



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA**

**Integración de un Generador de Efecto Termoelectrico en un  
Concentrador de Foco Puntual (DEFAC)**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

P R E S E N T A:

**Ricardo Arturo Pérez Enciso**

Director de tesis: **Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago**



2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca

Secretario: Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago

Vocal: Dr. Sergio Cuevas García

1er. Suplente: Dr. David Riveros Rosas

2do. Suplente: Dr. Jorge Alberto Andaverde Arredondo

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA, TEMIXCO, MORELOS.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago

---

**FIRMA**

# Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo mi amor:

A mi amada esposa Viviana Bautista Mariscal.

A mi hermosa e inteligente hija Adhara.

A mi hijo Arath, quien dio un nuevo sentido a mi vida.

A mis padres Luz Miryam Enciso Dueñas y Mario Fidencio Pérez Carlos.

A mis hermanas y sus hijas: Rozmahely y Constanza, Kateryna y Sophya, y a mi hermana Ydiz.

A mi hermano Mario Alberto.

# Agradecimientos

Al Dr. Carlos Albero Pérez Rábago, director de esta tesis, por el apoyo, disposición, orientación, enseñanzas, excelente comunicación y correcciones de la tesis, que en conjunto me ayudaron a realizar este proyecto de investigación. Le agradezco también, que además de ser mi guía en este trabajo, se porto como el gran amigo que es.

A los miembros de mi jurado, Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca, Dr. Jorge Alberto Andaverde Arredondo, Dr. David Riveros Rosas y Dr. Sergio Cuevas García, les agradezco sus observaciones y sugerencias para mejorar este documento.

En especial al Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca que tuvo la visión para proponer el tema de investigación, por su confianza y apoyo incondicional. A los investigadores: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado, Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes y Dr. Jorge Alberto Andaverde Arredondo, por su disposición y conocimientos para aclarar mis dudas surgidas en el desarrollo de este trabajo de investigación. Al Dr. David Riveros Rosas por su apoyo en la modelación del flujo radiativo concentrado con el código TONALLI.

A todos los profesores que impartieron las materias que curse durante mi maestría.

Al Centro de Investigación en Energía (CIE-UNAM) al permitirme el uso de sus instalaciones para realizar este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

A mi esposa Viviana por apoyarme en esta aventura y a mis hijos: Adhara y Arath, por darme una razón más para seguir adelante.

A mis padres: Luz Miryam Enciso Dueñas y Mario Fidencio Pérez Carlos, por darme la oportunidad de vivir, por su apoyo y por la formación que me dieron. A mis hermanas y hermano: Rozmahely, Kateryna, Ydiz y Mario, por su apoyo.

A mis compañeros y amigos del CIE, Sergio Lugo, Francisco Ginez, Adriana García, Mario Rios, Eduardo Venegas, Martin Esquivelzeta, Guadalupe Moreno y Teresa Ruiz.

A mis amigos Manuel Rangel, Verónica Solano, Gabino Castillo y Berenice.

A todos y cada una de las personas que tuvieron alguna aportación en este trabajo de investigación.

# Índice

Agradecimientos.	<i>iv</i>
Resumen.	<i>v</i>
Lista de figuras.	<i>ix</i>
Lista de tablas.	<i>xi</i>
1. Introducción.	<i>1</i>
1.1 Energía, medio ambiente y energía solar.	<i>1</i>
1.2 Sistemas de concentración solar.	<i>3</i>
1.3 Generación de potencia eléctrica a través de concentración solar.	<i>4</i>
1.3.1 Sistemas de concentración solar distribuidos.	<i>6</i>
1.3.2 Sistemas de concentración solar centralizados.	<i>8</i>
1.4 Concentrador solar de foco puntual en el CIE (DEFAC)	<i>10</i>
1.5 Calorímetro de placa plana CPP	<i>12</i>
1.6 Descripción de un generador termoeléctrico	<i>14</i>
1.7 Objetivo	<i>17</i>
1.8 Descripción de la tesis	<i>18</i>
2. Modelación del sistema.	<i>20</i>
2.1 Problema físico.	<i>20</i>
2.2 Evaluación de la distribución del flujo radiativo concentrado sobre la placa receptora.	<i>22</i>
2.3 Modelo teórico de la transferencia de calor en el sistema de generación eléctrica.	<i>28</i>
2.3.1 Modelo conductivo de las placas.	<i>28</i>
2.3.2 Modelo conductivo y convectivo a través de CFD (en FLUENT).	<i>35</i>
2.4 Resultados de la modelación térmica del sistema de generación termoeléctrica.	<i>37</i>
2.4.1 Resultados del modelo conductivo de las placas.	<i>37</i>
2.4.2 Resultados del modelo de transferencia de calor a través de CFD.	<i>38</i>
3. Montaje experimental, instrumentación y diseño de experimentos.	<i>41</i>
3.1 Montaje de la celda termoeléctrica en el ICPP.	<i>41</i>
3.2 Montaje del generador termoeléctrico y el elemento calefactor.	<i>41</i>
3.3 Diseño de experimentos.	<i>47</i>
3.4 Montaje del generador termoeléctrico en un sistema de	<i>51</i>

	concentración solar (DEFRAC).	
3.5	Experimentos con la celda termoeléctrica y el DEFRAC	48
3.6	Instrumentación del sistema	
4.	Resultados experimentales y análisis.	54
4.1	Resultados en el medio controlado.	54
4.2	Resultados en el sistema de concentración solar.	59
	4.2.1 Resultados ópticos.	63
	4.2.2 Resultados térmicos.	69
5.	Conclusiones y recomendaciones.	71
	Referencias.	74
	Apéndices.	77
A1	Rediseño del sistema de seguimiento del DEFRAC.	77
A2	Programa de la transferencia de calor diseñado en MatLab.	81

## Lista de figuras

1.1	Sistemas de concentración solar.	4
1.2	Sistemas de concentración a través de lentes.	5
1.3	Sistemas de concentración a través de espejos.	5
1.4	Fotografía de un dish Stirling (EURODISH, PSA).	7
1.5	Sistema fotovoltaico con concentración.	7
1.6	Imagen de un sistema de concentración solar tipo canal parabólico.	8
1.7	Imagen de un concentrador solar tipo torre central, en la que se puede observar el campo de heliostatos y la torre central.	9
1.8	Sistema de concentración solar tipo parque de dish Stirling.	10
1.9	Diagrama del Dispositivo Experimental de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (DEFAC).	11
1.10	Fotografía del DEFAC, tomada en la plataforma solar del CIE.	11
1.11	Esquema del calorímetro de placa plana en operación	12
1.12	Sistema de generación de potencia eléctrica integrado al sistema de concentración solar (DEFAC).	13
1.13	Esquema de un generador termoeléctrico y su funcionamiento.	13
2.1	Diagrama esquemático del medio controlado.	16
2.2	Distribución de flujo concentrado en un receptor circular Plano a diferentes cantidades de espejos del DEFAC, obtenido con el código CIRCE2.	18
2.3	Distribución de flujo concentrado a diferentes distancias focales de un receptor circular con tres espejos del DEFAC, obtenido con el código CIRCE2.	20
2.4	Distribución de flujo concentrado a diferentes distancias focales de un receptor circular con tres espejos del DEFAC, orientando los espejos a cada distancia.	21
2.5	Distribución del flujo de radiación concentrada, ubicando el receptor fuera de foco ( <i>a</i> 1.70 m) del sistema de concentración, usando solo 3 espejos y orientándolos a esa distancia focal.	21
2.6	Distribución del flujo de radiación concentrada ajustado con una ecuación y los resultados de la simulación con CIRCE2.	22
2.7	Distribución del flujo de radiación concentrada modelado en código TONALLI a una distancia focal del receptor de 1.70 m.	22
2.8	Esquema del sistema de generación, en el que se muestran las condiciones de frontera.	24
2.9	Se muestran los cubos de $Bi_2Te_3$ que forman el generador termoeléctrico.	26
2.10	Diagrama para las referencias de la tabla 2.1.	28
2.11	Se muestra la malla creada en GAMBIT.	29
2.12	Diagrama del sistema de generación eléctrica, en el que se describen las condiciones de frontera que aplican en cada caso.	29
2.13	Imagen de la distribución de temperaturas en las placas de cobre	30



---

	y el dispositivo termoelectrico, obtenidos del modelo en MatLab.	
2.14	Imagen de la distribución de temperaturas simulado en FLUENT.	31
2.15	Imagen de la distribución del flujo de agua que refrigera la placa de cobre del calorímetro.	32
3.1	Imagen de un dispositivo termoelectrico de $Bi_2Te_3$ .	34
3.2	Esquema del calorímetro de placa plana.	35
3.3	Esquema del sistema de refrigeración usado en los experimentos.	36
3.4	Imágenes de la integración del sistema de generación eléctrica.	36
3.5	Imágenes del medio controlado.	37
3.6	Imagen de cómo se instaló el sistema de generación eléctrica en el DEFAC.	40
3.7	Esquema de la alineación del sistema de generación eléctrica, el conjunto de espejos concentradores y una cámara CCD.	41
3.8	Imágenes del plano coordinado en la placa receptora del sistema de generación.	43
3.9	Ubicación de los termopares en las placas de cobre.	44
3.10	Imagen del pirheliómetro usado en los experimentos.	46
3.11	Esquema de la radiación solar con respecto a una superficie receptora.	46
4.1	Grafica de la curva voltaje-corriente ( $V-I$ ), obtenida de la campaña experimental en el medio controlado.	50
4.2	Grafica de la curva de generación de potencia eléctrica $Q_{out}$ en función de la potencia de entrada $Q_{in}$ .	52
4.3	Grafica de las curvas de eficiencia, una del dispositivo termoelectrico ( $Q_{out}/Q_c$ ) y la otra del sistema de generación ( $Q_{out}/Q_{in}$ ).	52
4.4	Grafica de la curva voltaje-corriente obtenida en la campaña experimental con el DEFAC.	53
4.5	Grafica de la curva voltaje-corriente obtenida en la campaña experimental para diferente número de espejos del DEFAC.	54
4.6	Grafica de la curva de generación de potencia eléctrica $Q_{out}$ en función de la potencia de entrada $Q_{in}$ del DEFAC.	54
4.7	Grafica de las curvas de eficiencia, una del dispositivo termoelectrico ( $Q_{out}/Q_c$ ) y la otra del sistema de generación ( $Q_{out}/Q_{in}$ ) de los experimentos en el DEFAC.	55
4.8	Imagen del spot de radiación solar concentrada sobre la placa receptora, con 3 espejos del grupo A del DEFAC.	56
4.9	Imagen del spot de radiación solar concentrada sobre la placa receptora procesada en MatLab.	56
4.10	Imagen de la distribución de la radiación solar concentrada sobre la placa receptora en la parte central del spot procesada en MatLab en escala de grises y pixeles.	57
4.11	Se muestra la grafica de la distribución de la función $f_{pixel}$ .	57
4.12	Se muestra la comparativa de la transformación de la distribución de niveles de grises a la de la intensidad de flujo radiativo.	59

---

- 4.13 Comparativa de la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora entre la modelación en código CIRCE2 y la imagen de la cámara CCD. 59

## Lista de tablas

- 2.1 Concentración generada por el DEFRAC dependiendo del número de espejos. 19
- 2.2 Distancias focales del receptor con las que se calculo la distribución de radiación solar concentrada. 19
- 2.3 Distancias focales del receptor con las que se calculo la distribución de radiación solar concentrada. 20
- 2.4 Propiedades físicas de los materiales del sistema de generación eléctrica. 27
- 2.5 Características del dibujo en GAMBIT. 28
- 3.1 Valores de carga para conocer la curva voltaje-corriente en el medio controlado. 38
- 3.2 Valores de potencia de entrada para conocer la curva de eficiencia en el medio controlado. 39
- 3.3 Valores de carga para generar la curva voltaje-corriente en el DEFRAC. 42
- 3.4 Valores para conocer la curva de eficiencia en el DEFRAC. 42
- 4.1 Ecuaciones para el cálculo de la propagación de errores. 49
- 4.2 Valores obtenidos en la campaña experimental en el medio controlado para conocer la curva  $V-I$ . 50
- 4.3 Valores obtenidos en la campaña experimental en el medio controlado para obtener la curva de eficiencia del dispositivo termoelectrico y el sistema de generación. 51
- 4.4 Distribución de temperaturas en la placa receptora con una potencia de entrada  $Q_{in} = 205W$ . 60
- 4.5 Distribución de temperaturas en la placa refrigerada con una potencia de entrada  $Q_{in} = 205W$ . 60
- 4.6 Se muestran las temperaturas registradas por los termopares ubicados en el centro de las placas de cobre en el medio controlado. 61
- 4.7 Se muestran las temperaturas registradas por los termopares ubicados en el centro de las placas de cobre en el DEFRAC. 61

## Resumen

En este trabajo de investigación, se implementó, caracterizó y analizó teórica y experimentalmente, un generador de efecto termoeléctrico en un concentrador solar de foco puntual, denominado DEFAC (*Dispositivo Experimental de Flujos Radiativos Altamente Concentrados*). La intención de la implementación del dispositivo termoeléctrico en el sistema de concentración solar, fue la de aprovechar la versatilidad que brindan estos dispositivos de funcionar obteniendo el calor de diversas fuentes térmicas, como por ejemplo: el calor de desecho de un equipo, sistema o proceso, el calor producido por la quema de algún combustible o el calor proveniente de un sistema de concentración solar. Para este trabajo se utilizó un dispositivo termoeléctrico funcionando con efecto Seebeck para la generación de potencia eléctrica a través de una diferencia de temperaturas entre sus caras. Esta diferencia de temperaturas se logró usando como fuente de calor resistencias eléctricas o un sistema de concentración solar y como sistema de refrigeración, un calorímetro de placa plana, que para este trabajo se llamo intercambiador de calor de placa plana (ICPP). Con este arreglo se logró obtener una cara caliente y otra fría en el dispositivo termoeléctrico.

