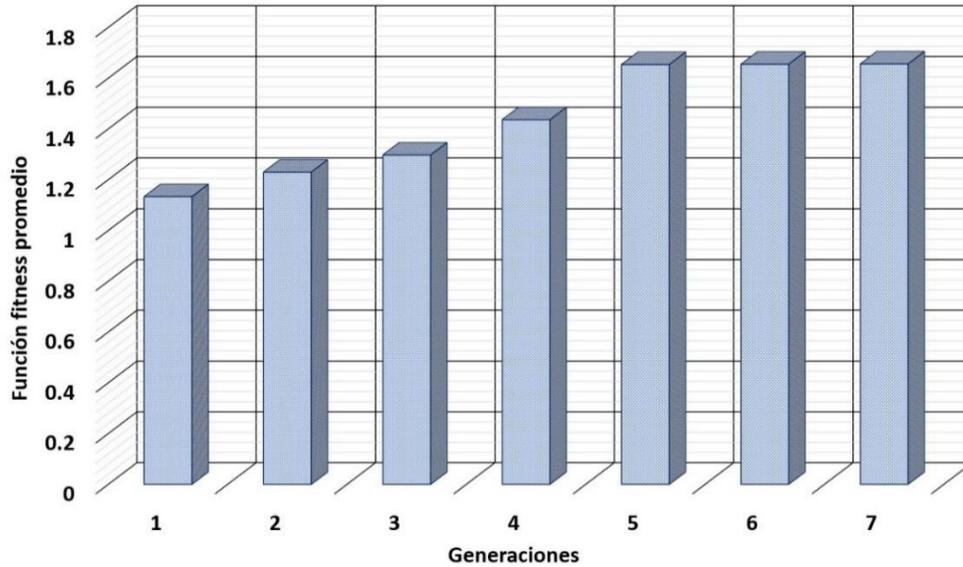
**Tabla 4.1** Generaciones e individuos

Gen.	Individuos	$W$	$L$	$n$	Gen.	Individuos	$W$	$L$	$n$
1	A	0.075	2.6	14	2	G	0.1	2	19
	B	0.1	2.6	14		H	0.09	1.4	10
	C	0.095	2.2	12		I	0.06	1.4	41
	D	0.035	2.8	5		J	0.085	3	6

## Resultados de Optimización

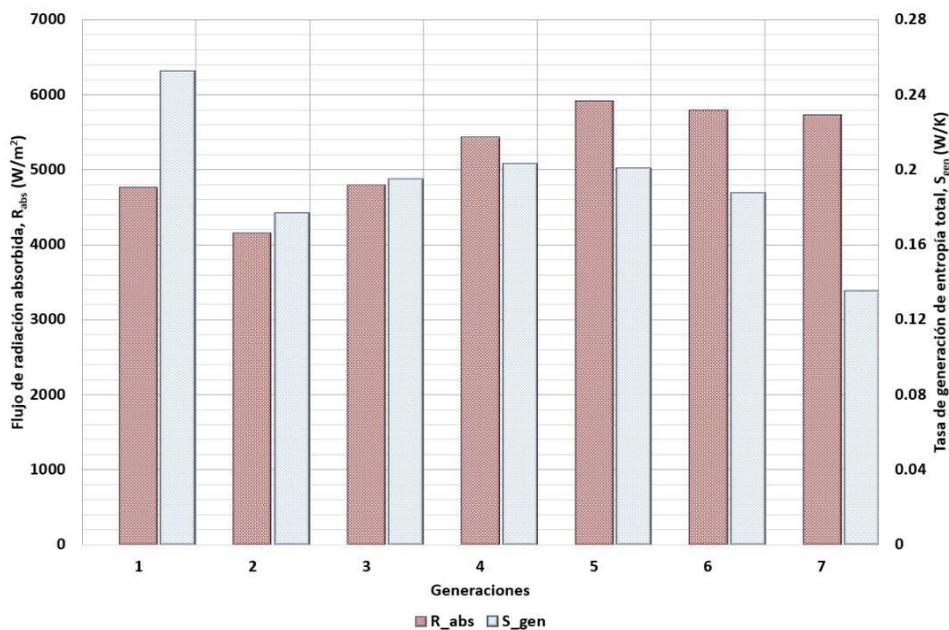
	E	0.07	3	7		K	0.075	2.6	4
	F	0.04	3	33		L	0.08	2.4	7
3	M	0.1	3	13	4	S	0.1	3	7
	N	0.1	2	5		T	0.1	1	12
	O	0.04	2.5	40		U	0.04	2.5	28
	P	0.08	2	3		V	0.06	3	3
	Q	0.06	3	13		W	0.06	3	18
	R	0.06	1	11		X	0.04	1	12
5	AA	0.08	1.5	23	6	GG	0.08	3	12
	BB	0.04	2	22		HH	0.08	1.5	13
	CC	0.08	2	14		II	0.1	2.5	12
	DD	0.04	2.5	5		JJ	0.04	3	4
	EE	0.1	3	9		KK	0.04	3	11
	FF	0.08	1	6		LL	0.06	2	6
7	MM	0.04	3	13					
	NN	0.05	2.2	15					
	OO	0.04	2.5	18					
	PP	0.055	2.3	13					
	QQ	0.04	2	7					
	RR	0.06	1.5	6					

Para cada una de las generaciones mostradas, se obtuvo el comportamiento promedio de la función fitness (mostrada en la **Ecuación 38**) el cual se muestra en la **Figura 4.1**. Se puede observar que la séptima generación alcanza un valor de 1.655 para la función fitness, así mismo, dicha generación muestra una diferencia del 0.06% en comparación con la función fitness de la sexta generación. Por tanto, el proceso de optimización se detuvo en la séptima generación.



**Figura 4.1** Convergencia de la función fitness

Por otro lado, resulta necesario mostrar la generación que cumpla con lo señalado en la función objetivo, es decir, la generación que contenga el máximo flujo de radiación absorbida junto con la mínima tasa de generación de entropía. Para tal propósito, la **Figura 4.2** muestra los valores promedio obtenidos de  $R_{abs}$  y  $S_{gen}$  para cada generación.



**Figura 4.2** Valores promedio de  $R_{abs}$  y  $S_{gen}$  para cada generación

Se puede observar que la séptima generación alcanza valores de alrededor de  $5,790 \text{ W/m}^2$  y  $0.14 \text{ W/K}$  para el flujo de radiación absorbida y para la tasa total de generación de entropía respectivamente, con ello, la última generación alcanza el valor más bajo de la tasa de generación de entropía con una disminución del 44% con respecto a lo obtenido por la primera generación.

Es importante mencionar que la quinta y la sexta generación de individuos obtuvieron un mayor valor en el flujo de radiación absorbida en comparación con la séptima generación, sin embargo, el porcentaje de incremento entre estas dos generaciones y la séptima es muy poco (3.07% y 1.11% respectivamente). Así mismo, en el caso de la tasa de generación de entropía, la séptima generación alcanza un porcentaje de disminución de 32.6% y 27.8% en comparación con la quinta y sexta generación respectivamente. Por lo tanto, y basado en los resultados obtenidos, los individuos de la séptima generación cumplen satisfactoriamente la función objetiva propuesta.

## 4.2 Frente de Pareto

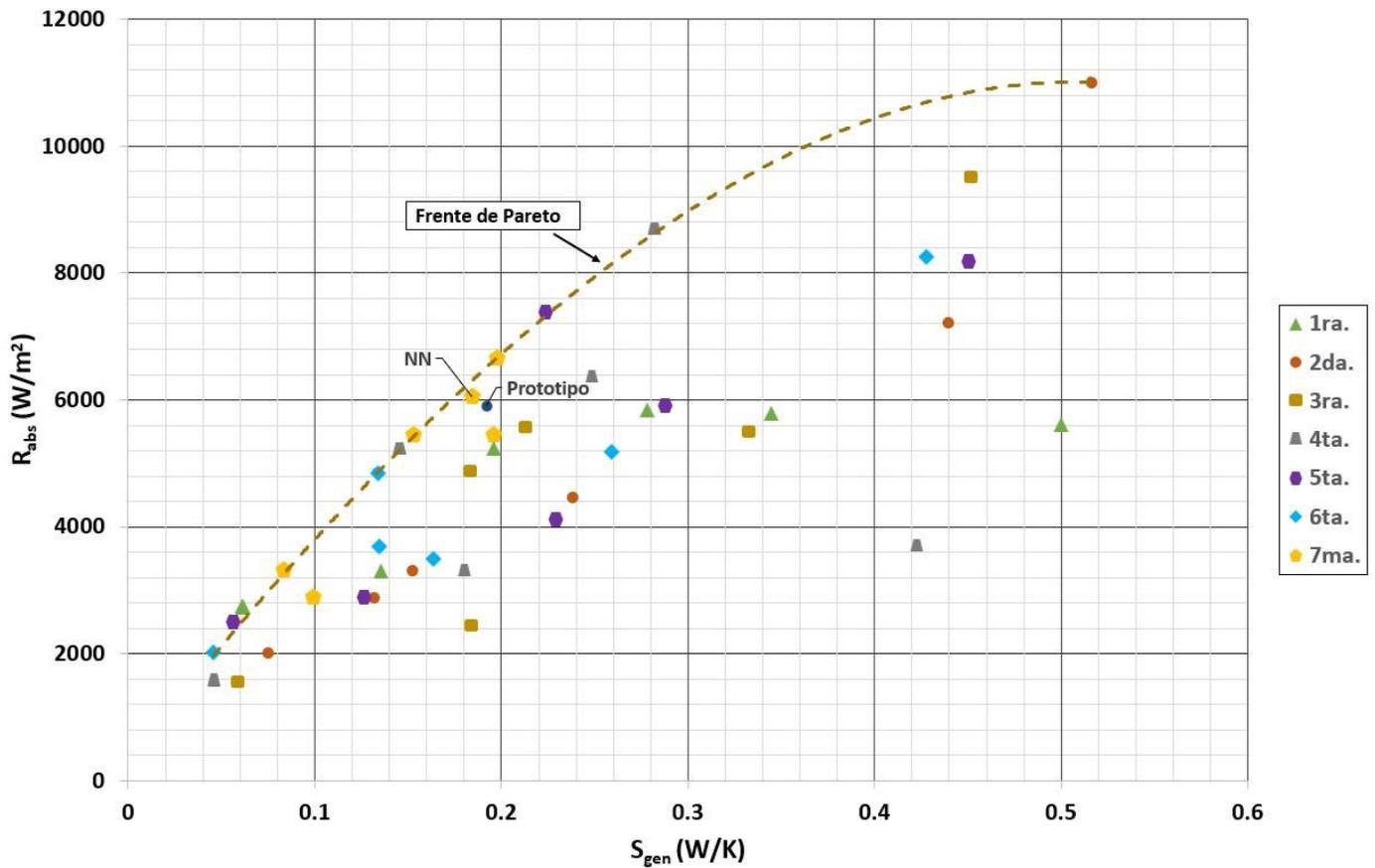
Para un proceso de optimización multiobjetivo, la elección del individuo óptimo, y por tanto la solución del problema, se realiza mediante el conjunto de soluciones no-dominadas conocido como frente de Pareto, en otras palabras, cualquier otro conjunto de soluciones no llegan a dominar cualquier individuo de este conjunto [74]. La **Figura 4.3** muestra los resultados de cada uno de los individuos generados a través del proceso de optimización, así como también se añaden los resultados obtenidos del prototipo LFR.

Los resultados están constituidos tanto por las soluciones dominadas como por las no-dominadas, siendo que el frente de Pareto se encuentra formado por las soluciones no-dominadas.

En el caso del prototipo LFR, se obtuvieron valores de  $5,910 \text{ W/m}^2$  y  $0.192 \text{ W/K}$  para el flujo promedio de radiación absorbida y para la tasa total de generación de entropía respectivamente, así mismo, de acuerdo con la **Figura 4.3**, se observa que la solución del prototipo LFR se encuentra muy cercano al conjunto de las soluciones no-dominadas.