Para conocer el comportamiento del dispositivo termoeléctrico en el sistema de concentración solar, primero se modeló la distribución de la radiación solar concentrada sobre la placa receptora del sistema de generación eléctrica, usando el método de trazado de rayos con el código CIRCE2 y TONALLI. Con esa modelación, se encontró que la distancia óptima del plano de la placa receptora del sistema de generación eléctrica, con la que se obtuvo una distribución uniforme de radiación solar concentrada en un spot (mancha) solar de 3 cm de diámetro, fue de 1.70 m, siempre y cuando se orienten los espejos hacia el centro del receptor. Esta modelación de distribución de radiación solar concentrada, se corroboró con los resultados de los experimentos, por medio de imágenes CCD del spot solar reflejado sobre la placa receptora y se encontró una desviación menor a 2 %.

Para estimar las temperaturas que se alcanzarían en las placas de cobre del sistema de generación eléctrica, se desarrolló un programa del fenómeno de la transferencia de calor, usando MatLab, con el que se obtuvieron valores de temperatura en la cara caliente del dispositivo termoeléctrico de  $514\text{ K}$  y en la cara fría de  $360\text{ K}$ . Por otro lado se hizo una modelación del fenómeno de transferencia de calor con un software comercial especializado en la simulación de este tipo de fenómenos (FLUENT), en el que se pudo desarrollar un modelo de la transferencia de calor por conducción y del comportamiento del fluido de refrigeración dentro del calorímetro de placa plana del sistema de generación eléctrica y se obtuvieron valores de temperatura en la cara caliente del dispositivo termoeléctrico de  $498.9\text{ K}$  y en la cara fría de  $348.7\text{ K}$ .

Para caracterizar el sistema de generación eléctrica, se diseñó una campaña experimental con la que se logró reproducir el comportamiento del dispositivo termoeléctrico, como el reportado en trabajos similares realizados con anterioridad [Palacios, 1998] [Rowe, 1998], en los que se describe que se tiene una relación lineal en la curva voltaje-corriente. Por otro lado, las eficiencias más altas del dispositivo termoeléctrico fueron de  $2.7\%$  con una generación de potencia eléctrica máxima de  $3\text{ W}$ , mientras que el sistema de generación eléctrica tuvo una eficiencia de  $1.5\%$  para potencias de entrada aproximadas a los  $200\text{ W}$ , usando solo 3 espejos del DEFRAC.

# Capítulo 1

## Introducción

En el presente capítulo se describe brevemente el estado actual de la energía a nivel mundial, así como las principales fuentes y sus impactos en el medio ambiente. Por otra parte, se menciona el potencial de energía solar que existe en el mundo y en particular en México, así como las tecnologías que se han desarrollado para su aprovechamiento. En particular, se menciona la conversión de energía solar-térmica en eléctrica de forma directa, a través de dispositivos termoeléctricos, los cuales, a pesar de que en la actualidad tienen un gran número de aplicaciones, dentro de la revisión del estado del arte de esta tecnología, no se tiene evidencia clara de su aplicación solar [Rowe, 2006]. Por último, se presentan los objetivos de este trabajo de investigación.

### 1.1 Energía, medio ambiente y energía solar

La energía es un recurso necesario para el desarrollo humano, es por ello que se debe hacer un uso eficiente del mismo, así como buscar alternativas que no tengan consecuencias negativas para el medio ambiente. Hoy en día a nivel mundial las mayores fuentes de energía provienen del petróleo, carbón y gas natural con un 34.4%, 26.0% y 20.5%, respectivamente [IEA, 2008], es decir, el 80.9% del consumo energético mundial proviene de combustibles fósiles. Se estima que las reservas probadas de petróleo y gas natural pueden satisfacer la demanda mundial al ritmo actual de consumo, durante aproximadamente 40 años [WEO, 2008]. Este dato no toma en cuenta el crecimiento de la demanda energética por el desarrollo económico

de los países emergentes, así como el impacto en el consumo de petróleo que tendrá el aumento de precio conforme las reservas comiencen a agotarse. Por otro lado, la quema de hidrocarburos trae consigo un impacto negativo en el medio ambiente, como son la emisión de gases de efecto invernadero tales como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{NO}_x$  causantes del cambio climático que se está presentando en nuestros días y que en el futuro a largo plazo la temperatura global del planeta se podría incrementar hasta unos  $6^\circ\text{C}$ , si se continúa con las tendencias actuales de emisiones de gases de efecto invernadero [WEO, 2008]. Entre las estrategias que se están implementando, se encuentra el desarrollo de equipos más eficientes, el ahorro de energía y la búsqueda de nuevas fuentes de energía que puedan abastecer de manera sustentable las demandas energéticas que la humanidad requiere y que no deterioren el medio ambiente, siendo las energías renovables como la eólica, hidráulica, biomasa, geotermia, y la solar, las que presentan una alternativa para mitigar esta problemática.

La energía solar es una fuente de energía renovable que está disponible en toda la faz de la Tierra. Sin embargo, no con la misma intensidad para su aprovechamiento, además de variar dependiendo de la temporada del año y de sólo estar disponible durante el día. Aún así, la cantidad de energía que recibe la Tierra al año es muy abundante. Esto se puede estimar conociendo el flujo radiativo solar extraterrestre, el cual es de  $1367 \text{ W/m}^2$  [Duffie, 1991] y considerando que solo el 58% de éste alcanza a llegar a la corteza terrestre [Wallace, 1977]. Se tiene entonces  $3.2 \times 10^{24} \text{ J}$  al año y si el consumo actual de energía en el mundo es de  $4.92 \times 10^{20} \text{ J}$  al año [IEA, 2008], puede deducirse que la energía solar es suficiente para satisfacer esta demanda de energía, ya que el consumo anual representa apenas el 0.015% de la energía solar recibida por año. Por otra parte, México se encuentra en una zona geográfica apta para aprovechar la energía solar, debido a que los niveles de radiación solar están dentro de la franja de mayor intensidad en el mundo, sobretodo en el noroeste del país, con valores de insolación promedio de  $5.7 \text{ KWh/m}^2$  al día, aproximadamente [IIE, 2006].

En la actualidad se podría decir que existen, para fines de aplicación tres ramas de tecnologías solares [Winter, 1991]:

- a) Los sistemas fotovoltaicos, los cuales consisten en la transformación directa de la energía contenida en los fotones, provenientes de la radiación solar, en energía eléctrica, mediante dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas.
- b) Los sistemas fotoquímicos, los cuales utilizan la radiación solar para producir combustibles solares que después pueden ser convertidos en electricidad a

través de las celdas de combustibles o depurar sustancias degradando compuestos tóxicos.

- c) Los sistemas fototérmicos, los cuales transforman la energía radiativa del Sol en energía térmica y ésta posteriormente puede ser usada para producir potencia mecánica o eléctrica, a través de maquinas termodinámicas.

Pensando en la generación de potencia eléctrica, la tecnología fotovoltaica es en la actualidad la tecnología solar con mayor penetración en el mercado mundial, además de que se está acoplando a esta tecnología, sistemas de concentración solar, con lo que se han logrado mejorar eficiencias y reducir la cantidad de celdas solares empleadas, obteniendo las mismas cantidades de energía por metro cuadrado [Ghassan, 2009]; sin embargo, sus eficiencias son aún bajas y sus costos son elevados con respecto a la generación de energía a través de métodos convencionales. Por otro lado, las tecnologías fototérmicas han demostrado tener eficiencias mayores y en el escalamiento adecuado serán competitivas con las tecnologías de energías convencionales [Kolb, 2000].

## 1.2 Sistemas de concentración solar

La concentración solar tiene por objetivo aumentar la densidad de flujo radiativo o radiación solar directa que se recibe de manera natural sobre la Tierra y esto se logra mediante dispositivos ópticos que desvían los rayos de Sol a una superficie llamada receptor, provocando con esta concentración, un aumento considerable de la temperatura del receptor y permitiendo operar maquinas térmicas eficientemente. Para lograr que la radiación solar directa desviada por los dispositivos ópticos siempre se dirija al receptor, se requieren de mecanismos que les permitan seguir el movimiento aparente del Sol. Existen diversos dispositivos ópticos para lograr el efecto de concentración, entre los cuales se encuentran los siguientes:

1. Sistemas ópticos translucidos: que son dispositivos que permiten que la radiación solar pase a través de ellos y por el efecto de refracción y por la forma que tienen, se desvían los rayos solares a la zona focal, y es en el foco donde se ubica el receptor, un ejemplo de este tipo de lentes son las lupas y las lentes de Fresnel [RALF LEUTZ *et al.*, 1998]. En la figura 1.1 se muestran imágenes de estos sistemas; a) Lente convencional y b) Lente tipo Fresnel.



Figura 1.1. Sistemas de concentración solar a través de sistemas translucidos. a) Lente convencional. b) Lente tipo Fresnel.

2. Sistema de reflexión: los cuales desvían los rayos solares hacia un receptor por efecto de la reflexión, los espejos pueden ser planos, con curvaturas circulares o parabólicas para tener un cierto nivel de concentración. En la figura 1.2 se muestran algunos tipos de estos sistemas: a) Plato parabólico, que solo desvía los rayos solares hacia un receptor ubicado en lo alto de una torre y b) Un concentrador con curvatura parabólica, que desvía los rayos solares hacia su línea focal.

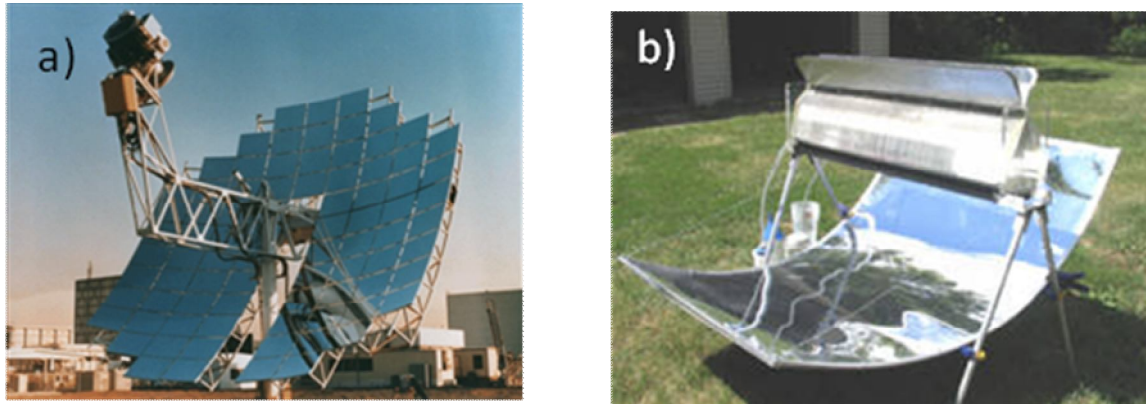


Figura 1.2. Sistemas de concentración solar a través de sistemas de reflexión. a) Plato parabólico, b) Canal parabólico.

### 1.3 Generación de potencia eléctrica a través de concentración solar

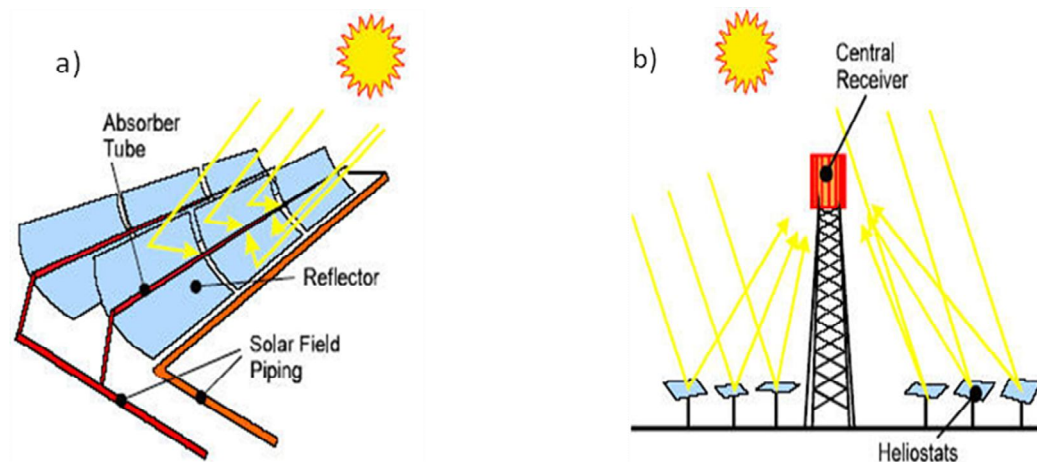
La generación de potencia eléctrica a través de concentración solar se refiere a la transformación de la energía térmica de la radiación solar directa en energía eléctrica, usando diversos dispositivos ópticos de concentración. En la actualidad

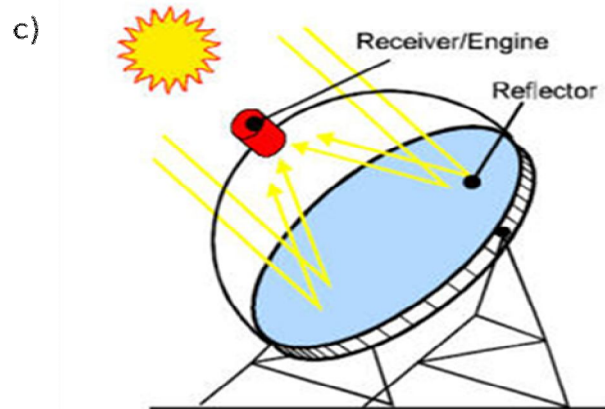


existen tres tipos de sistemas termosolares de generación de potencia eléctrica con concentración solar que han alcanzado un desarrollo significativo, los cuales son:

- a) Los sistemas de enfoque en línea, que concentran la radiación solar en tubos colocados a lo largo de la línea focal, por ejemplo a través de un canal parabólico reflejante. Figura 1.3a.
- b) Los sistemas de enfoque puntual tipo torre central, los cuales utilizan grandes campos de reflectores que siguen el movimiento aparente del sol (helióstatos) para concentrar la luz solar en un receptor colocado en la parte superior de una torre. Figura 1.3b.
- c) Los sistemas de enfoque puntual que utilizan platos o discos paraboloïdales para reflejar la radiación solar en un receptor colocado en el foco del concentrador. Figura 1.3c.

En la figura 1.3 se muestra un esquema de estos tres sistemas de concentración solar.





*Figura 1.3. Sistemas de concentración solar. La figura a) corresponde a un concentrador solar tipo canal parabólico de enfoque lineal, la b) corresponde a un concentrador tipo torre central y la c) corresponde a un concentrador tipo plato parabólico de foco puntual.*

En este trabajo se propone dividir los sistemas de concentración solar, de acuerdo a las capacidades de generación de energía eléctrica en dos grupos principales: los distribuidos del orden de los Watts a los Kilo-Watts eléctricos y los centralizados del orden de los Mega-Watts eléctricos.

### 1.3.1 Sistemas de concentración solar distribuidos

Los sistemas de concentración solar distribuidos son aquellos que pueden suministrar una cantidad de energía eléctrica del orden de los Kilo-Watts, suficiente para abastecer total o parcialmente la demanda de energía de un sistema específico, tal como el requerido para bombeo, iluminación ó refrigeración. Dentro de este tipo de sistemas de concentración solar se encuentran los siguientes:

#### a) Sistema plato Stirling.

Los platos Stirling utilizan espejos en forma de plato cóncavo parabólico que conforman el sistema de concentración solar y que en el foco de la parábola se ubica un motor Stirling acoplado con un generador eléctrico. Este sistema compuesto está montado en un sistema de seguimiento azimutal. En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de esta tecnología.

El motor Stirling es un motor térmico de combustión externa, el cual recibe la energía en un receptor que se encuentra en contacto térmico con el fluido de trabajo. Por lo tanto, la fuente externa de energía bien puede ser la radiación solar concentrada o cualquier otro tipo de fuente térmica. Esta tecnología ha demostrado tener los más altos niveles de eficiencia en la conversión de energía solar a potencia eléctrica de los sistemas termosolares con valores de 29.4% [Washom, 1984]. El tamaño del concentrador, lo determina la capacidad del motor Stirling. Si se considera un valor nominal máximo de insolación de  $1000 \text{ W/m}^2$  y una capacidad del motor Stirling de 25 kW, el diámetro del concentrador será de aproximadamente 10 m y con niveles de concentración de 2000 soles, alcanzando temperaturas del orden de  $700^\circ\text{C}$  en el absorbedor [SolarPACES, 2009].

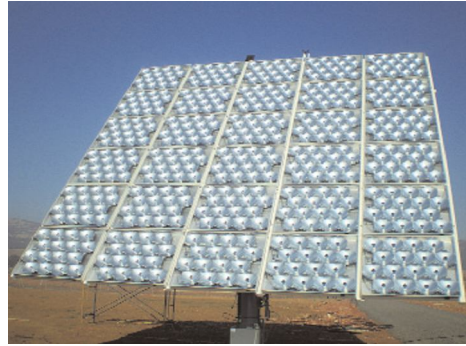


Figura 1.4. Fotografía de un concentrador dish Stirling (EURODISH, PSA).

#### b) Sistemas fotovoltaicos con concentración.

Los sistemas fotovoltaicos con concentración solar utilizan celdas solares de alta eficiencia, y por medio de un dispositivo de concentración solar, como los lentes de Fresnel, logran generar más energía eléctrica con menor cantidad de área y por lo tanto menor número de celdas solares [Kwangsun *et al.*, 2006].

En enero de 2009 el Instituto Fraunhofer anunció un record de 41.1% de eficiencia con una celda de  $5.09 \text{ mm}^2$  de triple unión, con un factor de concentración de  $454x$  (454 veces la radiación normal del sol) [Fraunhofer, 2009]. En la figura 1.5 se muestra un sistema fotovoltaico con concentración.



*Figura 1.5. Fotografía de un sistema fotovoltaico con concentración.*

Estas dos tecnologías transforman de manera directa la energía solar concentrada en potencia eléctrica, en el caso del plato Stirling se puede decir que esto se logra a través de un dispositivo mecánico que aprovecha el incremento de la temperatura en el receptor y en el caso de los fotovoltaicos se hace por medio de un dispositivo semiconductor que aprovecha el aumento de flujo radiativo. Tomando en cuenta las características de funcionamiento de estos dos sistemas de generación de potencia eléctrica, es que surge la idea de hacer una especie de combinación entre ambos sistemas, en este caso, se puede aprovechar el aumento de la temperatura en el receptor del sistema de concentración, pero en lugar de usar un dispositivo mecánico como el motor Stirling, se usaría un dispositivo semiconductor como en el caso de los fotovoltaicos, sólo que ahora el dispositivo sería un generador termoeléctrico que funciona por efecto Seebeck.

### **1.3.2 Sistemas de concentración solar centralizados**

Los sistemas de concentración solar centralizados son los que generan energía eléctrica del orden de Mega-Watts y que son capaces de cubrir la demanda de energía eléctrica de una región o comunidad; dentro de estos sistemas se encuentran los siguientes:

a) Sistema de concentración solar tipo canal parabólico.

Los sistemas de concentración solar tipo canal parabólico [A. Thomas, 1995] están conformados por la unión de varias líneas de tubos ubicados en el foco de los espejos con forma de canales parabólicos, en dichos tubos se calienta un fluido que se envía a intercambiadores de calor para que calienten agua y se transforme en vapor, capaz de mover las turbinas de los generadores eléctricos. En la figura 1.6 se muestra una imagen de este tipo de sistemas.



*Figura 1.6. Imagen de un sistema de concentración solar tipo canal parabólico.*

b) Sistema de concentración solar tipo torre central

Los sistemas de concentración solar tipo torre central [Akiba, 2000] consisten en conjuntos de espejos distribuidos alrededor de una torre, montados en estructuras que realizan un seguimiento solar aparente (helióstatos), los cuales reflejan la radiación solar a un receptor ubicado en la parte superior de la torre. En el receptor se calienta un fluido de alta concentración salina que se envía a varios intercambiadores de calor, en los que se calienta agua para convertirla en vapor y de esta forma puedan mover turbinas ensambladas a generadores eléctricos, obteniendo así energía eléctrica. En el receptor de estas torres se pueden alcanzar concentraciones de  $800\text{KW/m}^2$  con temperaturas de  $600\text{ C}$  [Romero et al., 2002]. En la figura 1.7 se puede observar esta tecnología.



*Figura 1.7. Imagen de un concentrador solar tipo torre central, en la que se puede observar el campo de heliostatos y la torre central.*



### c) Sistema de concentración solar tipo parque de plato Stirling

Los sistemas de concentración solar tipo parque de platos Stirling son la unión de varios platos Stirling individuales, que al sumar la generación de potencia eléctrica son capaces de generar capacidades del orden de los Mega-Watts. En la figura 1.8 se muestra una imagen de un parque de platos Stirling.



*Figura 1.8. Sistema de concentración solar tipo parque de platos Stirling.*

Después de describir brevemente y de manera general los sistemas de generación de potencia eléctrica a través de la concentración solar, se muestra un resumen de los trabajos que se han realizado en México.

En el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se han venido investigando varias tecnologías de concentración solar, en particular, se ha construido un dispositivo concentrador [Estrada, 1995] denominado DEFAC (*Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados*), con el fin de estudiar este tipo de tecnologías y sus aplicaciones. Al DEFAC se le han realizado las caracterizaciones dinámica y óptica [Grajeda, 1997; Quiñones, 1997] así como la térmica [Cruz, 1997].

#### **1.4 Concentrador solar de foco puntual en el CIE (DEFAC)**

El DEFAC es un concentrador solar de foco puntual, formado por tres grupos de 6 espejos cada uno, sumando en conjunto 18 espejos. Cada grupo de espejos tiene la misma distancia focal y cada espejo es de 30 cm de diámetro, 1.9 cm de espesor y una curvatura cóncava circular de 4 m de radio aproximadamente. Los espejos concentran la radiación solar en la zona focal que se localiza aproximadamente a 2.0 m de distancia del plano que soporta a los espejos [Estrada *et al.*, 1995]. La figura 1.9

muestra un esquema general donde se señalan las partes importantes del concentrador y la figura 1.10 presenta una fotografía del mismo.

El sistema cuenta con una montura de tipo ecuatorial, consistente en un marco principal y un marco hexagonal. El marco principal, soportado en dos bases piramidales por medio de dos chumaceras, puede girar sobre ellas en un eje que es paralelo al eje de la tierra, debido a que la inclinación del sistema es la misma que la latitud del lugar ( $18.5^\circ$  latitud norte). A su vez, el marco hexagonal está soportado por otras dos chumaceras al marco principal y puede girar en un eje perpendicular al anterior, de tal forma que permite el ajuste del concentrador a la declinación solar. Sobre este marco hexagonal se encuentran fijos los 18 espejos.

El área total de captación del concentrador solar con los 18 espejos es de  $1.274 \text{ m}^2$ . Los espejos proyectan la imagen solar al receptor que se encuentra aproximadamente a una distancia focal de  $2.0 \text{ m}$  de la base del marco hexagonal. Esta imagen solar es aproximadamente un círculo y se denomina “mancha solar” o “spot solar”, la cual tiene un diámetro de  $2.6 \pm 0.2 \text{ cm}$  [Quiñones, 1997 y Estrada, 1998].

Cabe mencionar que se realizaron algunas mejoras al sistema motriz del DEFAC, con lo que se logró reducir errores atribuidos al seguimiento del movimiento aparente del Sol. En el anexo A se explica en que consistieron estas modificaciones.

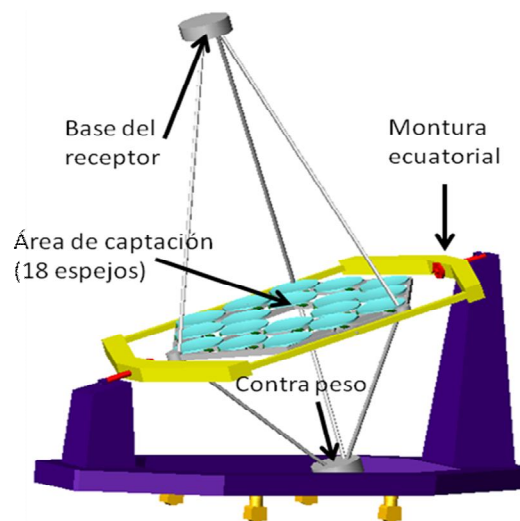


Figura 1.9. Diagrama del Dispositivo Experimental de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (DEFAC).



Figura 1.10. Fotografía del DEFRAC, tomada en la plataforma solar del CIE.

## 1.5 Calorímetro de placa plana CPP

En el DEFRAC se ha utilizado un calorímetro de placa plana [Jaramillo *et al.*, 2008] que tiene como función recibir el flujo radiativo solar concentrado y transferir el calor absorbido al fluido térmico, esto con la finalidad de conocer la cantidad de energía que incide sobre el receptor. Parte de esta energía es absorbida por la placa, elevando su temperatura, otra parte es reflejada. De la energía absorbida, parte es transferida por conducción a través de la placa hasta la cara interior, y de allí, por convección forzada al fluido refrigerante (agua). Otra parte de la energía absorbida se pierde al medio ambiente por transferencia de calor convectiva y radiativa desde la superficie exterior. La temperatura de la placa receptora se puede controlar con el flujo másico del fluido refrigerante. La figura 1.11 muestra el esquema del calorímetro de placa plana en operación. A este método de medición se le conoce como calorimetría de agua fría.



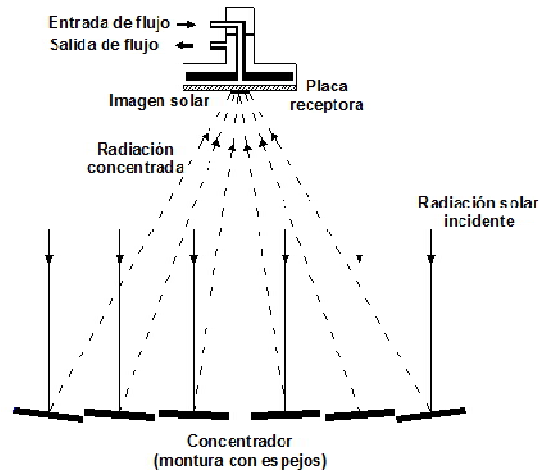


Figura 1.11. Esquema del calorímetro de placa plana en operación.

La técnica de calorimetría de agua fría que se ha venido implementando en el DEFRAC, ha resultado ser efectiva, ya que se ha podido determinar la potencia de concentración del DEFRAC. Sin embargo, también se ha podido demostrar, a partir de un estudio específico [Acosta *et al.*, 2001], que la condición de temperatura de placa receptora próxima a la temperatura ambiente no es correcta; se han determinado temperaturas de hasta de  $470^{\circ}C$  en el centro de la placa, con la energía concentrada por sólo 6 espejos, a pesar de manejar flujos másicos relativamente altos ( $1.11\text{ l/min}$ ) y tener incrementos de temperatura pequeños ( $\sim 5^{\circ}C$ ) entre la salida y la entrada de fluido al calorímetro. Al conocer la distribución de temperaturas en la placa, ha sido posible calcular las pérdidas convectivas y radiativas y éstas han resultado ser pequeñas, menores al 2.5 % [Acosta, 2001].

Tomando en cuenta el conocimiento que ya se tiene sobre el DEFRAC y sobre el calorímetro de placa plana, es que se plantea ahora la posibilidad de utilizarlos para generar energía eléctrica de manera directa, implementando un generador termoeléctrico. En la figura 1.12 se muestra el esquema de la integración de un dispositivo termoeléctrico en el DEFRAC y el calorímetro de placa plana, que en este trabajo se llamara intercambiador de calor de placa plana (ICPP).