Entre todas las soluciones graficadas en la **Figura 4.3**, el individuo NN (que pertenece a la séptima generación) sobresale por ser parte de las soluciones no-dominadas, además, de

acuerdo con los resultados obtenidos es el individuo que mejor cumple con lo establecido en la función objetivo. El individuo NN tiene un flujo promedio de radiación absorbida de  $6,056 \text{ W/m}^2$  con una tasa total de generación de entropía de  $0.184 \text{ W/K}$ . Si se llega a comparar dicho individuo con el prototipo LFR, se tiene un incremento del 2.46% en cuanto al flujo promedio de radiación absorbida, así mismo, se tiene una disminución del 4.17% para la tasa total de generación de entropía. Por tanto, el individuo NN tiene mejor rendimiento que el prototipo LFR en términos de la función objetivo.



**Figura 4.3** Frente de Pareto del proceso de optimización

Es así como las dimensiones del individuo NN se muestran en la **Tabla 4.2**. Donde se puede observar el individuo NN posee un área de apertura menor ( $3.4 \text{ m}^2$ ) en comparación con el prototipo LFR ( $3.6 \text{ m}^2$ ).

**Tabla 4.2** Parámetros geométricos del individuo NN

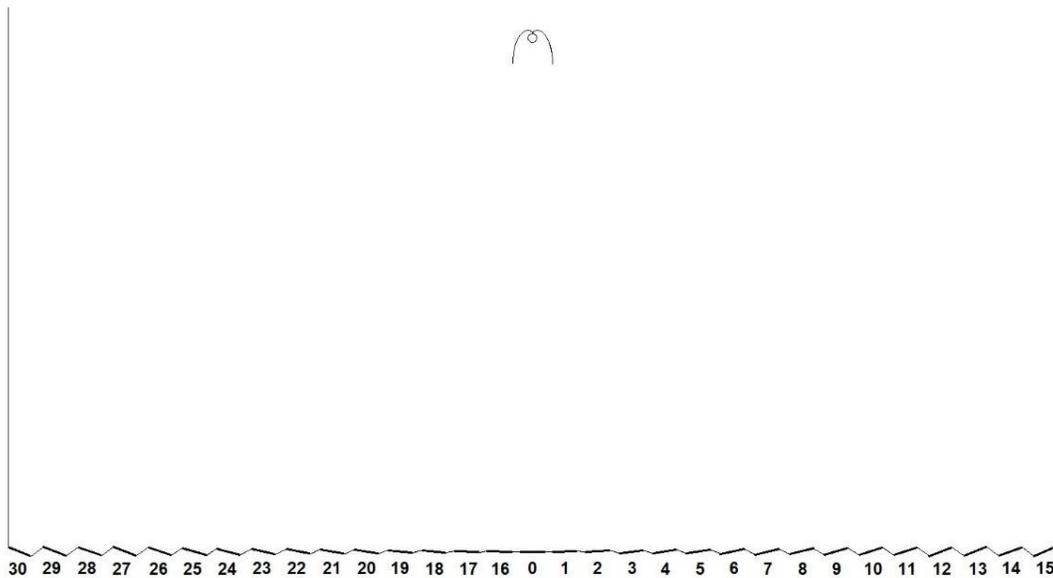
Parámetro	Valor
Número de espejos ( $N$ )	31
Ancho de los espejos ( $W$ )	0.050 m
Longitud de los espejos ( $L$ )	2.25 m
Distancia focal ( $f$ )	1.041 m
Diámetro del tubo receptor ( $D$ )	0.0181 m
Área de apertura ( $A_a$ )	3.4 m <sup>2</sup>
Área de receptor ( $A_r$ )	0.128 m <sup>2</sup>
Apertura del CPC ( $R_{pl}$ )	0.080 m
Altura del CPC ( $H$ )	0.067 m

Así mismo, la **Tabla 4.3** muestra los ángulos de inclinación de cada uno de los espejos, así como la distancia entre ellos de acuerdo con la numeración mostrada en la **Figura 4.4**.

**Tabla 4.3** Ángulos de inclinación y distancia entre espejos para el individuo NN

$n$	$l_n$ (m)	$\Psi_n$ (°)
0 (Espejo central)	0	0
1 y 16	0.066	1.81
2 y 17	0.132	3.63
3 y 18	0.200	5.43
4 y 19	0.268	7.22
5 y 20	0.337	8.96
6 y 21	0.406	10.65

7 y 22	0.476	12.27
8 y 23	0.546	13.83
9 y 24	0.616	15.30
10 y 25	0.687	16.70
11 y 26	0.757	18.01
12 y 27	0.828	19.25
13 y 28	0.899	20.40
14 y 29	0.970	21.48
15 y 30	1.041	22.5



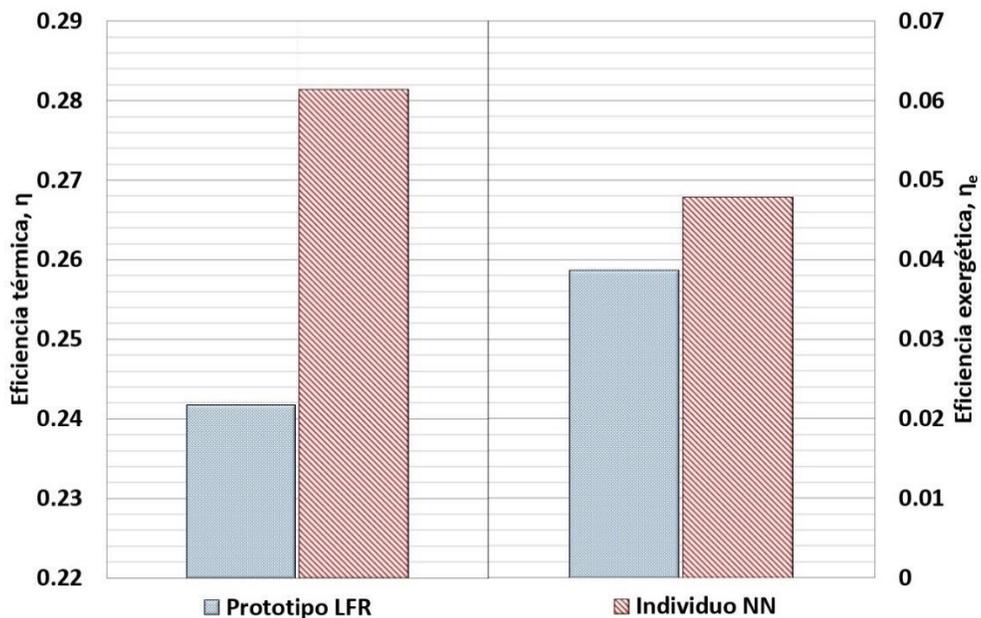
**Figura 4.4** Numeración de los espejos para el individuo NN

### 4.3 Comparación Entre Prototipo LFR y Geometría Óptima

Teniendo la geometría optimizada, es necesario realizar una comparación más exhaustiva en contra del prototipo LFR. La **Figura 4.5** muestra la comparación entre las eficiencias térmicas y exergéticas del prototipo LFR y el individuo NN (geometría óptima).

Se observa que, en el caso de la eficiencia térmica, el prototipo LFR tiene un valor de 0.24, mientras que el individuo NN alcanza un valor de 0.28, esto se traduce en un incremento del 16.4%. El incremento de la eficiencia térmica se debe al aumento que existe en el flujo de radiación absorbida en el tubo receptor.

En el caso de la eficiencia exergética, el prototipo LFR tiene un valor de 0.038, mientras que el individuo NN llega a tener un valor de 0.047, lo que se traduce en un incremento del 23.8%. Como se ha mencionado anteriormente, la eficiencia exergética tiene un aumento debido al incremento en uso de la disponibilidad de la energía ofrecida por la radiación solar.



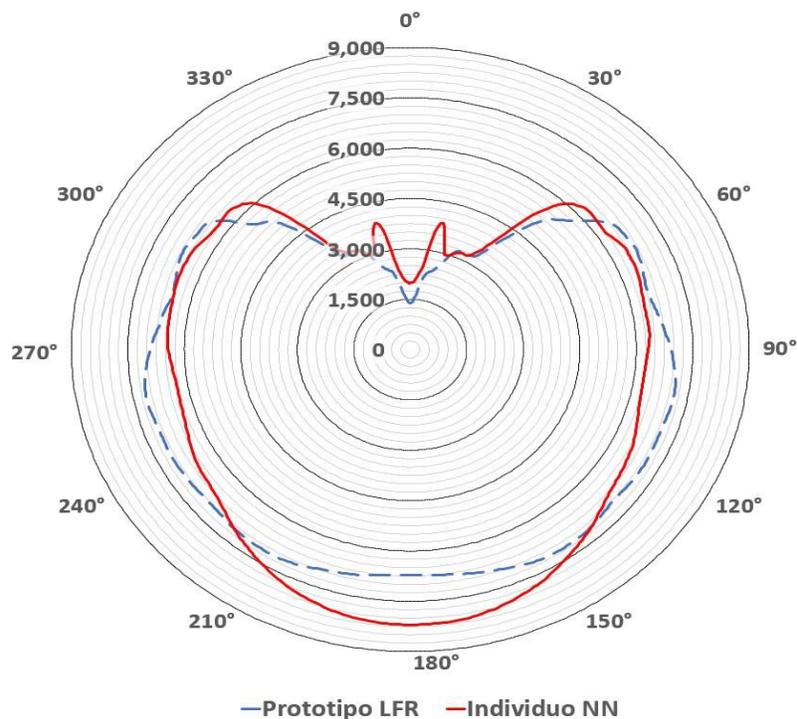
**Figura 4.5** Comparación de las eficiencias térmicas y exergéticas

Por otro lado, la **Figura 4.6** muestra la comparación de los perfiles de radiación absorbida alrededor del tubo receptor entre el prototipo LFR y el individuo NN.

Se llega a observar que, en el caso del prototipo LFR se obtiene un valor máximo de 7,180 W/m<sup>2</sup>, mientras que para el individuo NN se alcanza un flujo máximo de radiación absorbida de 8,199 W/m<sup>2</sup>, lo que representa un incremento del 14.2%. Así mismo, en ambas geometrías, los valores máximos se encuentran localizados en la parte baja del tubo receptor (entre los 120° y los 240°) de cara a los espejos. En el caso de los valores mínimos,

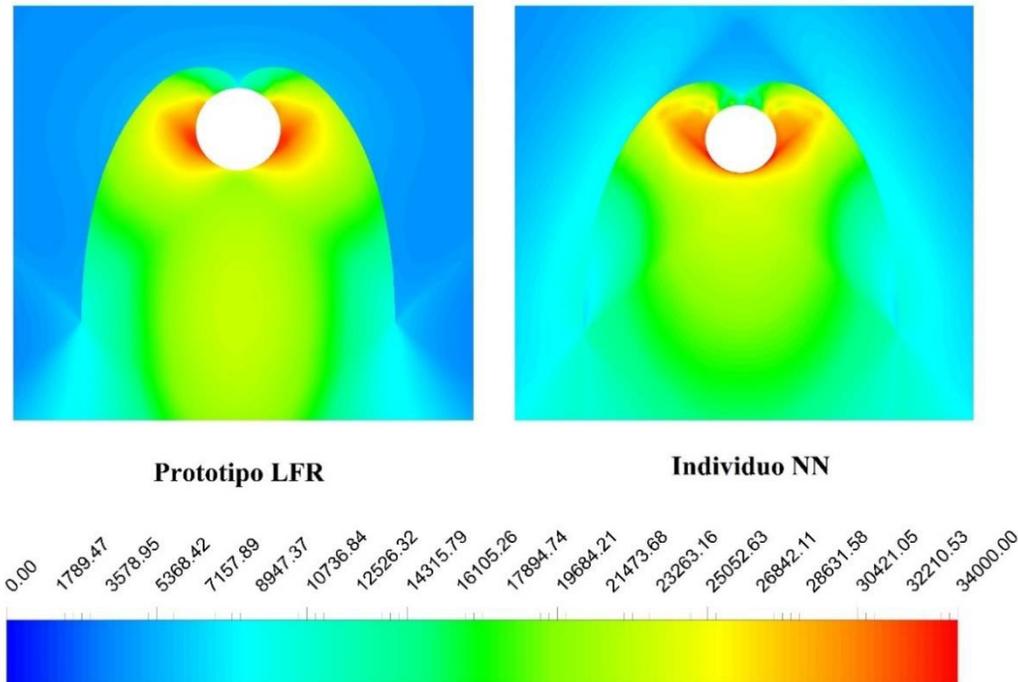
se obtiene un flujo de radiación absorbida de  $1,386 \text{ W/m}^2$  para el prototipo LFR y  $1,982 \text{ W/m}^2$  para el individuo NN. Ambas geometrías obtienen su valor mínimo en la parte alta del tubo receptor (entre  $300^\circ$  y  $60^\circ$ ).