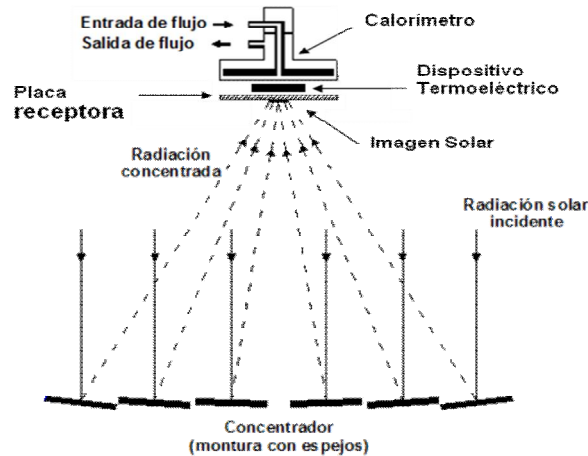


Figura 1.12. Sistema de generación de potencia eléctrica, integrado al sistema de concentración solar (DEFAC).

## 1.6 Descripción de un generador termoeléctrico

Existen en la naturaleza tres tipos de fenómenos termoeléctricos: el efecto Seebeck, el Peltier y el Thomson (Lord Kelvin), de los cuales los dos primeros son, hasta ahora, los de mayor aplicación.

En 1821, Johann Seebeck descubrió el efecto que hoy en día lleva su nombre, éste consiste en que al conectar dos alambres conductores de metales diferentes en forma de lazo y mantener las uniones a temperaturas diferentes, surge una corriente eléctrica. La observación de este hecho experimental convirtió a Seebeck en el descubridor de la termoelectricidad (que no es otra cosa que la conversión directa de calor en electricidad) a la que él llamó "termomagnetismo".

El efecto Peltier es el opuesto al Seebeck, esto quiere decir, que cuando circula una corriente eléctrica a través dos alambres conductores de metales diferentes unidos en sus extremos, se produce una diferencia de temperaturas entre estas uniones.

Actualmente los principales dispositivos en los que se aprovecha el efecto Seebeck y el Peltier, son: los termopares que se usan para la medición de temperaturas y las celdas termoeléctricas que pueden funcionar con cualquiera de los dos efectos. En el caso de estas celdas termoeléctricas usadas mediante el efecto Peltier, funcionan como sistema de refrigeración ya que una cara se convierte en un sumidero de calor al disminuir su temperatura, mientras que la otra cara de la celda eleva su

temperatura y las usadas mediante el efecto Seebeck, funcionan como generadores de potencia eléctrica.

Los módulos termoelectricos se construyen mediante el ensamblaje de pares semiconductores de diferente dopaje unidos por un conductor, que normalmente es cobre, entre dos cerámicas; éstas deben ser un buen dieléctrico y a la vez tener dureza mecánica, este arreglo tiene la característica de estar eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Hoy día, generalmente es utilizado el Bismuto-Telurio como material semiconductor, que consigue sus mejores eficiencias a temperaturas cercanas a los 250° C. Para la cerámica se utiliza alúmina ( $Al_2O_3$ ) que tiene una buena conductividad térmica [Anatychuk, 1994] [Gurevich, 1998] [Anatychuk, 1998]. En la figura 1.13 se muestra una celda termoelectrica.

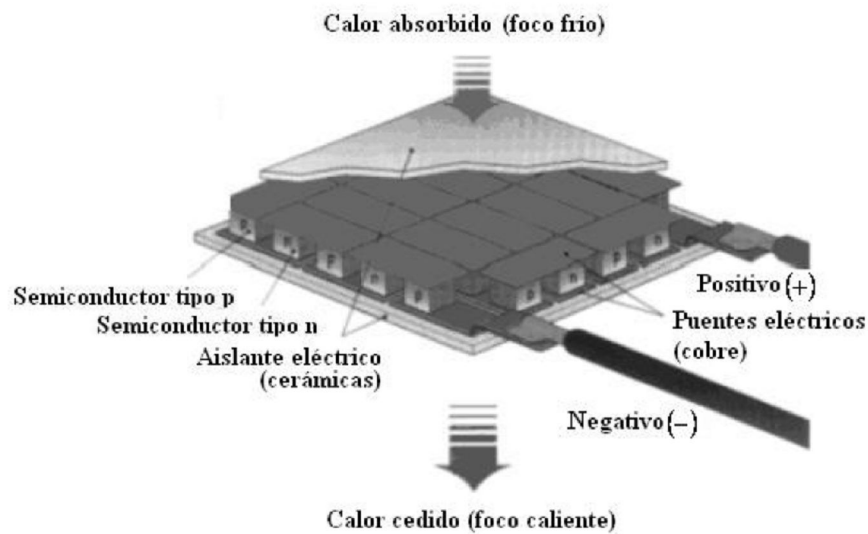


Figura 1.13. Esquema de una celda termoelectrica.

Dentro de las características de los semiconductores que se usan en la fabricación de las celdas termoelectricas, esta la figura de merito de cada material. La figura de merito es una característica del material semiconductor que determina la eficiencia del dispositivo termoelectrico. Para fines prácticos, se puede considerar que las propiedades físicas de los bloques de material semiconductor tipo N y tipo P de la celda termoelectrica, son iguales. Con esta consideración, la figura de merito  $Z$  se define como la relación entre el coeficiente Seebeck ( $s$ ), la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y la conductividad térmica ( $k$ ) del semiconductor, mediante la siguiente ecuación (ecuación 1.1):

$$Z = \frac{s^2 \sigma}{k} \quad 1.1$$

Por otro lado, el coeficiente Seebeck es la propiedad que tiene determinados materiales, de producir una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) por cada valor de diferencia de temperatura entre sus extremos, esta relación se describe mediante la siguiente ecuación (ecuación 1.2):

$$s = \frac{V}{T_h - T_c} \quad 1.2$$

Donde  $T_h$  se refiere a la temperatura más alta (cara caliente) y  $T_c$  a la más baja (cara fría). Para el caso del  $Bi_2Te_3$ , el valor del coeficiente de Seebeck es de  $s = 240 \mu V/K$ .

Para conocer de manera teórica la eficiencia ( $\eta$ ) de un generador termoeléctrico, se calcula mediante la siguiente ecuación (ecuación 1.3):

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad 1.3$$

Donde  $\bar{T}$  es la temperatura promedio entre la temperatura de la cara caliente  $T_h$  y la fría  $T_c$  y  $Z$  es la figura de merito.

Este tipo de celdas termoeléctricas, presentan una serie de ventajas en relación a otros sistemas de refrigeración y de generación de potencia eléctrica, entre las que se encuentran las siguientes:

1. Pueden aprovechar el calor proveniente de cualquier fuente térmica.
2. Son totalmente silenciosas y no producen vibraciones.
3. No necesitan mantenimiento.
4. No poseen elementos móviles.

5. Puede funcionar en cualquier posición.
6. Producen frío y calor indistintamente, invirtiendo la polaridad de la tensión aplicada.
7. Fácil variación de la potencia refrigerante, actuando sobre la tensión de alimentación.

Un generador termoeléctrico es un dispositivo compuesto por material semiconductor tipo N y tipo P conectados en serie, que transforma una diferencia de temperaturas en una diferencia de potencial o voltaje por efecto Seebeck [Rowe, 2006], en este trabajo se usó telurio de bismuto ( $Bi_2Te_3$ ) como elemento semiconductor. En la figura 1.14 se muestra el esquema de un generador termoeléctrico y su funcionamiento. Para lograr esa diferencia de temperaturas se usó para la cara caliente una placa de cobre que recibía la radiación solar concentrada del DEFRAC (fuente de calor), y la cara fría la proporcionó el ICPP, el cual sirvió como sistema de refrigeración (sumidero de calor); el generador termoeléctrico se integró en medio de ambas caras (cara caliente y cara fría) para formar así el sistema de generación eléctrica.

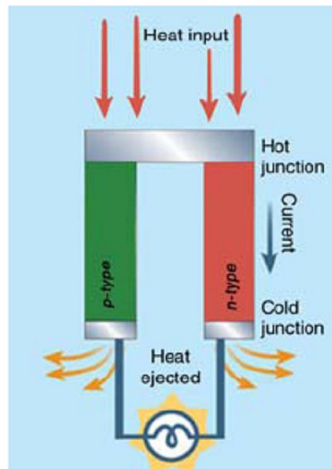


Figura 1.14. Esquema de un generador termoeléctrico y su funcionamiento.

## 1.7 Objetivo

El objetivo general de este trabajo fue la implementación, caracterización y análisis teórico-experimental de un generador de efecto termoeléctrico en un sistema de concentración solar de foco puntual.

Para cumplir esto, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- a) Rediseñar el sistema de seguimiento solar del DEFRAC, para reducir pérdidas atribuidas a este sistema.
- b) Encontrar la zona focal del concentrador más idónea para conseguir una distribución uniforme del flujo radiativo en el receptor.
- c) Elaborar el modelo teórico de la transferencia de calor que ocurre en el sistema de generación eléctrica (placa receptora, generador termoeléctrico y calorímetro de placa plana) y resolverlo.
- d) Realizar una campaña experimental en un medio controlado para caracterizar el sistema de generación eléctrica.
- e) Integrar al DEFRAC un sistema de generación eléctrica, usando una placa de cobre como receptor, un generador termoeléctrico y un calorímetro de placa plana como sumidero de calor.
- f) Realizar una campaña experimental en el DEFRAC, para caracterizar el sistema de generación eléctrica.
- g) Analizar resultados teóricos y experimentales.

## **1.8 Descripción de la tesis**

En este capítulo se presentó un breve resumen del panorama actual del consumo de energía a nivel mundial y los impactos ambientales que han provocado el uso de los combustibles fósiles para cubrir estas demandas de energía. Por otro lado se mencionaron las alternativas con las que se pueden satisfacer las necesidades energéticas, mediante el aprovechamiento de las energías renovables que tienen la ventaja de ser sustentables. En el caso particular de la energía solar es un recurso abundante y se puede aprovechar en gran parte del planeta. En este capítulo también se describieron los dispositivos con los que se puede aprovechar la energía solar en la generación de potencia eléctrica y se mencionaron algunos de los trabajos que se han realizado en el Centro de Investigación en Energía, siendo el de importancia para este trabajo el del DEFRAC y el del calorímetro de placa plana, de los que se hizo una descripción. Al final de este capítulo se presentaron los objetivos de ese trabajo de investigación.

En el capítulo 2 se presenta la simulación de la distribución de la radiación solar concentrada por el DEFARC a diferentes distancias focales tanto del receptor del sistema de generación eléctrica, como de la orientación de los espejos hacia las

---

diferentes ubicaciones del receptor. Esta simulación se hizo debido a que se necesitaba encontrar una distribución de flujo radiativo concentrado sobre el receptor lo mas uniforme posible dentro de un radio de 3 cm, ya que se requería de una distribución de temperaturas uniforme sobre la cara caliente del dispositivo termoeléctrico y esa distribución de temperaturas estaba directamente relacionada con la distribución de flujo radiativo concentrado. Por otro lado, se simuló el comportamiento de la transferencia de calor que ocurrió en el sistema de generación eléctrica para poder estimar las temperaturas que se alcanzarían en el dispositivo termoeléctrico, dependiendo de la potencia de entrada al sistema de generación eléctrica.

En el capítulo 3 se presenta la integración del dispositivo termoeléctrico al calorímetro de placa plana y se describe la instrumentación que se realizó para conocer los parámetros que describen el comportamiento del sistema de generación eléctrica y en particular el del dispositivo termoeléctrico. Por otro lado, en el capítulo 4 se presenta el diseño experimental, que se dividió en la caracterización del sistema de generación eléctrica en un medio controlado por medio de resistencias eléctricas con voltaje de alimentación variable y en un sistema de concentración solar de foco puntual (DEFAC).

En el capítulo 5 se presentan los resultados de las campañas experimentales con las que se caracterizó el sistema de generación eléctrica. Primero se presentan los resultados de los experimentos en el medio controlado y después los resultados en el sistema de concentración solar. Por otro lado, se presentan los resultados ópticos del sistema de concentración solar, obtenidos a partir de imágenes CCD tomadas al spot (mancha) solar, sobre la placa receptora. Al final de este capítulo se presentan los resultados térmicos obtenidos de las campañas experimentales en el medio controlado y en el DEFAC. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación.

## Capítulo 2

### Modelación del sistema

A continuación se menciona la metodología empleada para la modelación de la transferencia de calor en un sistema de generación eléctrica a través de una celda termoeléctrica, empleando como fuente térmica un flujo radiativo solar altamente concentrado. En este capítulo se describe el problema físico, seguido de la estimación de la distribución del flujo radiativo concentrado sobre la placa receptora, haciendo referencia al dispositivo de concentración solar de foco puntual denominado DEFRAC, para ello se empleó un método de trazado de rayos. Posteriormente se presenta el modelo de la transferencia de calor en el dispositivo, el cual se presenta en dos etapas: El modelo conductivo de las placas considerando únicamente el flujo conductivo a través de los diferentes materiales que representan el dispositivo termoeléctrico, y posteriormente se acopla tanto el problema conductivo y convectivo a través de un modelo de volumen finito resuelto en un software comercial denominado FLUENT. Al final se presentan los resultados de la modelación térmica del sistema de generación eléctrica.

#### 2.1 Problema Físico

Como se describió en el capítulo anterior una celda termoeléctrica requiere de una diferencia de temperaturas para producir una potencia eléctrica a través del efecto Seebeck, entre mayor sea dicha diferencia, mayor será la cantidad de energía generada, siempre y cuando no se lleguen a cambiar las propiedades físicas de los materiales de la celda, que modifiquen su funcionamiento [Rowe, 2006]. Para



lograr esto, se acopló la cara fría de la celda a un calorímetro de placa plana, el cual, hizo las veces de un sumidero de calor y la cara caliente se puso en contacto térmico con una placa de cobre empleada como fuente térmica. Para suministrar este flujo de calor, se consideró utilizar primero una fuente de calor controlada, a través del empleo de resistencias eléctricas y posteriormente la misma placa receptora se montó a un sistema de concentración solar, agregándole una superficie altamente absorbidora cuya función era la de captar la mayor cantidad de la energía recibida por el sistema de concentración solar, esta superficie tenía una absorptancia de  $a_s = 0.95$  (Pintura Zynolyte) [Ballestrin, 2003].

La fuente de calor controlada se integró con una parrilla eléctrica de potencia variable. La potencia eléctrica se transformaba en calor, el cual fluía y se distribuía de manera homogénea en la placa receptora (cara caliente). En la figura 2.1 se muestra un diagrama esquemático de esta fuente de calor controlada. Para lograr incrementos de temperatura a través de la resistencia y un equilibrio térmico entre la energía suministrada por la parrilla  $Q_{in}$  y la energía extraída por el calorímetro  $Q_c$ , fue necesario aislar térmicamente todo el conjunto, buscando reducir las pérdidas de calor por convección. Con ello se buscó que la mayor parte del calor fluyera a través del generador termoelectrico para ser removido después por el flujo de agua del ICPP. Con las características de este arreglo experimental se realizó una simulación previa a la experimentación, calculando así los valores de potencia térmica con los que se alcanzarían las temperaturas de operación del generador termoelectrico.

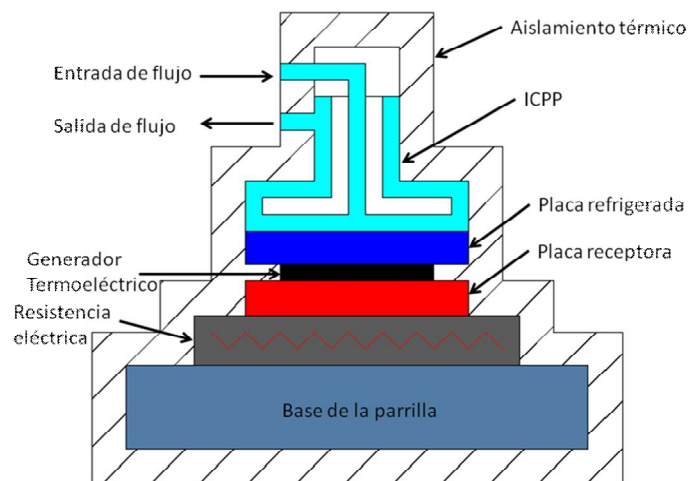


Figura 2.1. Diagrama esquemático de la fuente de calor controlada.

Por lo tanto, el arreglo experimental consistió en: el ICPP, el generador termoelectrico y la placa de cobre receptora, con lo cual se formó una especie de “sándwich”, quedando el generador termoelectrico en medio de las dos placas de cobre. Con este arreglo se produjo una transferencia de calor por conducción entre las placas de cobre y el generador termoelectrico, una transferencia de calor

por convección forzada entre la placa de cobre del ICPP y el flujo de agua de refrigeración. Por otro lado, en la placa de cobre que recibe el flujo de calor de la parrilla o del sistema de concentración solar de foco puntual denominado DEFRAC, se dio una transferencia de calor por contacto o por absorción de radiación, respectivamente.

Por otra parte, la distribución del flujo radiativo concentrado que se obtuvo en la placa receptora con el DEFRAC, dependía tanto de la distancia a la que se encuentra el receptor como de la orientación de los espejos, es por esto que se modeló con estos dos parámetros para evaluar una distribución de flujo radiativo lo más uniforme posible en un mancha solar (spot) que no excediera los  $3\text{ cm}$  de radio y en la que se encontrara la mayor cantidad del energía.

## **2.2 Evaluación de la distribución del flujo radiativo concentrado sobre la placa receptora**

Como ya se describió en el capítulo anterior, es necesario que se tenga una distribución de temperaturas uniforme tanto en la cara caliente como en la fría. Como la temperatura de la cara caliente está en función de la distribución de flujo radiativo, es necesario buscar que este flujo de radiación sea lo más uniforme posible, para lograr esto fue necesario modelar dicho flujo tanto del sistema de concentración como del receptor, para ello se empleó un método de trazado de rayos para evaluar la distribución en la placa receptora. El método de trazado de rayos permite evaluar la distribución del flujo radiativo incidente en el receptor de un sistema de concentración solar, y a partir de este cálculo, se determinó la potencia solar concentrada por el sistema.

El código CIRCE2 (*Convolution of Incident Radiation with Concentrator Errors*) es un programa de cómputo para el modelado del comportamiento óptico de concentradores solares del tipo de foco puntual de tres dimensiones. Este código fue desarrollado en los Laboratorios SANDIA [Romero, 1994], y usa métodos estadísticos y de trazado de rayos para evaluar la distribución direccional de los rayos reflejados desde cualquier punto dado de un concentrador. Conociendo las geometrías del concentrador y del receptor, la distribución angular de intensidad de los rayos incidentes y las imperfecciones del concentrador como rugosidad y desviaciones aleatorias de las pendientes de los espejos, el código determina la distribución de flujo radiativo y la potencia total incidente sobre el receptor. Este código se utilizó para determinar primero la distribución de flujo solar concentrado por el DEFRAC y después la potencia de concentración del sistema.

Los parámetros a modelar fueron: el área de concentración de  $1.274 \text{ m}^2$  distribuida en 18 espejos, con una distancia focal equivalente de  $2.024 \text{ m}$ . Considerando una radiación incidente de  $1000 \text{ W/m}^2$  y un error estimado como el producto de los errores de  $\sigma=0.65 \text{ mrad}$  en cualquier dirección [Pérez-Rábago, 2006]. Con estos parámetros de entrada se ejecutó el código CIRCE2 y se encontró que el nivel de concentración máximo fue de 4612.3 veces la radiación solar concentrada, mientras que la potencia máxima recibida fue de  $P_{ideal} = 1262.69 \text{ W}$ , y la potencia reflejada por los espejos fue  $P_{\rho} = 1161.67 \text{ W}$ . Por lo tanto, se estableció una eficiencia del concentrador del 92%, con una distribución circular homogénea, esta distribución se muestra en la figura 2.2 para diferente numero de espejos en función del radio del spot [Estrada *et al.*, 1998].

Se puede considerar que la imagen proyectada por el concentrador es un spot circular con un radio de  $1.5 \text{ cm}$ , en este círculo se concentra el 98% de la energía.

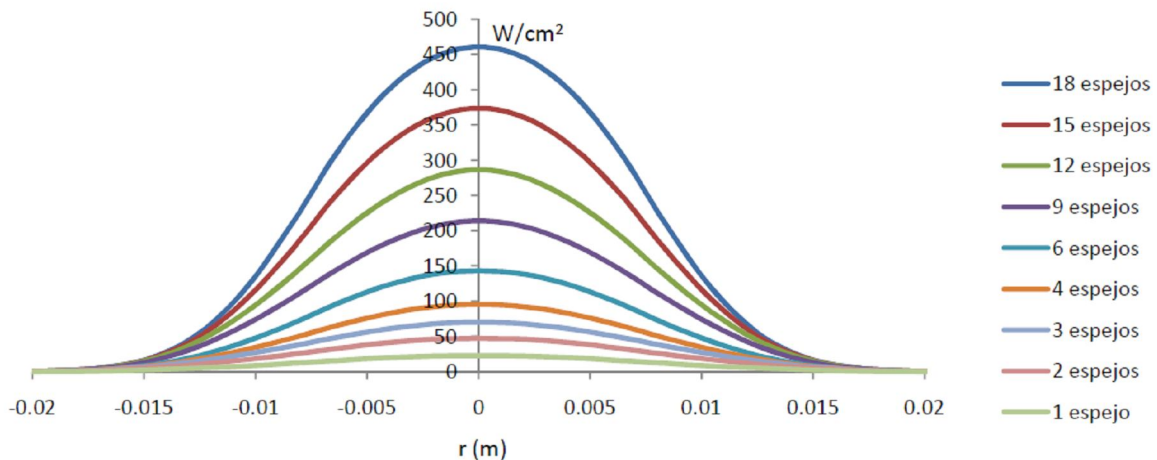


Figura 2.2. Distribución de flujo concentrado en un receptor circular Plano a diferentes cantidades de espejos del DEFRAC, obtenido con el código CIRCE2.

Estas distribuciones de radiación solar concentrada pueden aproximarse con una distribución normal (curva gaussiana) mediante la ecuación siguiente:

$$Q(r) = F_o \exp\left(-\frac{r^2}{2\mu^2}\right) \quad 2.1$$

Donde  $r$  es la distancia radial,  $F_o$  es el valor máximo de la distribución en  $r=0$ , y  $\mu$  es la desviación estándar de la distribución. Para cada cantidad de espejos se debe poner el valor correspondiente para  $F_o$ .

Esta modelación se hizo para la mayoría de las potencias que se pueden obtener con el DEFAC, dependiendo del número de espejos empleados en la concentración. En la tabla 2.1 se muestra los diferentes niveles de concentración y las concentraciones picos generadas por el DEFAC.

*Tabla 2.1. Concentración generada por el DEFAC dependiendo del número de espejos.*

Num. de espejos	Potencia concentrada (W)	Pico ( $W/cm^2$ )	Diámetro de Spot (cm)
18	1175.8	461.23	1.5
15	979.8	392.51	1.5
12	783.8	324.31	1.5
9	587.9	249.38	1.5
6	391.9	174.44	1.5
4	261.3	116.48	1.5
3	196.0	87.62	1.5
2	130.6	58.24	1.5
1	65.3	29.21	1.5

Conociendo estos datos, se buscó después una distribución más uniforme en un radio de  $3.0\text{ cm}$ , esto debido a que el dispositivo termoeléctrico quedaba circunscrito en una circunferencia de  $5.7\text{ cm}$  de diámetro. Para buscar esta distribución, sólo se modificó primero la distancia focal del receptor y posteriormente se reorientaron los espejos en dirección de la nueva ubicación del receptor para cada caso. Se consideró simular usando sólo 3 espejos del grupo A ya que se hizo la hipótesis de que con la potencia que estos dan es más que suficiente para alcanzar las temperaturas esperadas. En la tabla 2.2 se muestran las distancias con las que se hizo la modelación con el código CIRCE2.

*Tabla 2.2. Distancias focales del receptor con las que se calculo la distribución de radiación solar concentrada.*

Num. de espejos	Potencia concentrada (W)	Pico ( $W/cm^2$ )	Distancia del receptor (m)
3	196.0	87.62	2.024
		77.26	1.990
		27.61	1.960
		16.66	1.930
		9.00	1.900

En la figura 2.3 se muestra la grafica de las distribuciones de flujo radiativo concentrado sobre el receptor, variando únicamente la distancia focal de este.

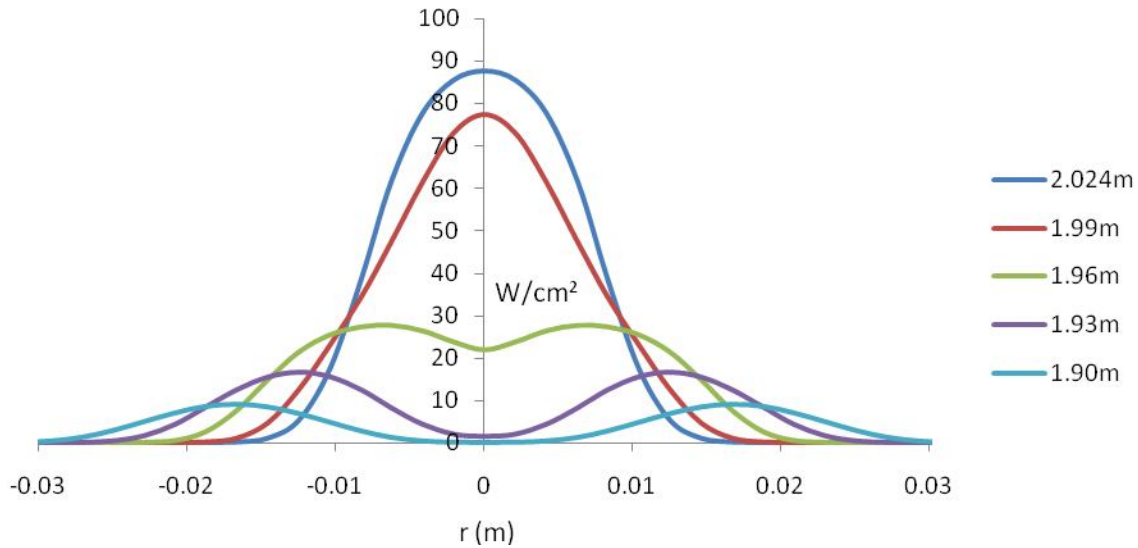


Figura 2.3. Distribución de flujo concentrado a diferentes distancias focales de un receptor circular con tres espejos del DEFRAC, obtenido con el código CIRCE2.

Posteriormente se modeló la distribución de la radiación solar concentrada sobre el receptor plano variando tanto la distancia focal del receptor como la orientación de los espejos hacia esa nueva distancia y usando únicamente 3 espejos del grupo A del DEFRAC. En la tabla 2.3 se muestran las distancias focales con las que se hizo la modelación.

Tabla 2.3. Distancias focales del receptor con las que se calculó la distribución de radiación solar concentrada.

Num. de espejos	Potencia concentrada (W)	Pico (W/cm <sup>2</sup> )	Distancia del receptor (m)
3	196.0	87.62	2.024
		85.59	1.900
		32.65	1.800
		13.82	1.700
		7.63	1.600
		4.91	1.500

En la figura 2.4 se muestra la gráfica de las distribuciones de flujo radiativo concentrado sobre el receptor, variando la distancia del plano del receptor y orientando la de los espejos hacia el centro del receptor, para que las imágenes coincidieran.