En general, el individuo NN presenta un incremento del 2.48% en el promedio del flujo de radiación absorbida en comparación con el prototipo LFR, además, se tiene una disminución del 5.65% en términos de la desviación estándar, por tanto, se tiene una mejor homogenización en el flujo de radiación absorbida.



**Figura 4.6** Comparación del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor ( $\text{W/m}^2$ )

La **Figura 4.7** muestra la comparación de la radiación incidente en el concentrador secundario CPC entre el prototipo LFR y el individuo NN.



**Figura 4.7** Comparación de la radiación incidente en el concentrador secundario CPC ( $W/m^2$ )

Los valores máximos de la radiación incidente son de  $30,000 W/m^2$  y  $34,000 W/m^2$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente. Así mismo, se observa que, en el caso del prototipo LFR, dichos valores máximos son localizados en el lado izquierdo y derecho del tubo receptor, sin embargo, el individuo NN presenta una distribución más uniforme de la radiación incidente. En el caso de los valores mínimos, se obtiene una radiación incidente de  $15,000$  and  $18,000 W/m^2$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente, así mismo, estos valores se encuentran en la parte baja del tubo receptor para ambas geometrías. Es así como basándose en los resultados obtenidos, el individuo NN presenta un mejor rendimiento que el prototipo LFR en términos de un análisis térmico y radiativo.

Además de realizar un análisis térmico y radiativo de las geometrías del prototipo LFR y el individuo NN, resulta importante estudiar las diferencias existentes en términos de la tasa de generación de entropía. La **Figura 4.8** muestra la comparación de la tasa de generación de entropía global debido a los fenómenos de fricción de fluido ( $S_v$ ), transferencia de calor ( $S_h$ ) y radiación ( $S_r$ ).

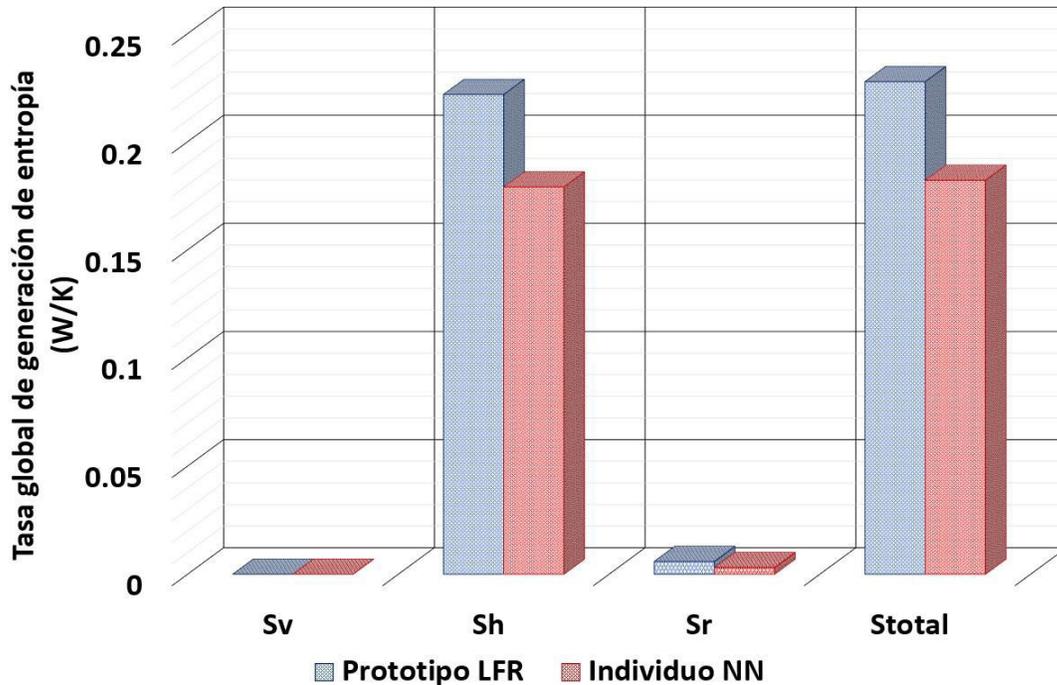
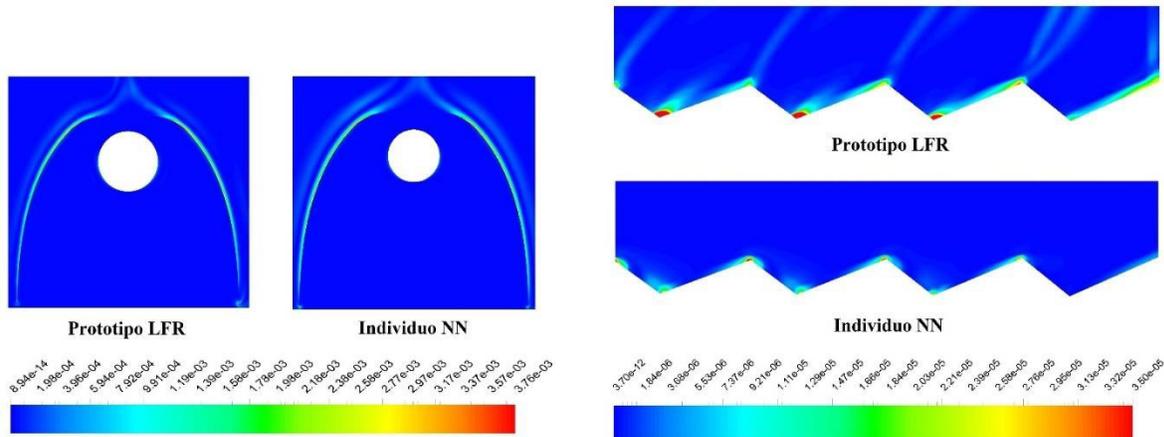


Figura 4.8 Comparación de la tasa de generación de entropía global

Se puede ver que, en ambas geometrías, se obtienen valores muy bajos para la tasa de generación de entropía global debido a la fricción de fluido, por lo que dicho fenómeno resulta despreciable. Además, el individuo NN obtiene una reducción en la tasa de generación de entropía debido al fenómeno de transferencia de calor y al fenómeno de radiación del 19.3% y del 47.5% respectivamente en comparación con el prototipo LFR. Por tanto, a través del proceso de optimización, el individuo NN tiene una reducción de alrededor del 20% para la tasa total de generación de entropía. En general, y para las condiciones ambientales utilizadas, ambas geometrías presentan una tasa de generación de entropía debido a transferencia de calor del 98.3% del total de generación de entropía.

Así mismo, el análisis realizado en el presente trabajo permite obtener de manera local la tasa de generación de entropía debido a los diversos fenómenos mencionados anteriormente. La **Figura 4.9** muestra la comparación de la tasa de generación de entropía local debido al fenómeno de fricción de fluido entre el prototipo LFR y el individuo NN. Se observa que los valores más altos se encuentran en la parte alta del concentrador secundario CPC para ambas geometrías. Los máximos valores obtenidos fueron de  $3.76 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $3.21 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente. En el tubo receptor, el prototipo LFR tiene un valor promedio de  $1.50 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{K}$ , mientras

que el individuo NN tiene un valor promedio de  $1.38 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{K}$ . En la zona de los espejos, se obtiene un valor máximo de  $3.5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$  en ambas geometrías, sin embargo, en el prototipo LFR se observan un mayor número de regiones con dicho valor máximo. En general, para ambas geometrías, se obtienen valores muy bajos de la tasa de generación de entropía local debido a la fricción del fluido, por lo tanto, el fenómeno resulta despreciable.



**Figura 4.9** Comparación de la tasa de generación de entropía local debido a fricción del fluido ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )

La **Figura 4.10** muestra la tasa de generación de entropía local debido a transferencia de calor entre ambas geometrías, de nueva cuenta, los valores más altos se localizan en la parte superior del CPC para ambas geometrías. Los valores máximos obtenidos son de alrededor de  $525 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $210 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente. En el tubo receptor, la tasa de generación de entropía local se localiza en la parte inferior del tubo con valores promedio de  $107.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $98.6 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente. Así mismo, se observa que en la parte superior de los tubos receptores se tienen bajos valores de la tasa de generación de entropía local. En el caso de la zona de los espejos, el máximo valor obtenido en ambas geometrías es de  $8.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  y se presenta en el espejo central del LFR. Sin embargo, el prototipo LFR presenta una región más amplia del máximo valor obtenido en comparación con el individuo NN. Además, en promedio, el valor de la tasa de generación de entropía local debido a transferencia de calor para todos los espejos es de  $5.64 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el prototipo LFR y  $3.96 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el individuo NN.

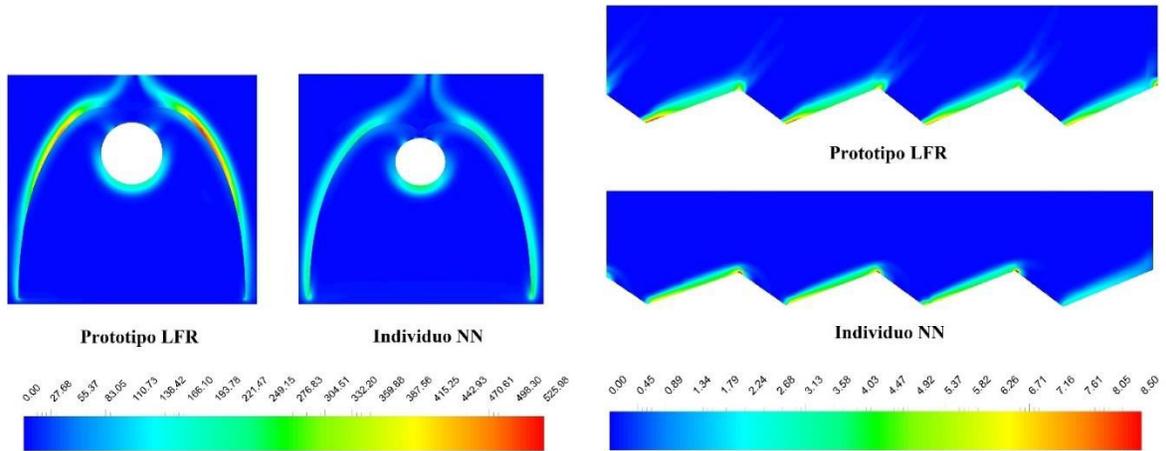


Figura 4.10 Comparación de la tasa de generación de entropía local debido a transferencia de calor ( $W/m^2K$ )

La Figura 4.11 muestra la comparación de la tasa de generación de entropía local debido a radiación entre el prototipo LFR y el individuo NN. Se puede observar que existe un comportamiento homogéneo tanto en el tubo receptor como en el concentrador secundario CPC en ambas geometrías. En el caso de los tubos receptores, se obtuvieron valores promedios de  $11.13 W/m^2K$  y  $10.03 W/m^2K$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente. Para los concentradores secundarios CPC, los valores promedios alcanzados son de  $3.94 W/m^2K$  y  $2.49 W/m^2K$  para el para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente. En el caso de la zona de los espejos se obtuvieron valores máximos de  $1.15 W/m^2K$  y  $0.9 W/m^2K$  para el prototipo LFR y el individuo NN respectivamente.