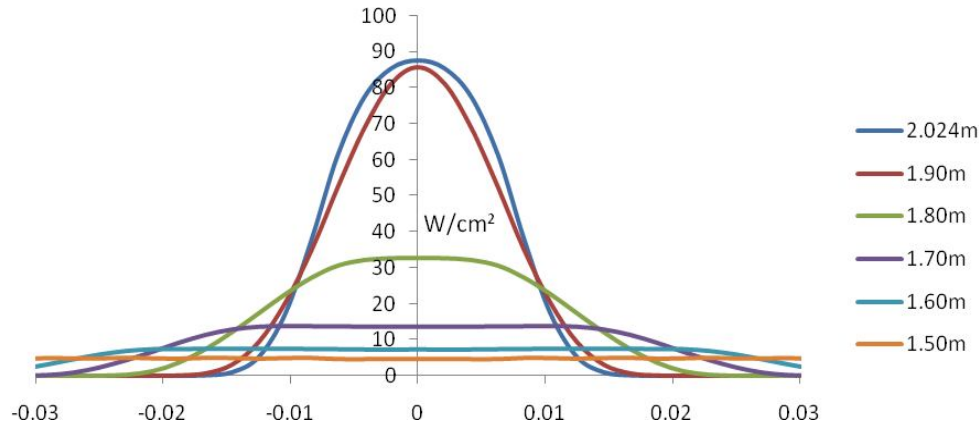


Figura 2.4. Distribución de flujo concentrado a diferentes distancias focales de un receptor circular con tres espejos del DEFRACT, orientando los espejos a cada distancia.

Se definió que la distancia del plano del receptor óptima para lograr una distribución uniforme de radiación en un spot con un radio de  $r = 3 \text{ cm}$ , fue de  $1.70 \text{ m}$ , la cual se muestra en la figura 2.5.

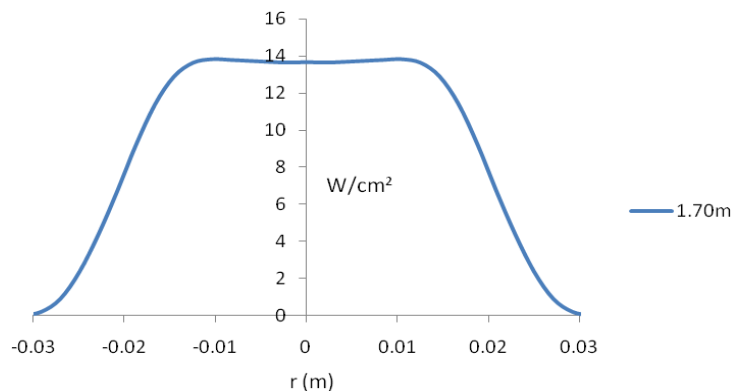


Figura 2.5. Distribución del flujo de radiación concentrada, ubicando el receptor fuera de foco (a  $1.70 \text{ m}$ ) del sistema de concentración, usando solo 3 espejos y orientándolos a esa distancia focal.

Esta distribución de radiación solar concentrada sobre el receptor, puede aproximarse mediante la ecuación siguiente:

$$Q(r) = \frac{F_o - R}{1 + \exp\left(\frac{r}{dr} - 10\right)} - R \quad 2.2$$

Donde  $R$  es el máximo valor del radio que para este caso correspondió al dato del CIRCE2 siendo  $r=0.0292m$  y  $dr$  es el incremento de cada valor del radio siendo  $dr=0.0021m$ . En la figura 2.6 se muestra la distribución de flujo radiativo concentrado y el ajuste de esta distribución aproximándolo con la ecuación 2.6.

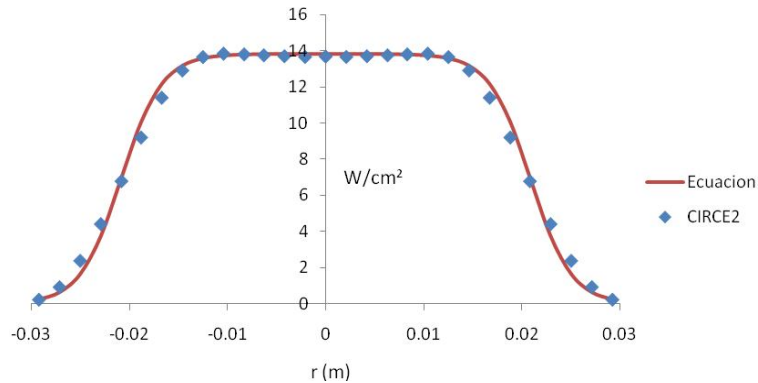
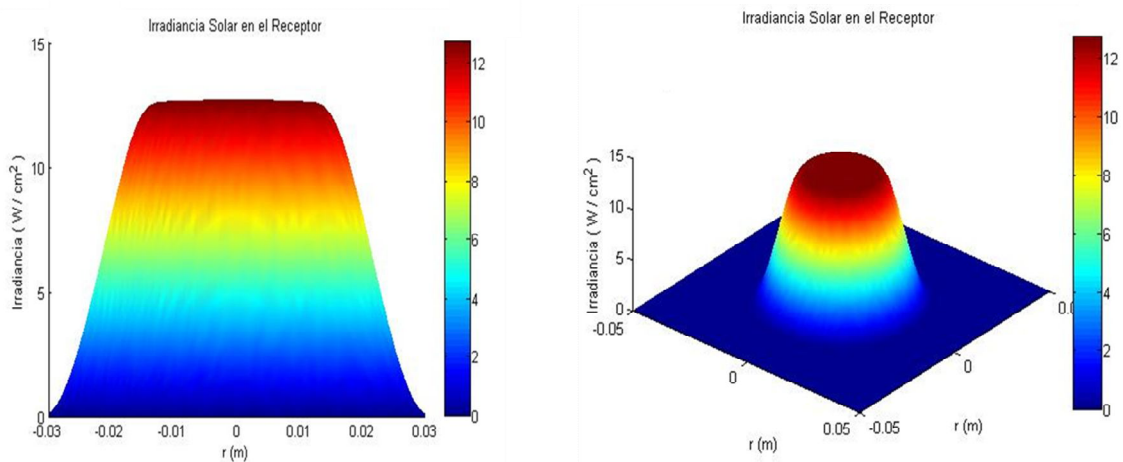


Figura 2.6. Distribución del flujo de radiación concentrada ajustado con una ecuación y los resultados de la simulación con CIRCE2.

Las distribución de flujo radiativo concentrado sobre el receptor ubicado a una distancia focal de  $1.70 m$  se modeló también mediante el código TONALLI que fue desarrollado en el Centro de Investigación en Energía [Riveros, 2008], para compararlo con el obtenido por el código CIRCE2. En la figura 2.7 se muestran los resultados de la modelación con el código TONALLI, el inciso a) corresponde a la imagen en 2D y el b) a la imagen en 3D.



a) Imagen de la modelación en 2D.

b) Imagen de la modelación en 3D.

Figura 2.7. Distribución del flujo de radiación concentrada modelado en código TONALLI a una distancia focal del receptor de  $1.70 m$ .

Comparando las modelaciones obtenidas con los dos códigos, se observó que coincidían tanto en la distribución como en los valores de intensidad de flujo radiativo concentrado. Ya con estos resultados obtenidos, se pasó a la modelación de la transferencia de calor que ocurre en el sistema de generación eléctrica.

### **2.3 Modelo teórico de la transferencia de calor en el sistema de generación eléctrica.**

Una parte muy importante de este trabajo de investigación fue modelar la transferencia de calor que ocurría en la celda termoeléctrica, para entender las distribuciones de temperatura de sus dos superficies, y así, evaluar los valores de potencia de entrada con los que se alcanzarían las temperaturas para las cuales fue diseñado este dispositivo termoeléctrico. La modelación se dividió en dos partes, la pura modelación conductiva bidimensional y en estado permanente y la modelación tridimensional acoplada a la remoción de calor convectivo por el flujo de agua de refrigeración del ICPP y en estado permanente.

#### **2.3.1 Modelo conductivo de las placas.**

Para poder entender mejor el fenómeno de la transferencia de calor que ocurría en el sistema de generación eléctrica, se desarrollo un esquema de este sistema en el que se describe la forma y ubicación de cada elemento, así como las condiciones de frontera que aplican para cada caso.

Debido a que la celda termoeléctrica tiene una forma compleja, se decidió simplificar su forma, obteniendo un sistema equivalente aproximado al real. Para lograr este sistema equivalente se consideraron las características que se describen a continuación:

Como la distribución del flujo radiativo concentrado se da en forma radial se emplearon coordenadas cilíndricas, por lo que fue necesario transformar el área efectiva de transferencia de calor del generador termoeléctrico, de coordenadas cartesianas a cilíndricas, y esto se logró considerando que el generador termoeléctrico está compuesto de varios cubos de  $Bi_2Te_3$  como se pueden ver en la figura 2.8, 128 tipo N y 128 tipo P, con forma cuadrada de  $0.0014\text{ m}$  en cada lado, teniendo un área efectiva de  $5.0176 \times 10^{-4}\text{ m}^2$ , así que para transformar esta área a su equivalente de forma cilíndrica se calculó el radio equivalente, por medio de la fórmula del área de un círculo y despejando la variable del radio ( $r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ ), dando un valor de  $r = 0.0126\text{ m}$ .

---



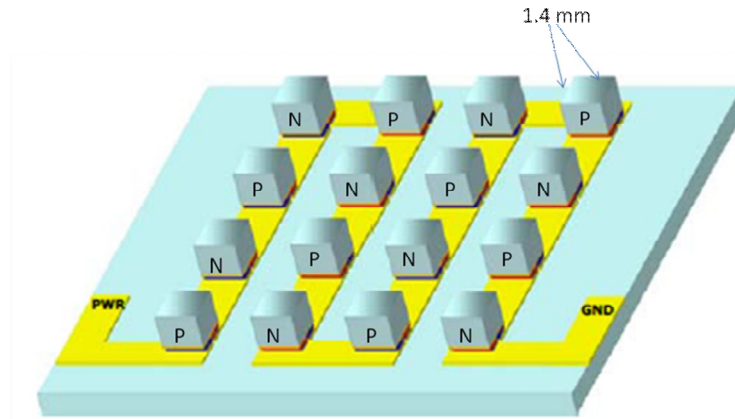


Figura 2.8. Se muestran los cubos de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  que forman el generador termoeléctrico.

Una vez que se definió el radio del área efectiva de la celda termoeléctrica, se ajustaron tanto las placas de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como la placa de cobre del sistema de enfriamiento a ese mismo radio, para que quedara el arreglo como una sola barra formada por la unión de varios materiales. En la figura 2.9 se muestra el esquema del sistema de generación eléctrica.

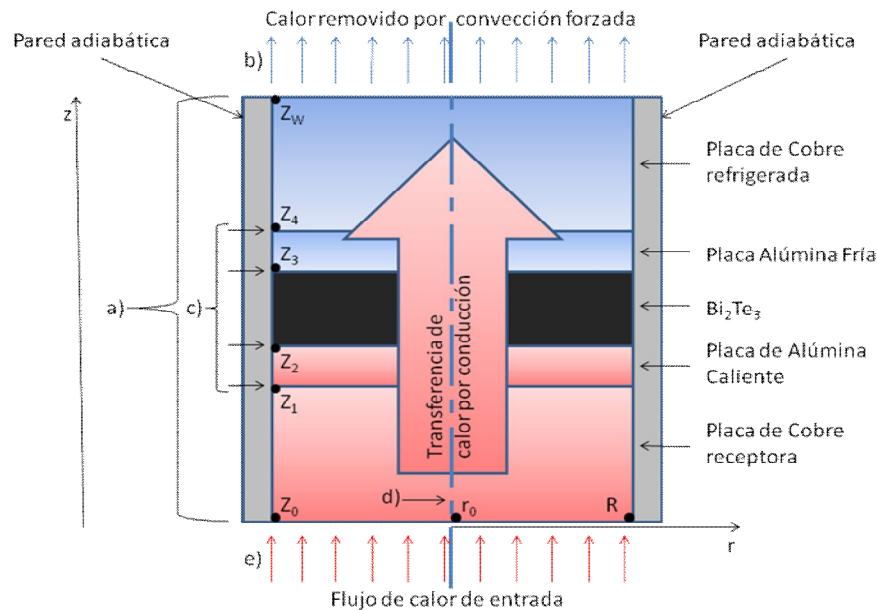


Figura 2.9. Esquema del sistema de generación, en el que se muestra la forma y ubicación de cada elemento, así como las condiciones de frontera.

Para conocer la distribución de temperaturas en sistema de generación eléctrica, se realizó un programa basado en el método de volumen finito, para lo cual, se usaron las ecuaciones generales de conservación de energía en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.3$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica,  $\dot{q}$  es el calor interno generado por el sistema,  $\rho$  es la densidad del material y  $c$  es el calor específico. Dentro de las consideraciones que se definieron fueron las siguientes: resolver las ecuaciones en estado permanente, además se consideró que no había generación interna y que la conductividad térmica para cada material era constante, así la ecuación se simplificó quedando de la siguiente manera:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 2.4$$

Expandiendo el primer término del lado izquierdo de la ecuación se reescribe de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 2.5$$

Ahora, como se consideró que la distribución de energía era uniforme angularmente, la ecuación se simplifico como sigue:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad 2.6$$

Cada inciso de la figura 2.9 indica una condición de frontera del sistema de generación eléctrica, las cuales se describen a continuación:

- a) La condición de frontera indica que en  $r = R$  y  $Z_0 \leq z \leq Z_w$ , se tiene una pared aislada térmicamente, por lo tanto se trata de una pared adiabática, lo que resulta que el flujo de calor entre dichas paredes y el exterior sea cero,

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad 2.7$$

- b) En el caso de la pared que está en contacto con el flujo de agua, la condición de frontera indica que el flujo de calor que se da por conducción es igual al flujo de calor que se da por convección en  $r_0 \leq r \leq R$  y  $z = Z_W$  y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$-k \left. \frac{\partial T_W}{\partial z} \right|_{z=Z_W} = h(T_W - T_F) \quad 2.8$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $T_W$  es la temperatura de la pared y  $T_F$  es la temperatura del fluido.