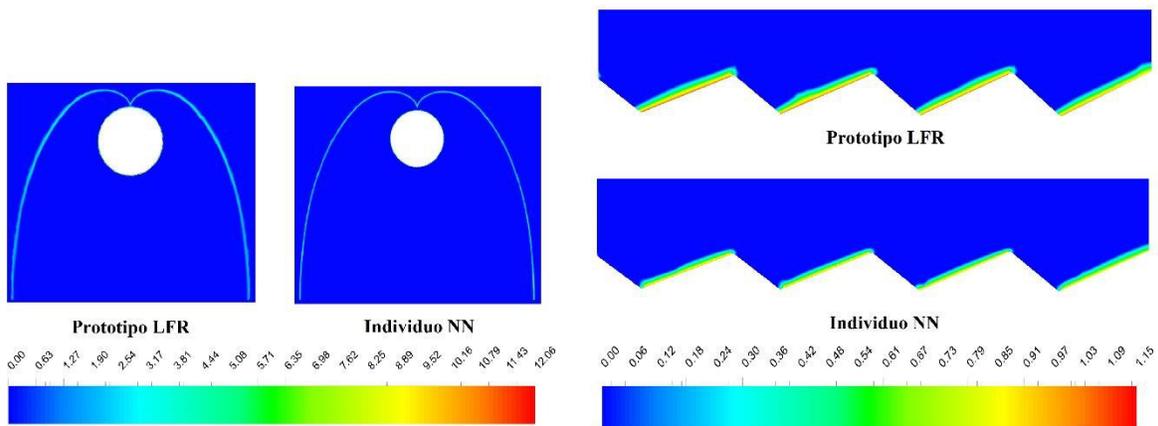


Figura 4.11 Comparación de la tasa de generación de entropía local debido a radiación ( $W/m^2K$ )

# *CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO*

### 5.1 Conclusiones

Se llevó a cabo la optimización de un Reflector Lineal Fresnel con fines de producción de calor de proceso de mediana temperatura obteniendo la mínima tasa de generación de entropía junto con el máximo flujo de radiación absorbida. Todo ello mediante el uso de la Dinámica de Fluidos Computación y el algoritmo de optimización conocido como Programación Evolutiva.

Las principales contribuciones y conclusiones del presente trabajo se resumen a continuación.

#### **Sobre el modelo y la simulación numérica:**

- El prototipo LFR, caso base de este trabajo, se caracterizó mediante la norma mexicana NMX-ES-001-NORMEX-2005 a través de cuatro pruebas experimentales, obteniendo una curva de eficiencia térmica con valores desde el 24% hasta el 36%.
- Se desarrolló el modelo numérico del prototipo LFR mediante el software Ansys-Fluent® en dos dimensiones, tomando en cuenta las condiciones ambientales, propiedades de los materiales y condiciones de frontera a las que fue sometido el prototipo LFR.
- El modelo numérico se sometió a un análisis de independencia de malla, así como a un análisis de independencia angular. Se observó que, para un número mayor a 155 mil elementos de malla, así como una división angular de  $3 \times 200 (N_\theta \times N_\phi)$ , el cambio en el flujo de radiación absorbida en el tubo receptor es insignificante.
- Se realizó la validación del modelo numérico en comparación con datos experimentales para la eficiencia térmica, eficiencia exergética y la temperatura de salida del fluido de trabajo. Los errores relativos máximos obtenidos fueron de 2.36%, 5.15% y 2.23% para la eficiencia térmica, la eficiencia exergética y la temperatura de salida respectivamente, por tanto, el modelo numérico es capaz de predecir el comportamiento de este tipo de concentrador solar.

#### **Sobre el análisis del prototipo LFR:**

- El concentrador secundario CPC llega a influir en la distribución del flujo de radiación absorbida en el tubo receptor, obteniendo un valor mínimo, un valor máximo y un valor promedio de  $1,550 \text{ W/m}^2$ ,  $7,800 \text{ W/m}^2$  y  $6,430 \text{ W/m}^2$  respectivamente.

- El contorno de radiación incidente resulta útil para poder observar los efectos de bloqueo y sombreado en los espejos adyacentes, así como el efecto de concentración de la radiación en los espejos y el concentrador secundario CPC. Los valores promedios de la radiación incidente en la pared del tubo receptor, en la cavidad del concentrador secundario CPC y en los espejos son de 28,741 W/m<sup>2</sup>, 17,857 W/m<sup>2</sup> y 3,921 W/m<sup>2</sup> respectivamente.
- La temperatura de radiación muestra un comportamiento uniforme alrededor del tubo receptor con un valor promedio de 319.1°C, mientras que en la pared del concentrador secundario CPC y en los espejos se tiene un valor promedio de 253.51°C y 92°C respectivamente. Es de notar que fuera de la influencia de dichas superficies, la temperatura de radiación es cercana a la temperatura ambiente.
- Se observan valores altos del gradiente de temperatura en la parte baja del tubo receptor, así como en la parte alta del concentrador secundario CPC, ambas zonas tienen un valor máximo de 39,000 K/m, mientras que en la zona de los espejos se obtiene 5,020 K/m como valor máximo. En general, los gradientes de temperatura muestran valores importantes solo en las partes cercanas de las superficies sólidas.
- Los contornos de velocidad del aire mostraron valores muy bajos en todas las zonas del LFR, obteniendo un valor máximo de 0.18 m/s localizado en el concentrador secundario CPC.
- El prototipo LFR mostró que el 97.4% de la tasa total de generación de entropía es debido al fenómeno de transferencia de calor, seguido por un 2.59% asociado a la tasa de generación de entropía por radiación, mientras que la tasa de generación de entropía debido a la fricción del fluido resulta despreciable (0.01% del total), lo anterior debido a las bajas velocidades obtenidas del aire circundante.
- En cuanto a la tasa de generación de entropía local debido a la fricción del fluido, se obtuvieron valores máximos de  $3.46 \times 10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>K y  $.7 \times 10^{-5}$  W/m<sup>2</sup>K en la parte alta del concentrador secundario CPC y en la zona de los espejos respectivamente. Por tanto, la generación de entropía debido al fenómeno de fricción de fluido no tiene un papel importante en el presente análisis.
- El concentrador secundario CPC obtuvo la mayor tasa de generación de entropía local debido a la transferencia de calor con un valor máximo de 283.14 W/m<sup>2</sup>K en su parte superior, mientras que, en el tubo receptor, el valor máximo alcanzado fue de 198.20 W/m<sup>2</sup>K. Los resultados de la generación de entropía debido a

transferencia de calor tienen una buena concordancia con los gradientes de temperatura mostrados.

- Se llevó a cabo una comparación entre la tasa de generación de entropía local debido a la transferencia de calor y los gradientes de temperatura. El comportamiento de estas dos variables fue muy similar en ubicaciones del CPC (L1, L2 y L3), así como en una ubicación sobre uno de los espejos (L4). Por lo tanto, existe una relación directa entre la tasa de generación de entropía local debido a la transferencia de calor y los gradientes de temperatura.
- La tasa de generación de entropía local debido a la radiación muestra un comportamiento homogéneo tanto en el tubo receptor como en el concentrador secundario CPC, obteniendo valores promedios de  $9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  y  $3.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  respectivamente. Así mismo, se puede notar un comportamiento similar en cada uno de los espejos debido a que la radiación incidente y reflejada es semejante.
- En general, se observó que los valores más altos de la tasa de generación de entropía local se encuentran en las superficies del concentrador secundario CPC, mientras que los valores más bajos se encuentran en los espejos.

### **Sobre el proceso de optimización:**

- El proceso de optimización se llevó a cabo mediante el método de Programación Evolutiva. Con dicho método se realizó la construcción de los individuos por cada generación (geometrías), dichos individuos fueron generados de acuerdo con las ecuaciones de diseño (**Ecuaciones 1-16**). Así mismo, en el proceso de optimización se consideró como función objetivo la maximización del flujo de radiación absorbida junto con la minimización de la tasa de generación de entropía.
- Para la simulación de cada uno de los individuos, se tomaron en cuenta las condiciones ambientales más adversas obtenidas de manera experimental.
- Se generó un total de seis individuos para cada una de las generaciones, así mismo, se requirieron siete generaciones para alcanzar la función objetivo propuesta, teniendo un valor final de la función fitness de 1.655.
- En términos del flujo de radiación absorbida promedio y la tasa total de generación de entropía, la séptima generación tuvo valores de  $5,790 \text{ W/m}^2$  y  $0.14 \text{ W/K}$  respectivamente. En comparación con la primera generación, se tuvo un incremento del 20.6% para el flujo de radiación absorbida promedio, así como una disminución del 44% de la tasa total de generación de entropía.

- Los resultados de cada uno de los individuos generados, así como del propio prototipo LFR fueron graficados con el fin de formar el llamado frente de Pareto con las soluciones no-dominadas. Así mismo, se observó que los resultados del prototipo LFR se encuentran cerca de las soluciones no-dominadas.
- Entre todas las soluciones de los individuos generados, el individuo NN de la séptima generación obtuvo un incremento del 2.46% y una disminución del 4.17% para el flujo de radiación absorbida y la tasa total de generación de entropía respectivamente, en comparación con el prototipo LFR.
- Se realizó la comparación de las eficiencias térmicas y las eficiencias exergéticas entre el prototipo LFR y el individuo NN. Se observó que existe un incremento del 16.4% y del 23.8% en cuanto a la eficiencia térmica y exergética respectivamente. La eficiencia térmica tiene un incremento debido al aumento en el flujo de radiación absorbida en el tubo receptor, mientras que la eficiencia exergética aumenta debido al incremento en el uso de la disponibilidad de la energía ofrecida por el sol.
- En cuanto al flujo de radiación absorbida, existe un incremento del 2.46% además de una disminución del 5.65% en la desviación estándar entre el prototipo LFR y el individuo NN. Así mismo, la radiación incidente tuvo un incremento del 13.3% en el valor máximo con respecto al prototipo LFR. Por lo tanto, el individuo NN presenta un mejor rendimiento en términos de un análisis térmico y radiativo.
- En términos de la tasa de generación de entropía total existe una reducción del 20% entre individuo NN y el prototipo LFR. Así mismo, la tasa de generación de entropía debido al fenómeno de transferencia de calor representa alrededor del 98.3% de la tasa total de generación de entropía, mientras que el fenómeno de radiación contribuye en 1.6% del total. Basado en los resultados, el fenómeno de fricción del fluido resulta despreciable en este análisis.
- En ambas geometrías, los valores máximos de la tasa de generación de entropía local se localizan en el concentrador secundario CPC, mientras que los valores mínimos se encuentran en los espejos. Así mismo, el individuo NN tuvo una disminución de sus valores máximos de la tasa de generación de entropía local debido a fricción de fluido, transferencia de calor y radiación en 14.6%, 60% y 9.8% respectivamente en comparación con el prototipo LFR.

De manera general, es importante mencionar que las simulaciones realizadas utilizaron condiciones geográficas y climatológicas que arrojan una radiación directa baja por lo que

es de suponer que bajo condiciones con radiación directa mayor los resultados tendrán un comportamiento similar.

El presente estudio refleja el éxito obtenido en la mejora en el rendimiento de un tipo de sistema térmico solar, tal como lo es el Reflector Lineal Fresnel. Dicha mejora se realizó mediante la unión de diversas técnicas y herramientas, lo que expone el beneficio y complementación de llevar a cabo procesos de este tipo. Este trabajo representa la aportación científica en la promoción de una tecnología solar (que aún no se encuentra en una etapa madura), para poder, en un futuro, contar con mayor cantidad de opciones en la producción de energía provenientes de fuentes renovables y éstas puedan llegar a ser técnica y económicamente viables.

A título personal, el presente trabajo de tesis representa múltiples días y noches de esfuerzo, dedicación e incluso, hasta cansancio y frustración de los últimos 4 años, así mismo, el trabajo expone los diversos conocimientos adquiridos a lo largo de esta etapa, como lo es: el uso y aplicación de una tecnología solar, el uso y aplicación de software especializado, el análisis y optimización estocástica de un proceso, así como llevar a cabo un análisis por medio de la Segunda Ley de la Termodinámica, teniendo claro que este tipo de análisis puede llegar a extenderse a otro tipo de dispositivos solares.