- c) Se consideró que la transferencia de calor por conducción en el primer material era igual a la del segundo material, la del segundo a la del tercero y así sucesivamente en todas las interfaces, esto para la dirección en  $Z$ . Esta consideración se hizo ya que al tener aislado térmicamente el contorno del sistema y por conservación de la energía, todo el calor recibido en la cara caliente, se transfería hasta la cara fría. Para el cambio de la temperatura con respecto al radio, se consideró una conductividad térmica promedio ( $k_p$ ) entre los dos materiales involucrados en cada interface. En la figura 2.10 se muestra un esquema con el que se explica las características de los nodos de orilla y después se presentan las ecuaciones con que se describe la figura.

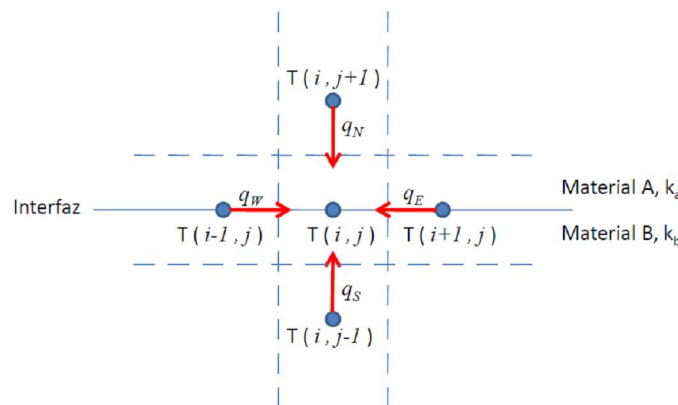


Figura 2.10. Esquema del volumen de control ubicado en las interfaces.

Con las siguientes ecuaciones, se representan las consideraciones que se tomaron para resolver los valores de las temperaturas ubicadas en las interfaces del sistema.

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial z} = -k_b \frac{\partial T}{\partial z} \quad 2.9$$

$$-k_p \frac{\partial T}{\partial r} = q_E, \quad -k_p \frac{\partial T}{\partial r} = q_W \quad 2.10$$

- d) Debido a que en el centro del cilindro se tiene el máximo de temperatura, se consideró que el flujo de calor en el eje de simetría era cero. Por lo que en ese punto se aplicó la misma ecuación 2.7 del inciso a), solo que en este caso es para  $r = r_0$  y  $Z_0 \leq z \leq Z_W$ .

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0 \quad 2.11$$

- e) Para la pared que recibe el flujo de calor de entrada ubicada en  $r_0 \leq r \leq R$  y  $z = Z_0$ , el flujo de calor por conducción es igual a la función de distribución de flujo de calor de entrada, la cual depende del radio.

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=Z_0} = F(r) \quad 2.12$$

Una vez que se definieron las ecuaciones que aplican en cada caso, se discretizaron de la manera siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T(i+1, j) - T(i-1, j)}{2\Delta r} \quad 2.13$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T(i, j+1) - T(i, j-1)}{2\Delta z} \quad 2.14$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{\Delta r^2} \quad 2.15$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T(i, j+1) - 2T(i, j) + T(i, j-1)}{\Delta z^2} \quad 2.16$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{i\Delta r} \quad 2.17$$

Sustituyendo estas ecuaciones discretizadas en la ecuación 2.6, se obtuvo una ecuación discretizada que puede resolverse por métodos numéricos, quedando de la siguiente forma:

$$\frac{T_{(i+1,j)} - 2T_{(i,j)} + T_{(i-1,j)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{i\Delta r} \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i-1,j)}}{2\Delta r} + \frac{T_{(i,j+1)} - 2T_{(i,j)} + T_{(i,j-1)}}{\Delta z^2} = 0 \quad 2.18$$

El único caso en el que fue necesario incluir los valores de la conductividad térmica de cada material, fue para las ecuaciones de los nodos ubicados en las interfaces, quedando la ecuación general de la siguiente forma:

$$k_p \left( \frac{T_{(i+1,j)} - 2T_{(i,j)} + T_{(i-1,j)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{i\Delta r} \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i-1,j)}}{2\Delta r} \right) + \frac{k_a T_{(i,j+1)} - 2k_p T_{(i,j)} + k_b T_{(i,j-1)}}{\Delta z^2} = 0 \quad 2.19$$

Con las ecuaciones 2.18 y 2.19, se definió la ecuación correspondiente para cada nodo de la maya del sistema, relacionando cada nodo con la condición de frontera que aplicaba en cada caso y despejando la variable  $T_{(i,j)}$  de cada ecuación. En la figura 2.11, se muestran los diferentes tipos de nodos para los que fue necesario encontrar la ecuación que describiera su comportamiento y en la tabla 2.4 se presentan a detalle las posiciones e intervalos de cada tipo de nodo.

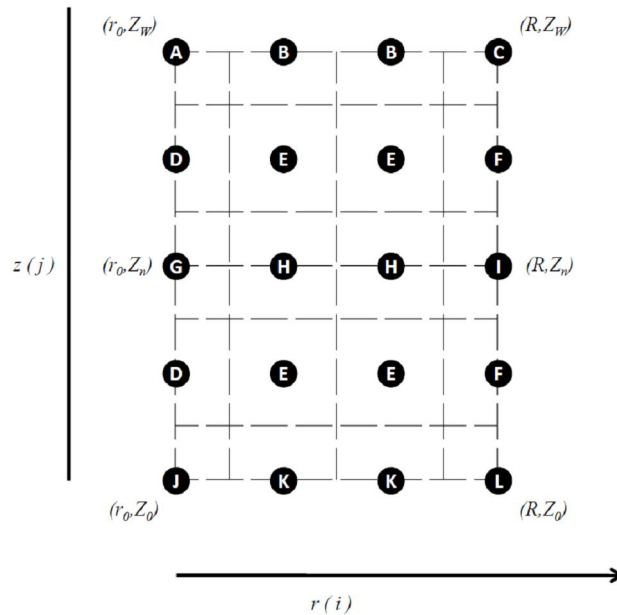


Figura 2.11. Esquema de los nodos del sistema.

Tabla 2.4. Descripción de los nodos del sistema.

Número	Descripción	Nomenclatura	Posición ó intervalo
1	Nodo esquina superior izq.	A	$(r_0, Z_w)$
2	Nodos orilla superior	B	$(r_0 < r_i > R, Z_w)$
3	Nodo esquina superior der.	C	$(R, Z_w)$
4	Nodos orilla izq.	D	$(r_0, Z_w < z_j > Z_n < z_j > Z_0)$
5	Nodos centrales	E	$(r_0 < r_i > R, Z_w < z_j > Z_n < z_j > Z_0)$
6	Nodos orilla der.	F	$(R, Z_w < z_j > Z_n < z_j > Z_0)$
7	Nodo orilla izq. en interfaz	G	$(r_0, Z_n)$
8	Nodos centrales en interfaz	H	$(r_0 < r_i > R, Z_n)$
9	Nodo orilla der. en interfaz	I	$(R, Z_n)$
10	Nodo esquina inferior izq.	J	$(r_0, Z_0)$
11	Nodos orilla inferior	K	$(r_0 < r_i > R, Z_0)$
12	Nodo esquina inferior der.	L	$(R, Z_0)$

Con las ecuaciones que describen las características que tiene cada nodo de la maya del sistema, y las consideraciones de simplificación del sistema real, se diseñó un programa en MatLab para conocer la distribución de temperaturas en cada nodo del sistema de generación eléctrica. En la tabla 2.5 se presentan las propiedades físicas de los materiales.

Tabla 2.5. Propiedades físicas de los materiales del sistema de generación eléctrica.

Numero	Descripción	Material	$k$ (W/mK)	Espesor (mm)	Radio (mm)
1	Placa de cobre refrigerada (Cara fría)	Cobre	401	5.0	12.6
2	Placa de alúmina (Cara fría)	Alúmina	25	1.0	12.6
3	Telurio de Bismuto ( $Bi_2Te_3$ )	$Bi_2Te_3$	2.5	2.0	12.6
4	Placa de alúmina (Cara caliente)	Alúmina	25	1.0	12.6
5	Placa de cobre receptora (Cara caliente)	Cobre	401	4.0	12.6

Los parámetros de entrada que se usaron para los casos de los incisos *a*, *c* y *d* de las condiciones de frontera, se tomaron de la tabla 2.5, para el caso del inciso *b*, se consideró un valor para el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada de  $h=1000$  W/m<sup>2</sup>K y una temperatura del fluido  $T_F=295$ K y para el caso del inciso *e*, se consideró una potencia de 137W con una distribución completamente uniforme sobre la placa receptora.

Tomando en cuenta las simplificaciones que se hicieron y tratando de mejorar la modelación, se buscaron alternativas con las que se lograra simular de manera mas precisa el sistema de generación eléctrica, por lo que se buscó un software comercial, especializado en la modelación del fenómeno de transferencia de calor tanto por conducción como por convección, así como la simulación del comportamiento de la mecánica de los fluidos. El software que se escogió fue el FLUENT.

### 2.3.2 Modelo de transferencia de calor a través de CFD (en FLUENT).

Aprovechando las ventajas que brinda el FLUENT, se diseño un modelo del sistema de generación más parecido al real, considerando los tamaños reales de las placas de cobre. Para el caso del generador termoeléctrico se usó el mismo criterio que se definió en la simulación en MatLab calculando el área efectiva equivalente en coordenadas cilíndricas, quedando un radio de 0.0126 m.

Otro detalle que se agregó al modelo, fue la placa de metal que une los cubos de telurio de bismuto ( $Bi_2Te_3$ ) tanto en el lado de la cara caliente como en el de la fría. En la tabla 2.6 se muestran las características y dimensiones con las que se creó el dibujo en GAMBIT y en la figura 2.12 se muestran como fueron ensamblados los elementos, así como las referencias que se presentan en esa tabla.

Tabla 2.6. Características del dibujo en GAMBIT

Num	Descripción	Material	$k$ (W/mK)	Espesor (mm)	Radio (mm)
1	Placa de cobre refrigerada (Cara fría)	Cobre	387.6	5	30
2	Placa de alúmina (Cara fría)	Alúmina	25	0.7	12.6
3	Placa metálica de unión (Cara fría)	Cobre	387.6	0.2	12.6
4	Telurio de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	2.5	1.8	12.6
5	Placa metálica de unión (Cara caliente)	Cobre	387.6	0.2	12.6
6	Placa de alúmina (Cara caliente)	Alúmina	25	0.7	12.6
7	Placa de cobre receptora (Cara caliente)	Cobre	387.6	4	30

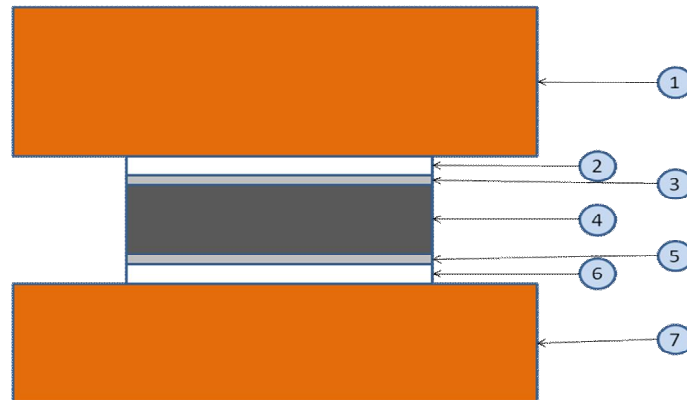


Figura 2.12. Diagrama para las referencias de la tabla 2.6

En este modelo se simuló también el comportamiento del flujo de agua que baña la placa de cobre del calorímetro, ingresando al programa un valor de flujo másico de  $0.63 \text{ l/min}$ . En la figura 2.13 se muestra la malla creada en GAMBIT en la que se definieron las características del modelo.



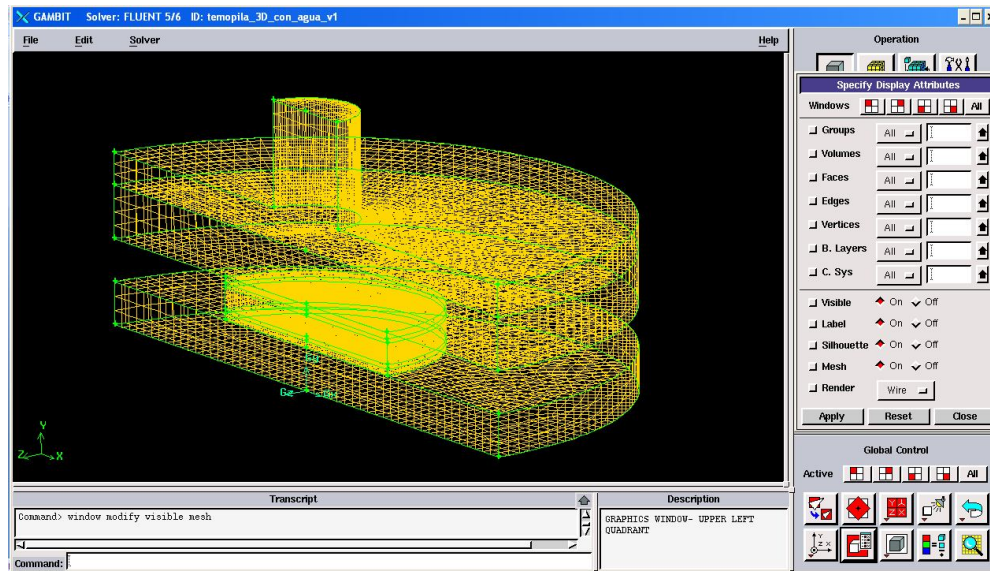


Figura 2.13. Se muestra la malla creada en GAMBIT.

Igual que para la simulación en MatLab, fue necesario definir en FLUENT las condiciones de frontera que aplican en cada situación. En la figura 2.14 se muestra un esquema del sistema de generación eléctrica en el que se describen las condiciones de frontera.