### 5.2 Trabajo a Futuro

A manera de trabajo futuro, se propone llevar a cabo las siguientes actividades:

- Realizar la evaluación del LFR considerando la variación en cuanto a condiciones de operación.
- Llevar a cabo el análisis numérico del LFR en tres dimensiones.
- Evaluar el comportamiento del LFR bajo condiciones de estado transitorio.
- Realizar simulaciones que consideren el comportamiento completo del LFR, es decir, desde la radiación incidente al LFR hasta el calentamiento del fluido de trabajo en el tubo receptor.
- Llevar a cabo el análisis numérico del LFR considerando la variación de aspectos geométricos tales como diferentes formas del concentrador secundario, así como la variación de la forma de los espejos.
- Realizar el análisis de la integración de un sistema de LFRs a un proceso real y analizar la posible optimización de éste.

# REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA). Key world energy statistics. 2019.
- [2] Suman S, Khan MK, Pathak M. Performance enhancement of solar collectors—A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;49:192–210. doi:10.1016/j.rser.2015.04.087.
- [3] Kabir E, Kumar P, Kumar S, Adelodun AA, Kim K. Solar energy : Potential and future prospects. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:894–900. doi:10.1016/j.rser.2017.09.094.
- [4] Alemán-Nava GS, Casiano-Flores VH, Cárdenas-Chávez DL, Díaz-Chavez R, Scarlet N, Mahlkecht J, et al. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;32:140–53. doi:10.1016/j.rser.2014.01.004.
- [5] Rosas-Flores JA, Rosas-Flores D, Fernández Zayas JL. Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;53:243–52. doi:10.1016/j.rser.2015.07.202.
- [6] Zhou L, Li Y, Hu E, Qin J, Yang Y. Comparison in net solar efficiency between the use of concentrating and non-concentrating solar collectors in solar aided power generation systems. *Appl Therm Eng* 2015;75:685–91. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.09.063.
- [7] Yeh H-M, Lin T. The effect of collector aspect ratio on the collector efficiency of flat-plate solar air heaters. *Science (80- )* 1995;20:1041–7.
- [8] Farjana SH, Huda N, Mahmud MAP, Saidur R. Solar process heat in industrial systems – A global review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:2270–86. doi:10.1016/j.rser.2017.08.065.
- [9] Sabiha M a., Saidur R, Mekhilef S, Mahian O. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;51:1038–54. doi:10.1016/j.rser.2015.07.016.
- [10] Kim JT, Ahn HT, Han H, Kim HT, Chun W. The performance simulation of all-glass vacuum tubes with coaxial fluid conduit. *Int Commun Heat Mass Transf* 2007;34:587–97. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.01.012.
- [11] Kumar L, Hasanuzzaman M, Rahim NA. Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. *Energy Convers Manag* 2019;195:885–908. doi:10.1016/j.enconman.2019.05.081.
- [12] Srilakshmi G, Venkatesh V, Thirumalai NC, Suresh NS. Challenges and opportunities for Solar Tower technology in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45:698–709. doi:10.1016/j.rser.2015.02.016.
- [13] Fuqiang W, Ziming C, Jianyu T, Yuan Y, Yong S, Linhua L. Progress in concentrated

- solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;79:1314–28. doi:10.1016/j.rser.2017.05.174.
- [14] Reddy KS, Balaji S, Sundararajan T. Estimation of heat losses due to wind effects from linear parabolic secondary reflector –receiver of solar LFR module. *Energy* 2018;150:410–33. doi:10.1016/j.energy.2018.02.125.
- [15] Montes MJ, Abbas R, Muñoz M, Muñoz-Antón J, Martínez-Val JM. Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: Hybrid loops with non-evacuated and evacuated receivers. *Energy Convers Manag* 2017;149:318–33. doi:10.1016/j.enconman.2017.07.031.
- [16] Bellos E, Tzivanidis C. Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector. *Sol Energy* 2018;173:769–79. doi:10.1016/j.solener.2018.08.019.
- [17] Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Daily, monthly and yearly performance of a linear Fresnel reflector. *Sol Energy* 2018;173:517–29. doi:10.1016/j.solener.2018.08.008.
- [18] Barlev D, Vidu R, Stroeve P. Innovation in concentrated solar power. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2011;95:2703–25. doi:10.1016/j.solmat.2011.05.020.
- [19] Saxena A, Jhamaria N, Singh S, Sahoo SS. Numerical analysis of convective and radiative heat losses from trapezoidal cavity receiver in LFR systems. *Sol Energy* 2016;137:308–16. doi:10.1016/j.solener.2016.08.026.
- [20] Qiu Y, He YL, Wu M, Zheng ZJ. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver. *Renew Energy* 2016;97:129–44. doi:10.1016/j.renene.2016.05.065.
- [21] Mokhtar G, Boussad B, Noureddine S. A linear Fresnel reflector as a solar system for heating water: Theoretical and experimental study. *Case Stud Therm Eng* 2016;8:176–86. doi:10.1016/j.csite.2016.06.006.
- [22] Mohan S, Saxena A, Singh S. Heat loss analysis from a trapezoidal cavity receiver in LFR system using conduction-radiation model. *Sol Energy* 2018;159:37–43. doi:10.1016/j.solener.2017.10.060.
- [23] Dabiri S, Khodabandeh E, Poorfar AK, Mashayekhi R, Toghraie D, Abadian Zade SA. Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. *Energy* 2018;153:17–26. doi:10.1016/j.energy.2018.04.025.
- [24] Bejan A. Second-Law Analysis in Heat Transfer and Thermal Design. *Adv Heat Transf* 1982;15:1–58. doi:10.1016/S0065-2717(08)70172-2.
- [25] Sciacovelli A, Verda V, Sciubba E. Entropy generation analysis as a design tool—A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43:1167–81. doi:10.1016/j.rser.2014.11.104.
- [26] Biswal P, Basak T. Entropy generation vs energy efficiency for natural convection based energy flow in enclosures and various applications: A review. *Renew Sustain*

- Energy Rev 2017;80:1412–57. doi:10.1016/j.rser.2017.04.070.
- [27] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Numerical investigation of entropy generation in a parabolic trough receiver at different concentration ratios. *Energy* 2013;53:114–27. doi:10.1016/j.energy.2013.03.006.
- [28] Javaniyan Jouybari H, Saedodin S, Zamzamian A, Nimvari ME. Experimental investigation of thermal performance and entropy generation of a flat-plate solar collector filled with porous media. *Appl Therm Eng* 2017;127:1506–17. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.170.
- [29] Zhu X, Zhu L, Zhao J. Wavy-tape insert designed for managing highly concentrated solar energy on absorber tube of parabolic trough receiver. *Energy* 2017;141:1146–55. doi:10.1016/j.energy.2017.10.010.
- [30] Mansour K, Boudries R, Dizene R. Optical, 2D thermal modeling and exergy analysis applied for performance prediction of a solar PTC. *Sol Energy* 2018;174:1169–84. doi:10.1016/j.solener.2018.09.040.
- [31] Okonkwo EC, Abid M, Ratlamwala TAH, Abbasoglu S, Dagbasi M. Optimal Analysis of Entropy Generation and Heat Transfer in Parabolic Trough Collector Using Green-Synthesized  $\text{TiO}_2$  /Water Nanofluids. *J Sol Energy Eng* 2018;141:031011. doi:10.1115/1.4041847.
- [32] Bellos E, Tzivanidis C. Multi-criteria evaluation of a nanofluid-based linear Fresnel solar collector. *Sol Energy* 2018;163:200–14. doi:10.1016/j.solener.2018.02.007.
- [33] Liu P, Zheng N, Liu Z, Liu W. Thermal-hydraulic performance and entropy generation analysis of a parabolic trough receiver with conical strip inserts. *Energy Convers Manag* 2019;179:30–45. doi:10.1016/j.enconman.2018.10.057.
- [34] Okonkwo EC, Abid M, Ratlamwala TAH, Abbasoglu S, Dagbasi M. Optimal Analysis of Entropy Generation and Heat Transfer in Parabolic Trough Collector Using Green-Synthesized  $\text{TiO}_2$ /Water Nanofluids. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2019;141. doi:10.1115/1.4041847.
- [35] Mwesigye A, Huan Z, Meyer JP. Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with CU-Therminol VP-1 nanofluid. *Energy Convers Manag* 2016;120:449–65. doi:10.1016/j.enconman.2016.04.106.
- [36] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Minimum entropy generation due to heat transfer and fluid friction in a parabolic trough receiver with non-uniform heat flux at different rim angles and concentration ratios. *Energy* 2014;73:606–17. doi:10.1016/j.energy.2014.06.063.
- [37] Barbón A, Barbón N, Bayón L, Otero JA. Optimization of the length and position of the absorber tube in small-scale Linear Fresnel Concentrators. *Renew Energy* 2016;99:986–95. doi:10.1016/j.renene.2016.07.070.
- [38] Zhu G. Development of an analytical optical method for linear fresnel collectors. *Sol Energy* 2013;94:240–52. doi:10.1016/j.solener.2013.05.003.
- [39] Chaitanya Prasad GS, Reddy KS, Sundararajan T. Optimization of solar linear

- Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube. *Sol Energy* 2017;150:1–12. doi:10.1016/j.solener.2017.04.026.
- [40] Pulido-Iparraguirre D, Valenzuela L, Serrano-Aguilera JJ, Fernández-García A. Optimized design of a Linear Fresnel reflector for solar process heat applications. *Renew Energy* 2019;131:1089–106. doi:10.1016/j.renene.2018.08.018.
- [41] Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Secondary concentrator optimization of a linear Fresnel reflector using Bezier polynomial parametrization. *Sol Energy* 2018;171:716–27. doi:10.1016/j.solener.2018.07.025.
- [42] Baños R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, Gil C, Alcayde A, Gómez J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:1753–66. doi:10.1016/j.rser.2010.12.008.
- [43] Rangaiah GP. Stochastic global optimization: techniques and applications in chemical engineering. vol. 2. World Scientific; 2010.
- [44] Moghimi MA, Craig KJ, Meyer JP. Optimization of a trapezoidal cavity absorber for the Linear Fresnel Reflector. *Sol Energy* 2015;119:343–61. doi:10.1016/j.solener.2015.07.009.
- [45] Qiu Y, Li MJ, Wang K, Liu Z Bin, Xue XD. Aiming strategy optimization for uniform flux distribution in the receiver of a linear Fresnel solar reflector using a multi-objective genetic algorithm. *Appl Energy* 2017;205:1394–407. doi:10.1016/j.apenergy.2017.09.092.
- [46] Cheng ZD, Zhao XR, He YL, Qiu Y. A novel optical optimization model for linear Fresnel reflector concentrators. *Renew Energy* 2018;129:486–99. doi:10.1016/j.renene.2018.06.019.
- [47] Ajdad H, Filali Baba Y, Al Mers A, Merroun O, Bouatem A, Boutammachte N. Particle swarm optimization algorithm for optical-geometric optimization of linear fresnel solar concentrators. *Renew Energy* 2019;130:992–1001. doi:10.1016/j.renene.2018.07.001.
- [48] Chiong R, Beng OK. A Comparison between Genetic Algorithms and Evolutionary Programming based on Cutting Stock Problem. *Eng Lett* 2007;14:72–7.
- [49] Pérez-Denicia E, Fernández-Luqueño F, Vilariño-Ayala D, Manuel Montaña-Zetina L, Alfonso Maldonado-López L. Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;78:597–613. doi:10.1016/j.rser.2017.05.009.
- [50] Soteris A, Kalogirou. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Second Edi. San Diego, USA: Academic Press; 2014.
- [51] Jaramillo OA, Aguilar JO, Castrejón-García R, Velázquez N. A Modular Linear Fresnel Reflecting Solar Concentrator for Low-Enthalpy Processes. *Renew. Energy Serv. Mank. Vol II*, 2016, p. 949–60. doi:10.1007/978-3-319-18215-5.
- [52] Mathur SS, Kandpal TC, Negi BS. Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators-II. Mirror elements of equal width. *Energy Convers Manag* 1991;31:221–32. doi:10.1016/0196-8904(91)90076-U.

- [53] Balaji S, Reddy KS, Sundararajan T. Optical modelling and performance analysis of a solar LFR receiver system with parabolic and involute secondary reflectors. *Appl Energy* 2016;179:1138–51. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.082.
- [54] Barbón A, Barbón N, Bayón L, Otero JA. Theoretical elements for the design of a small scale Linear Fresnel Reflector: Frontal and lateral views. *Sol Energy* 2016;132:188–202. doi:10.1016/j.solener.2016.02.054.
- [55] Narváez Escobedo MA. Diseño de un Concentrador Solar Lineal Tipo Fresnel de Baja Entalpía para Calor de Procesos. Universidad Veracruzana, 2014.
- [56] Kalogirou S. Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system. *Renew Energy* 1997;12:179–92. doi:10.1016/S0960-1481(97)00029-3.
- [57] NMX-ES-001-NORMEX-2005 NOM. Energía Solar-Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua- Métodos de Prueba y Etiquetado 2005:1–22.
- [58] Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium. *Appl Therm Eng* 2018;133:70–80.
- [59] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT User's Guide. ANSYS FLUENT 2013;15317:2498. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [60] Howell JR, Siegel R, Mengüç MP. Thermal Radiation Heat Transfer. 5th. Editi. Boca Ratón, USA: CRC Press; 2012. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [61] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. vol. 6th. John Wiley & Sons; 2007. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022.
- [62] Modest MF. Radiative Heat Transfer. Third Edit. Elsevier; 2013. doi:10.1016/B978-0-12-386944-9.50018-2.
- [63] ANSYS FLUENT 13 User's Guide. Ansys Fluent Theory Guide. vol. 15317. 2013.
- [64] Moghimi MA, Craig KJ, Meyer JP. Simulation-based optimisation of a linear Fresnel collector mirror field and receiver for optical, thermal and economic performance. *Sol Energy* 2017;153:655–78. doi:10.1016/j.solener.2017.06.001.
- [65] Cengel Y, Ghajar A. Heat and mass transfer (a practical approach, SI version) 2011.
- [66] Chai JC, Lee HS, Patankar S V. Ray Effect and False Scattering in the Discrete Ordinates Method. *Numer Heat Transf* 1993;24:373–89. doi:10.1080/10407799308955899.
- [67] Moghimi MA, Craig KJ, Meyer JP. A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method. *Sol Energy* 2015;116:407–27. doi:10.1016/j.solener.2015.04.014.
- [68] Bellos E. Progress in the design and the applications of Linear Fresnel Reflectors – A critical review. *Therm Sci Eng Prog* 2019;10:112–37.

doi:10.1016/J.TSEP.2019.01.014.

- [69] Bellos E, Tzivanidis C, Antonopoulos KA. A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors. *Appl Therm Eng* 2017;114:374–86. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.11.201.
- [70] Yakut MZ, Karabuğa A, Kabul A, Selbaş R. Design, Energy and Exergy Analyses of Linear Fresnel Reflector. *Exergetic, Energ. Environ. Dimens.*, Academic Press; 2017, p. 523–32. doi:10.1016/B978-0-12-813734-5.00029-9.
- [71] Spanner DC. *Introduction to thermodynamics*. London: Academic Press; 1964.
- [72] Groot D, Ruurds S, Mazur P. *Non-Equilibrium Thermodynamics*. New York: Dover Publications; 2011.
- [73] Taylor JR. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books; 1997.
- [74] Syed Mustaffa SA, Musirin I, Mohamad Zamani MK, Othman MM. Pareto optimal approach in Multi-Objective Chaotic Mutation Immune Evolutionary Programming (MOCMIEP) for optimal Distributed Generation Photovoltaic (DGPV) integration in power system. *Ain Shams Eng J* 2019. doi:10.1016/j.asej.2019.04.006.

# ANEXOS

## A.1 Programación de las Ecuaciones de Diseño

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Código basado en expresiones de: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % Modular Linear Fresnel Reflecting Solar Concentrator for Low Enthalpy Processes %
3  % O. A. Jaramillo, J. O. Aguilar, R. Castrejón-García, N. Velázquez %
4  % Con Cálculo de Distancia Focal %
5  close all
6  clear all
7  clc
8  %%
9  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Datos%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10
11  W=input('¿Ancho de espejo? (mm) ');
12  Long=input('\n¿Longitud de elementos reflectores? (mm) ');
13  n=input('\n¿Número de Reflectores a la derecha o izquierda? \n(Sin contar fila central) ');
14
15  e=0.00465; %rad, Cono Solar
16
17  %Pseudo distancia focal
18  f=W*(n+1);
19  theta_s=0.7854; % 45°=0.7854 para 9 am, debe ser en radianes
20  L(1)=0; %El espejo de la mitad tiene distancia L(1)=0
21  phi(1)=theta_s/2; % 22.5°=0.3927 para 9 am, debe ser en radianes
22
23  err1=1;
24  while err1>0.00001;
25  for i=2:n+1
26      phi(i)=phi(i-1)+0.034906;
27      err=1;
28
29      while err>0.00001;
30
31          phin(i)= 0.5*atan((L(i-1)/f)+(W/(2*f))*(sin(phi(i-1))+sin(phi(i)))/tan(1.5708-theta_s-e)+cos(phi(i-
32  1))+cos(phi(i))))+theta_s/2;
33          err=abs(phin(i)-phi(i));
34          if err>0.00001;
35              phi(i)=phin(i);
36          end
37          end
38
39  L(i)=L(i-1)+W/2*((sin(phi(i-1))+sin(phi(i)))/(tan(1.5708-theta_s-e))+(cos(phi(i-1)))+(cos(phi(i))));

```

```

40
41 end
42 fn=L(i);
43 err1=abs(fn-f);
44 if err1>0.00001;
45     f=fn;
46 end
47 end
48 phii=radtodeg(phi);
49 Li=-L; %mm
50 %Lado Derecho%
51 for j=1:n
52     Ld(j)=L(j+1);
53 end
54 for i=1:n
55     phid(i)=(theta_s-atan(Ld(i)/f))/2;
56 end
57 phidd=radtodeg(phid);
58 %%
59 for i=2:n+1
60     Lni(i)=(L(i-1))+(W/2)*(((sin(phi(i-1)))+(sin(phi(i))))/(tan(1.5708-theta_s-e)))+cos(phi(i-
61     1))+cos(phi(i));
62 end
63
64 %% Cálculo ancho del receptor %%
65
66 r_l1=(W/2)*(sin(phi(n+1)))+f;
67 r_l2=tan(atan(abs((Li(n+1))/f)+e));
68 r_l3=tan(atan(abs(Li(n+1))/f));
69
70 r_l=(r_l1)*((r_l2)-r_l3); %mm
71 r_c=(W*cos(phi(n+1)))+(W*sin(phi(n+1))*(tan(atan(abs(Li(n+1))/f)))); %mm
72
73 r_r1=-(W/2)*(sin(phi(n+1)))+f;
74 r_r2=tan(atan(abs((Li(n+1))/f)));
75 r_r3=tan(atan(abs((Li(n+1))/f)-e));
76
77 r_r=(r_r1)*((r_r2)-r_r3); %mm
78 Rpl=r_r+r_l+r_c; %mm
79 %%
80 syms R phi_e Ye
81 c=(r_c/2)+r_l;
82 c1=cos(((3*pi)/2)-theta_s);
83 c2=sin(((3*pi)/2)-theta_s);
84

```

```

85 eqn1=R*c2-phi_e*c1+0==c;
86 eqn2=-R*c1-phi_e*c2-Ye==0;
87 eqn3=R*(2*pi-cos((3*pi/2)-2*theta_s)/(1+sin((3*pi/2)-2*theta_s)))-phi_e+0==0;
88
89 [C,B]=equationsToMatrix([eqn1, eqn2, eqn3], [R, phi_e, Ye]);
90 [X]=double(linsolve(C,B));
91 R_=X(1); %%Solucion en mm
92 phi_e_=X(2); %%Solución en mm
93 Ye_=X(3); %%Solución en mm
94 Xe=(r_c/2)+r_l; %%Solución en mm
95 %%
96 theta_deg=0:1:225;
97 theta=degtorad(theta_deg);
98 d=length(theta);
99 for k=1:d;
100     if theta(k)<=theta_s+pi/2
101         rho_1(k)=R_*theta(k); %mm
102
103     elseif (theta(k)>theta_s+pi/2)
104         cc1=theta(k)+theta_s+(pi/2);
105         cc2=cos(theta(k)-theta_s);
106         cc3=sin(theta(k)-theta_s);
107         rho_1(k)=R_*((cc1-cc2)/(1+cc3));
108     end
109     XX(k)=R_*sin(theta(k))-rho_1(k)*cos(theta(k));
110     YY(k)=-R_*cos(theta(k))-rho_1(k)*sin(theta(k));
111     XXsim(k)=-XX(k);
112 end
113 %% Obtención de coordenadas de circunferencia y puntos para linea rho
114 th = 0:pi/50:2*pi;
115 xunit = R_*cos(th);
116 yunit = R_*sin(th);
117 x=[-XX(136) XX(k)];
118 y=[-YY(136) -YY(k)];
119 %% Gráficas
120 plot(XX,-YY)
121 hold on
122 plot(XXsim,-YY)
123 plot(xunit, yunit);
124 plot(XX(136),-YY(136),'x k')
125 plot(-XX(136),-YY(136),'x k')
126 plot(x,y,'--')
127 grid on
128 %% Formato a ángulos y longitudes
129 Phi_i=flip(phi_i');
130 Phi_d=phidd';

```

```

131 Phi_=cat(1,Phi_i,Phi_d);
132 Phi_12=Phi_-22.5;
133 Li_i=flip(Li');
134 Li_d=Ld';
135 LL=cat(1,Li_i,Li_d);
136 %% Cálculo de factores de concentración
137 C_cpc=(Rpl*Long)/(pi*2*R_*Long);
138 Phii_=degtorad(Phi_);
139 csnt=0;
140 for ii=1:(2*n+1)
141     csn=W*cos(Phii_(ii)-(theta_s/2))*Long;
142     csnt=csnt+csn;
143 end
144 Ac=csnt/(1000^2);
145 C_ft=(Ac)/(2*pi*(R_/1000)*(Long/1000));
146 R_rec1=(W/2)*sin(Phii_(1));
147
148 R_rec2=(L(n+1))+((W/2)*cos(phi(n+1)));
149 R_rec21=tan(atan(L(n+1)/(f))-e);
150 R_rec3=sin(atan(L(n+1)/(f))-e);
151 R_rec=(R_rec1+(R_rec2/R_rec21)-f)*(R_rec3);
152 R_recb=R_rec/1000;
153 C_=(Ac)/(2*pi*R_recb*(Long/1000));
154 %% Impresión de Resultados
155 disp('%%%%%%%% R E S U L T A D O S %%%%%%%%%')
156 fprintf('Distancia focal, f = %5.3f mm\n',f)
157 fprintf('Radio de receptor CPC = %5.3f mm\n',R_)
158 fprintf('Ángulo crítico = %2.0f°\n',radtodeg(theta_s))
159 fprintf('rc = %5.3f mm    ',r_c)
160 fprintf('ri = %5.3f mm    ',r_l)
161 fprintf('rd = %5.3f mm    ',r_r)
162 fprintf('RPI = %5.3f mm    \n',Rpl)
163 fprintf('Área de captación = %5.3f m^2    \n',Ac)
164 fprintf('Razón de concentración geométrica total C= %5.3f    \n',C_ft)
165 fprintf('Razón de concentración geométrica del CPC C_cpc= %5.3f    \n',C_cpc)
166 fprintf('Razón de concentración geométrica sin concentrador secundario C_scpc= %5.3f    \n',C_)
167
168 disp('Ángulos de espejos (izq a derecha, °)=')
169 Phi_
170 disp('Distancia entre espejos (izq a derecha, mm)=')
171 LL
172 disp('Ángulos de espejos al medio día (izq a derecha, °)=')
173 Phi_12
174
175

```

## A.2 Función Definida por el Usuario

```

1  /*****
2      UDF for entropy generation by heat and fluid flow for 2D Case: IER-LFR
3  *****/
4  #include "udf.h"
5  FILE *pFile;
6  DEFINE_ON_DEMAND(entropia_2D)
7  {
8      #if !IRP_HOST
9      Domain *d;
10     Thread *t;
11     cell_t c;
12
13     real mu; real temp; real k;
14     real s_v=0; real s_h=0; real s_t=0;
15     real gradtemp1; real gradtemp2; /*Variables*/
16     real sum=0; real sum1=0;
17     real Atot=0; real a=0;
18     real Stot_v=0; real Stot_h=0;
19     real letrero_b=0;
20     real CT=0;
21     real CT2=0;
22
23     d=Get_Domain(1);
24
25     thread_loop_c(t,d) /*Loop over domains*/
26     {
27         begin_c_loop_int(c,t) /*Loop over cells*/
28         {
29             temp=C_T(c,t); /*Temperature by cell */
30             mu=C_MU_L(c,t); /*Viscosity by cell*/
31             k=C_K_L(c,t); /*Thermal conductivity by cell*/
32             CT= C_T_G(c,t)[0]; /*Temp. gradient x*/
33             CT2=C_T_G(c,t)[1]; /* Temp. gradient y*/
34             gradtemp1=pow(CT,2);
35             gradtemp2=pow(CT2,2);
36             sum1=(gradtemp1+gradtemp2); /*Sum */
37             s_h=((k)/(pow(temp,2)))*(sum1); /*Entropy generation by conduction*/
38             sum=C_DUDY(c,t)+C_DVDX(c,t);
39             s_v=(mu/temp)*(2*(pow(C_DUDX(c,t),2)+pow(C_DVDY(c,t),2))+pow(sum,2)); /*Entropy generation
40             fluid friction,W/m^2K*/
41             s_t=s_v+s_h; /*Sum*/
42             C_UDMI(c,t,0)=s_v; /*UDM S_v*/
43             C_UDMI(c,t,1)=s_h; /*UDM S_h*/

```

```

44     C_UDMI(c,t,2)=s_t; /*UDM Sum*/
45     C_UDMI(c,t,3)=sqrt(sum1);
46     a=C_VOLUME(c,t); /*Volume of the cell in 2D en 2D=área*/
47     C_UDMI(c,t,4)=a; /*area */
48     Stot_v+=s_v*a; /*Total entropy generation fluid friction W/K*/
49     Stot_h+=s_h*a; /*Total entropy generation conduction W/K*/
50     Atot+=a; /*Total area of the geometry*/
51 }
52     end_c_loop_int(c,t)
53 }
54
55 #if RP_NODE
56 Stot_v=PRF_GRSUM1(Stot_v);
57 Stot_h=PRF_GRSUM1(Stot_h); //PRF_GRSUM1 is the global sum over all the nodes
58 Atot=PRF_GRSUM1(Atot); //These instructions are for UDF compiled
59 #endif
60     #if PARALLEL
61     if (I_AM_NODE_ZERO_P)
62     #endif
63     {
64     pFile = fopen ("Resultados_entropía_par.txt","a");
65     if(letrero_b == 0)
66     {
67     fprintf(pFile," S_v      S_h      A_total\n");
68     letrero_b = 1;
69     }
70     fprintf(pFile, "%lf, %lf, %lf\n",Stot_v,Stot_h,Atot);
71     fclose (pFile);
72     }
73
74     #if PARALLEL //Print results
75     if (I_AM_NODE_ZERO_P)
76     #endif
77     {
78     Message("Entropía global por disipación viscosa: %f\n",Stot_v);
79     Message("Entropía global por transferencia de calor: %f\n",Stot_h);
80     Message("Area total: %f\n",Atot);
81     }
82
83 #endif
84 }

```

## A.3 Programación del Operador de Mutación

```

1  %%%%%%%%%%%%% Código basado en expresiones de: %%%%%%%%%%%%%
2  % Modular Linear Fresnel Reflecting Solar Concentrator for Low Enthalpy Processes %
3  % O. A. Jaramillo, J. O. Aguilar, R. Castrejón-García, N. Velázquez %
4  % Con Cálculo de Distancia Focal %
5  % Operador de Mutación %
6
7  close all
8  clear all
9  clc
10 %%%
11 %%%%%%%%%%Datos%%%%%%%%%
12 x_0=randi([0 1]);x_1=randi([0 1]);x_2=randi([0 1]);x_3=randi([0 1]);
13 disp('%%%%%%%%% INGRESO DE DATOS %%%%%%%%%%')
14 disp('%%%%%%%%% ESQUEMA DE MUTACION DE GEOMETRIA %%%%%%%%%%')
15 A1=input('Ingresa área de la geometría a mutar A (m^2) ');
16 W1=input('Ingresa ancho de espejos de la geometría a mutar W (mm) ');
17 Long1=input('Ingresa longitud de espejos de la geometría a mutar Long (mm) ');
18
19 %% Esquema de mutación
20 AA=1:0.35:8;%Rango de A de 1-8 en intervalo de 0.35
21 AA1=numel(AA);
22 x0=((A1-1)/(8-1))*(AA1-1)+1;%Convierte el numero ingresado en escala de 1 a 21
23 if (A1>=8) %Restricción si el area supera los 8 m^2, se manda directo a disminuir
24     x00=round(x0);
25     x01=randi([1 x00]);
26     A=AA(x01);
27 else
28
29     if (x_0==1)%Si de forma aleatoria debe ser mayor
30     x00=ceil(x0);
31     x01=randi([x00 AA1]);
32     A=AA(x01);
33     end
34     if (x_0==0) %Si de forma aleatoria debe ser menor
35     x00=floor(x0);
36     x01=randi([1 x00]);
37     A=AA(x01);
38     end
39 end
40 A
41 %%%
42 WW=40:20:100; %Rango de W de 10-100 en intervalo de 5
43 WW1=numel(WW);
44 x1=((W1-40)/(100-40))*(WW1-1)+1; %Convierte el numero ingresado en escala de 1 a 15

```

```

45 if (A1==1)
46     x_1=1;
47 end
48 if (x_1==1) %Si de forma aleatoria debe ser mayor
49     x11=ceil(x1);
50     x12=randi([x11 WW1]);
51     W=WW(x12);
52 end
53 if (x_1==0) %Si de forma aleatoria debe ser menor
54     x11=floor(x1);
55     x12=randi([1 x11]);
56     W=WW(x12);
57 end
58 W
59 %%
60 LongL=1000:500:3000;%Rango de Long de 1000-3000 en intervalo de 200
61 LongL1=numel(LongL);
62 x2=((Long1-1000)/(3000-1000))*(LongL1-1)+1;%Convierte el numero ingresado en escala de 1 a
63 11
64 if (x_2==1)
65     x21=ceil(x2);%Si de forma aleatoria debe ser mayor
66     x22=randi([x21 LongL1]);
67     Long= LongL(x22);
68 end
69 if (x_2==0)
70     x21=floor(x2);%Si de forma aleatoria debe ser menor
71     x22=randi([1 x21]);
72     Long= LongL(x22);
73 end
74
75 Long
76
77 %%
78
79 N=(A*(1000)^2)/(Long*W)
80
81 N=ceil(N)
82 if N==1
83     N=N+2
84 end
85 b=mod(N,2)
86 if b==0
87     N=N+1
88 end
89 n=(N-1)/(2)
90

```

```

91 e=0.00465; %rad, Cono Solar
92
93 %Pseudo distancia focal
94 f=W*(n+1);
95 theta_s=0.7854; % 45°=0.7854 para 9 am, debe ser en radianes
96 L(1)=0; %El espejo de la mitad tiene distancia L(1)=0
97 phi(1)=theta_s/2; % 22.5°=0.3927 para 9 am, debe ser en radianes
98
99 err1=1;
100 while err1>0.00001;
101 for i=2:n+1
102     phi(i)=phi(i-1)+0.034906;
103     err=1;
104
105     while err>0.00001;
106
107         phin(i)= 0.5*atan((L(i-1)/f)+(W/(2*f))*(sin(phi(i-1))+sin(phi(i)))/tan(1.5708-theta_s-e))+cos(phi(i-
108 1))+cos(phi(i))))+theta_s/2;
109         err=abs(phin(i)-phi(i));
110         if err>0.00001;
111             phi(i)=phin(i);
112         end
113     end
114
115     L(i)=L(i-1)+W/2*((sin(phi(i-1))+sin(phi(i)))/(tan(1.5708-theta_s-e)))+(cos(phi(i-1)))+(cos(phi(i))));
116
117 end
118 fn=L(i);
119 err1=abs(fn-f);
120 if err1>0.00001;
121     f=fn;
122 end
123 end
124 phii=radtodeg(phi);
125 Li=-L; %mm
126 %Lado Derecho%
127 for j=1:n
128     Ld(j)=L(j+1);
129 end
130     phid(i)=(theta_s-atan(Ld(i)/f))/2;
131 end
132 phidd=radtodeg(phid);
133 %%
134 for i=2:n+1
135     Lni(i)=(L(i-1))+(W/2)*((((sin(phi(i-1)))+(sin(phi(i))))/(tan(1.5708-theta_s-e)))+cos(phi(i-
136 1))+cos(phi(i)));

```

```

137 end
138
139 %% Cálculo ancho del receptor %%
140
141 r_l1=(W/2)*(sin(phi(n+1)))+f;
142 r_l2=tan(atan(abs((Li(n+1))/f)+e));
143 r_l3=tan(atan(abs(Li(n+1)/f)));
144
145 r_l=(r_l1)*((r_l2)-r_l3); %mm
146 r_c=(W*cos(phi(n+1)))+(W*sin(phi(n+1))*(tan(atan(abs(Li(n+1)/f))))); %mm
147
148 r_r1=-(W/2)*(sin(phi(n+1)))+f;
149 r_r2=tan(atan(abs((Li(n+1))/f)));
150 r_r3=tan(atan(abs((Li(n+1))/f)-e));
151
152 r_r=(r_r1)*((r_r2)-r_r3); %mm
153 Rpl=r_r+r_l+r_c; %mm
154 %%
155
156 syms R phi_e Ye
157 c=(r_c/2)+r_l;
158 c1=cos(((3*pi)/2)-theta_s);
159 c2=sin(((3*pi)/2)-theta_s);
160
161 eqn1=R*c2-phi_e*c1+0==c;
162 eqn2=-R*c1-phi_e*c2-Ye==0;
163 eqn3=R*(2*pi-cos((3*pi)/2)-2*theta_s)/(1+sin((3*pi)/2)-2*theta_s))-phi_e+0==0;
164
165 [C,B]=equationsToMatrix([eqn1, eqn2, eqn3], [R, phi_e, Ye]);
166 [X]=double(linsolve(C,B));
167 R_=X(1); %%Solucion en mm
168 phi_e_=X(2); %%Solución en mm
169 Ye_=X(3); %%Solución en mm
170 Xe=(r_c/2)+r_l; %%Solución en mm
171 %%
172 theta_deg=0:1:225;
173 theta=degtorad(theta_deg);
174 d=length(theta);
175 for k=1:d;
176     if theta(k)<=theta_s+pi/2
177         rho_1(k)=R_*theta(k); %mm
178
179     elseif (theta(k)>theta_s+pi/2)
180         cc1=theta(k)+theta_s+(pi/2);
181         cc2=cos(theta(k)-theta_s);

```

```

182     cc3=sin(theta(k)-theta_s);
183     rho_1(k)=R_*((cc1-cc2)/(1+cc3));
184     end
185     XX(k)=R_*sin(theta(k))-rho_1(k)*cos(theta(k));
186     YY(k)=-R_*cos(theta(k))-rho_1(k)*sin(theta(k));
187     XXsim(k)=-XX(k);
188     end
189     %% Obtención de coordenadas de circunferencia y puntos para linea rho
190     th = 0:pi/50:2*pi;
191     xunit = R_*cos(th);
192     yunit = R_*sin(th);
193     x=[-XX(136) XX(k)];
194     y=[-YY(136) -YY(k)];
195     %% Gráficas
196     plot(XX,-YY)
197     hold on
198     plot(XXsim,-YY)
199     plot(xunit, yunit);
200     plot(XX(136),-YY(136),'x k')
201     plot(-XX(136),-YY(136),'x k')
202     plot(x,y,'-')
203     grid on
204     %% Formato a ángulos y longitudes
205     Phi_i=flip(phi_i');
206     Phi_d=phidd';
207     Phi_=cat(1,Phi_i,Phi_d);
208     Phi_12=Phi_-22.5;
209     Li_i=flip(Li');
210     Li_d=Ld';
211     LL=cat(1,Li_i,Li_d);
212     %% Cálculo de factores de concentración
213     C_cpc=(Rpl*Long)/(pi*2*R_*Long);
214     Phii_=degtorad(Phi_);
215     csnt=0;
216     for ii=1:(2*n+1)
217         csn=W*cos(Phii_(ii)-(theta_s/2))*Long;
218         csnt=csnt+csn;
219     end
220     Ac=csnt/(1000^2);
221     C_ft=(Ac)/(2*pi*(R_/1000)*(Long/1000));
222     R_rec1=(W/2)*sin(Phii_(1));
223
224     R_rec2=(L(n+1))+((W/2)*cos(phi(n+1)));
225     R_rec21=tan(atan(L(n+1)/(f))-e);
226     R_rec3=sin(atan(L(n+1)/(f))-e);
227     R_rec=(R_rec1+(R_rec2/R_rec21)-f)*(R_rec3);
228     R_recb=R_rec/1000;

```

```

229 C_=(Ac)/(2*pi*R_recb*(Long/1000));
230 %% Impresión de Resultados
231 disp('%%%%%%%%% R E S U L T A D O S %%%%%%%%%')
232 fprintf('Distancia focal, f = %5.3f mm\n',f)
233 fprintf('Radio de receptor CPC = %5.3f mm\n',R_)
234 fprintf('Ángulo crítico = %2.0f°\n',radtodeg(theta_s))
235 fprintf('rc = %5.3f mm    ',r_c)
236 fprintf('ri = %5.3f mm    ',r_l)
237 fprintf('rd = %5.3f mm    ',r_r)
238 fprintf('RPI = %5.3f mm    \n',Rpl)
239 fprintf('Área de captación = %5.3f m^2    \n',Ac)
240 fprintf('Razón de concentración geométrica total C= %5.3f    \n',C_ft)
241 fprintf('Razón de concentración geométrica del CPC C_cpc= %5.3f    \n',C_cpc)
242 fprintf('Razón de concentración geométrica sin concentrador secundario C_scpc= %5.3f    \n',C_)
243
244 disp('Ángulos de espejos (izq a derecha, °)=' )
245 Phi_
246 disp('Distancia entre espejos (izq a derecha, mm)=' )
247 LL
248 disp('Ángulos de espejos al medio dia (izq a derecha, °)=' )
249 Phi_12

```

## A.4 Actividades y Productos Generados

A lo largo del periodo del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química, se han desarrollado y generado diversas actividades y productos que inciden en la formación académica.

### ***Participación en congresos:***

- Alfaro-Ayala J. A., Aranda-Ramirez A. K., **López-Núñez O. A.**, Crespo-Quintanilla J.A., Flores-Balderas, J. N., “Simulación Numérica de un Calentador Solar Mediante la Dinámica de Fluidos Computacional”, XXXVIII Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (Ixtapa Zihuatanejo, Gro., Mayo de 2017). (ISBN: 978-607-95593-5-9). Presentación Cartel.
- **López-Núñez O. A.**, Alfaro-Ayala J. A., Jaramillo O. A., Ramírez-Minguela J. D. J., “Simulación Numérica de un Reflector Lineal Fresnel Utilizando Volumen Finito”. 5to. Congreso Nacional de Estudiantes en Energías Renovables (Temixco, Mor., Noviembre de 2017). Presentación Cartel.
- **López-Núñez O. A.**, Alfaro-Ayala J. A., Ramírez-Minguela J. D. J., Minchaca-Mojica J. I., Flores-Balderas, J. N., “Modelado Radiativo del Reflector Lineal Fresnel por Medio de Volumen Finito”, XXXIX Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (San José del Cabo, BCS., Mayo de 2018). (ISBN: 978-607-95593-6-6). Presentación Oral.
- **López-Núñez O. A.**, Alfaro-Ayala J. A., Ramírez-Minguela J. D. J., Balderas-Bernal J. A., Minchaca-Mojica J. I., Crespo-Quintanilla J.A., Flores-Balderas, J. N., “Estudio de Generación de Entropía en Calentador Solar de Tubos Evacuados”, XL Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (Bahías de Huatulco, Oax., Mayo de 2019). (ISBN: En proceso). Presentación Oral.

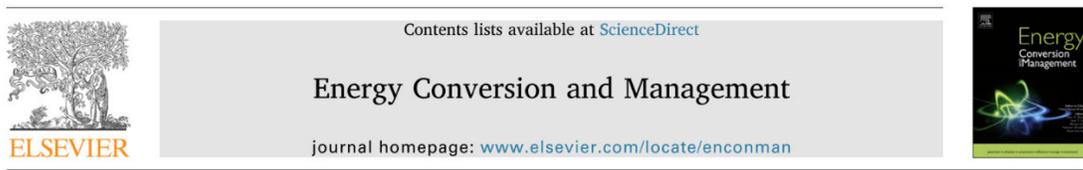
### ***Impartición de cursos:***

- Cálculo diferencial. Agosto-Diciembre 2018.
- Termodinámica 1. Enero-Julio 2019.
- Cálculo diferencial. Verano 2019.
- Matemáticas. Agosto-Diciembre 2019. Curso propedéutico DCNE.
- Programación y Métodos Numéricos 1. Enero-Julio 2020.

- Física. Enero-Julio 2020. Curso propedéutico intensivo DCNE.
- Ecuaciones Diferenciales Parciales. Verano 2020.

### Publicaciones en revistas indexadas:

- Alfaro-Ayala, J. A., **López-Núñez, O. A.**, Gómez-Castro, F. I., Ramírez-Minguela, J. J., Uribe-Ramírez, A. R., Belman-Flores, J. M., Cano-Andrade, S., 2018, Optimization of a solar collector with evacuated tubes using the simulated annealing and computational fluid dynamics. *Energy conversion and management*, 166, 343-355. (ISSN:0196-8904).



### Optimization of a solar collector with evacuated tubes using the simulated annealing and computational fluid dynamics



J. Arturo Alfaro-Ayala<sup>a,\*</sup>, Oscar A. López-Núñez<sup>a</sup>, F.I. Gómez-Castro<sup>a</sup>, J.J. Ramírez-Minguela<sup>a</sup>, A.R. Uribe-Ramírez<sup>a</sup>, J.M. Belman-Flores<sup>b</sup>, Sergio Cano-Andrade<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Chemical Engineering, University of Guanajuato, DCNE, Col. Noria Alta s/n, C.P. 36050 Guanajuato, Gto., Mexico

<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, DICIS, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5 + 1.8, Comunidad de Palo Blanco, C.P. 36885 Salamanca, Gto., Mexico

- **López-Núñez, O. A.**, Arturo Alfaro-Ayala, J., Ramírez-Minguela, J. J., Flores-Balderas, J. N., Belman-Flores, J. M., 2019, Solar radiation model applied to a low temperature evacuated tubes solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering*, 141 (3). (ISSN:1528-8986).

**Oscar A. López-Núñez<sup>1</sup>**  
Department of Chemical Engineering,  
University of Guanajuato,  
Guanajuato 36050, México  
e-mail: oa.lopeznunez@ugto.mx

**J. Arturo Alfaro-Ayala**  
Department of Chemical Engineering,  
University of Guanajuato,  
Guanajuato 36050, México  
e-mail: ja.alfaroyalala@ugto.mx

**J. J. Ramírez-Minguela**  
Department of Chemical Engineering,  
University of Guanajuato,  
Guanajuato 36050, México  
e-mail: jjj.ramirezminguela@ugto.mx

**J. Nicolás Flores-Balderas**  
Department of Chemical Engineering,  
University of Guanajuato,  
Guanajuato 36050, México  
e-mail: nico\_brain10@hotmail.com

**J. M. Belman-Flores**  
Department of Mechanical Engineering,  
University of Guanajuato,  
Salamanca 36885, México  
e-mail: jbelman@ugto.mx

## Solar Radiation Model Applied to a Low Temperature Evacuated Tubes Solar Collector

A solar radiation model is applied to a low temperature water-in-glass evacuated tubes solar collector to predict its performance via computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations. This approach allows obtaining the transmitted, reflected, and absorbed solar radiation flux and the solar heat flux on the surface of the evacuated tubes according to the geographical location, the date, and the hour of a day. Different environmental and operational conditions were used to obtain the outlet temperature of the solar collector; these results were validated against four experimental tests based on an Official Mexican Standard resulting in relative errors between 0.8% and 2.6%. Once the model is validated, two cases for the solar collector were studied: (i) different mass flow rates under a constant solar radiation and (ii) different solar radiation (due to the hour of the day) under a constant mass flow rate to predict its performance and efficiency. For the first case, it was found that the outlet temperature decreases as the mass flow rate increases reaching a steady value for a mass flow rate of 0.1 kg/s (6 l/min), while for the second case, the results showed a corresponding outlet temperature behavior to the solar radiation intensity reaching to a maximum temperature of 36.5 °C at 14:00 h. The CFD numerical study using a solar radiation model is more realistic than the previous reported works leading to overcome a gap in the knowledge of the low temperature evacuated tube solar collectors. [DOI: 10.1115/1.4041402]

- **López-Núñez, O. A.**, Alfaro-Ayala, J. A., Jaramillo, O. A., Ramírez-Minguela, J. J., Castro, J. C., Damian-Ascencio, C. E., Cano-Andrade, S., 2020, A numerical analysis of the energy and entropy generation rate in a Linear Fresnel Reflector using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 146, 1083-1100. (ISSN:0960-1481).



### A numerical analysis of the energy and entropy generation rate in a Linear Fresnel Reflector using computational fluid dynamics



Oscar A. López-Núñez <sup>a</sup>, J. Arturo Alfaro-Ayala <sup>a,\*</sup>, O.A. Jaramillo <sup>b</sup>, J.J. Ramírez-Minguela <sup>a</sup>, J. Carlos Castro <sup>b</sup>, Cesar E. Damian-Ascencio <sup>c</sup>, Sergio Cano-Andrade <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Chemical Engineering, University of Guanajuato, DCNE, Col. Noria Alta s/n, C.P. 36050, Guanajuato, Gto, Mexico

<sup>b</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, C.P. 62580, Temixco, Morelos, Mexico

<sup>c</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, DICIS, Salamanca, C.P. 36885, Salamanca, Gto, Mexico

- **López-Núñez, O. A.**, Alfaro-Ayala, J. A., Ramírez-Minguela, J. J., Belman-Flores, J. M., & Jaramillo, O. A. 2020. Optimization of a Linear Fresnel Reflector applying Computational Fluid Dynamics, entropy generation rate and Evolutionary Programming. *Renewable Energy*, 152, 698-712.



### Optimization of a Linear Fresnel Reflector Applying Computational Fluid Dynamics, Entropy Generation Rate and Evolutionary Programming



Oscar A. López-Núñez <sup>a</sup>, J. Arturo Alfaro-Ayala <sup>a,\*</sup>, J.J. Ramírez-Minguela <sup>a</sup>, J.M. Belman-Flores <sup>b</sup>, O.A. Jaramillo <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Chemical Engineering, University of Guanajuato, DCNE, Col. Noria Alta s/n, C.P. 36050, Guanajuato, Gto, Mexico

<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, DICIS, Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, C.P. 36885, Salamanca, Gto, Mexico

<sup>c</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, C.P. 62580, Temixco, Morelos, Mexico