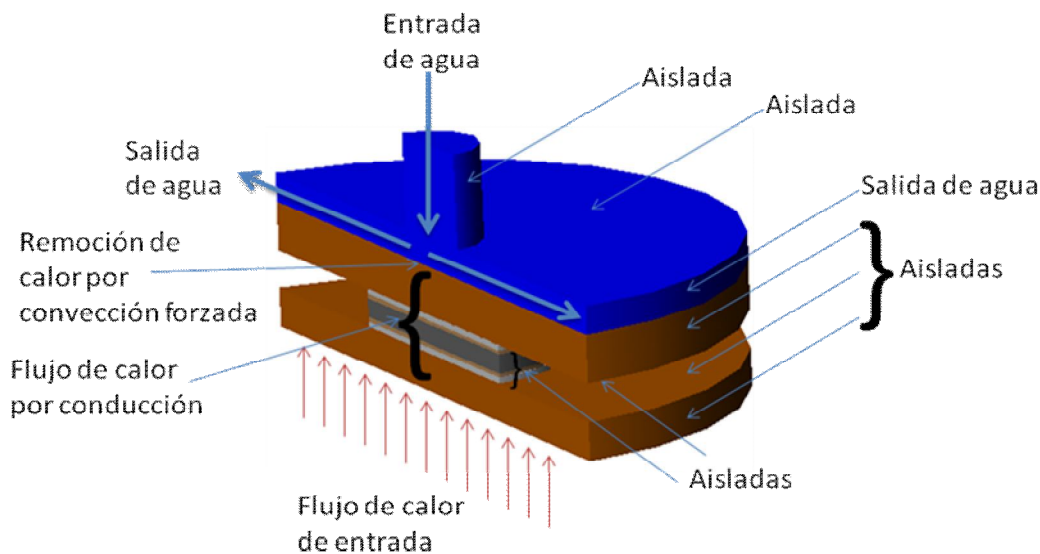


Figura 2.14. Diagrama del sistema de generación eléctrica, en el que se describen las condiciones de frontera que aplican en cada caso.

En las condiciones de frontera se considero que todo el calor suministrado a la placa receptora, fluía a través del dispositivo termoelectrico para ser removido por la convección forzada del sistema de refrigeración.

## 2.4 Resultados de la modelación térmica del sistema de generación termoeléctrico

En este subtema se presentan los resultados de la simulación, tanto la de MatLab como la de FLUENT. En estos resultados se puede observar que se obtuvieron valores de temperaturas similares con cada modelo en ambas caras del generador termoeléctrico.

### 2.4.1 Resultados del modelo conductivo de las placas

En la figura 2.15 se muestra la imagen de la distribución de temperaturas que se obtuvo en la simulación con MatLab, así como los datos de la temperatura del fluido de refrigeración  $T_f$ , el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  y la potencia de entrada  $Q_{in}$ .

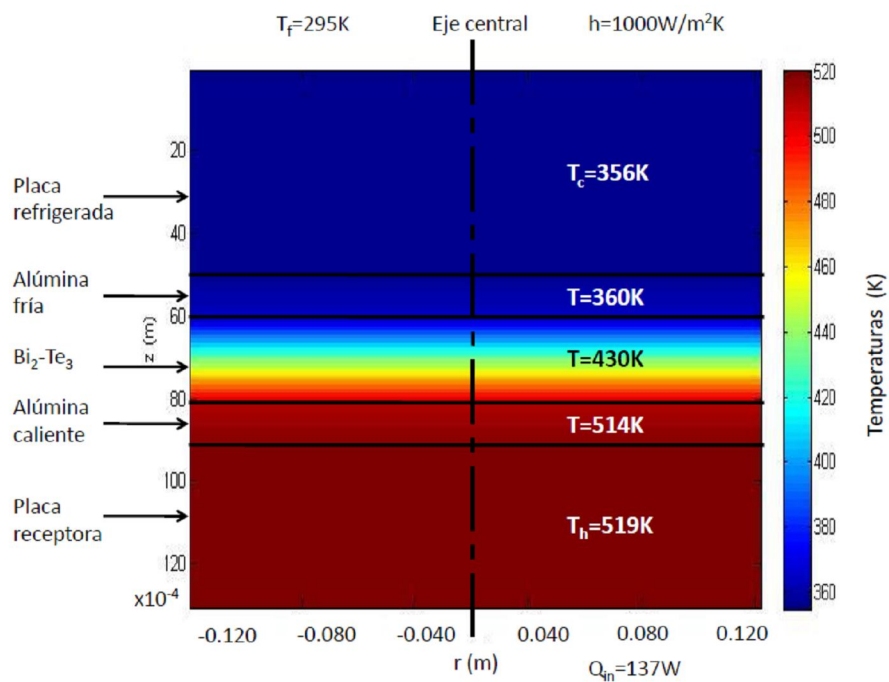


Figura 2.15. Imagen de la distribución de temperaturas en las placas de cobre y el dispositivo termoeléctrico, obtenidos del modelo en MatLab.

En la imagen de la figura 2.15 se muestran las temperaturas en la mitad de cada material y en el eje central del sistema. Estas temperaturas se obtuvieron considerando una potencia de entrada de  $137 W$  que representa el 70 % del total de la potencia incidente con 3 espejos, ya que se estimó que se tendrían pérdidas

del 30 % y el valor de  $h$  fue de  $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  por tratarse de un flujo de convección forzada y fue el parámetro de ajuste en la modelación.

#### 2.4.2 Resultados del modelo de transferencia de calor a través de CFD

Los resultados obtenidos para la simulación en FLUENT permitieron interpretar de manera más clara lo que se esperaba obtener en la campaña experimental ya que el modelo es más parecido al real.

En la figura 2.16 se muestra una imagen de los resultados de las temperaturas obtenidas en todo el sistema de generación eléctrica, siendo los valores de las temperaturas de la cara caliente ( $T_h = 498.85 \text{ K}$ ) y de la fría ( $T_c = 348.65 \text{ K}$ ) del dispositivo termoeléctrico los más importantes ya que son las que determinan la diferencia de temperatura con las que se logra producir el efecto Seebeck y la generación de potencia eléctrica. En este caso el valor de potencia térmica de entrada fue igual que en el caso anterior, es decir el 70 % del total de la radiación incidente en la placa receptora por 3 espejos del DEFRAC, quedando en  $137 \text{ W}$ .

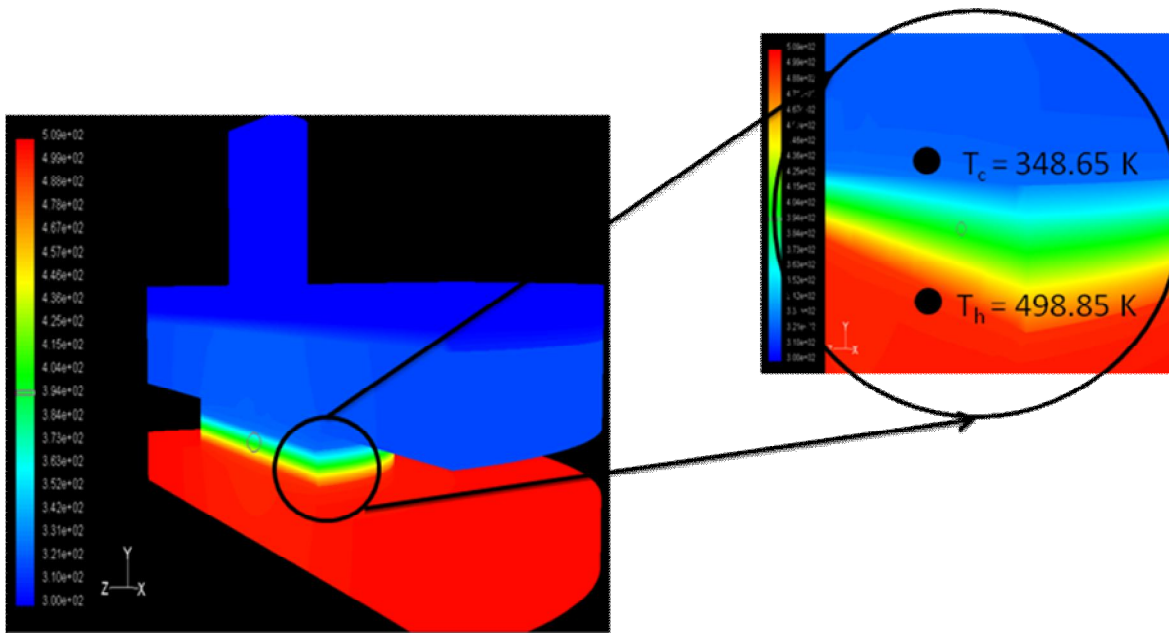


Figura 2.16. Imagen de la distribución de temperaturas simulado en FLUENT

En la figura 2.17 se muestra la distribución del flujo de agua que baña la placa de cobre del calorímetro.

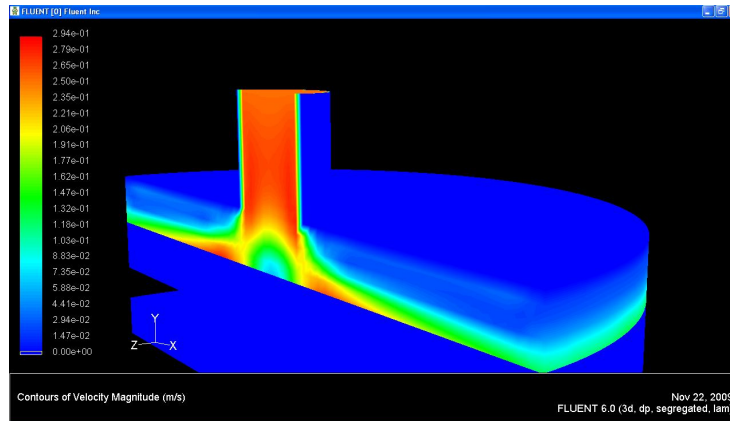


Figura 2.17. Imagen de la distribución del flujo de agua que refrigera la placa de cobre del calorímetro.

Como se puede observar en la imagen de la figura 2.15, la distribución de velocidades del fluido refrigerante, se dio de manera uniforme angularmente, con lo que espera que se bañe toda la superficie de la placa refrigerada.

Después de que se tuvieron los resultados de las modelaciones realizadas en MatLab y en FLUENT, se comenzó con la parte del diseño experimental en el medio controlado y posteriormente en el sistema de concentración solar de foco puntual.

## Capítulo 3

# Montaje experimental, instrumentación y diseño de experimentos

En este capítulo se describen los elementos que componen el arreglo experimental empleado para la caracterización del sistema de generación eléctrica a través de la celda termoeléctrica, su integración al ICPP y todos los elementos empleados para la instrumentación de los experimentos.

### 3.1 Montaje de la celda termoeléctrica en el ICPP

Como se mencionó anteriormente, para que el dispositivo termoeléctrico genere electricidad, es necesario que exista una diferencia de temperaturas entre sus dos caras, para lograr esto, se utilizó un calorímetro de placa plana como sumidero de calor y un concentrador solar de foco puntual o una resistencia eléctrica como fuente de energía, en contacto con ambas caras de la celda termoeléctrica. Al ensamblar el ICPP, el dispositivo termoeléctrico y una placa de cobre con una superficie receptora, la cual actúa como receptor del calor suministrado por las fuentes, se conforma la base del sistema de generación eléctrica. El sistema de generación eléctrica está compuesto de los siguientes elementos:

- a) Celda termoeléctrica en modo de efecto Seebeck.

El módulo termoelectrico es un conjunto de semiconductores sólidos de telurio de bismuto ( $Bi_2Te_3$ ) tipo N y tipo P, conectados en serie, un tipo N seguido de un tipo P, unidos por una placa metálica y estructurados en un emparedado de alúmina, el cual le permite estructura mecánica y actúa como aislante eléctrico. En la figura 3.1 se muestra el dispositivo o módulo termoelectrico.

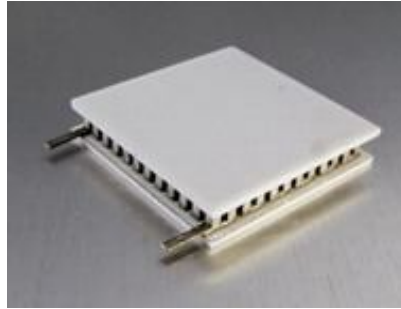


Figura 3.1. Imagen de un dispositivo termoelectrico de  $Bi_2Te_3$ .

b) Intercambiador de calor de placa plana ICPP.

El ICPP está formado por una base con dos orificios, uno de entrada y el otro de salida del agua de refrigeración, un difusor el cual distribuye el agua desde el centro hacia las periferias del ICPP de forma radial, una placa de cobre y un soporte de unión de nylon entre la placa y la base, el cual aísla térmicamente a la placa plana del cuerpo del ICPP. En la figura 3.2 se muestra el ICPP.

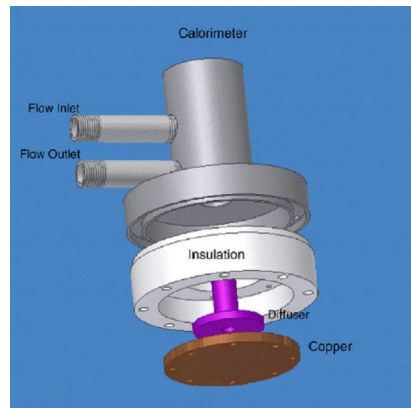


Figura 3.2. Esquema del ICPP.

c) Placa receptora.

La placa receptora es de cobre con un radio de  $35\text{ mm}$  y un espesor de  $4\text{ mm}$ . Para el caso del experimento en el DEFRAC, esta placa, se pintó en una de sus

caras de color negro mate, con pintura Zynolyte de alta temperatura, la cual presenta una absorptividad en el espectro solar del 95%. Esta cara es la que quedo expuesta a la radiación solar concentrada.

d) Bomba de refrigeración.

La refrigeración del ICPP se realizó con agua a través de un sistema constituida por una bomba de corriente alterna de  $\frac{1}{2}$  hp (1 hp es una unidad de potencia y es igual a 746 W), la cual fue controlada por un variador de frecuencia que le permitía regular el caudal de refrigeración al regular la velocidad de la bomba. El calorímetro y el sistema de refrigeración se conectaron mediante mangueras de  $\frac{3}{8}$ ' de diámetro y conexiones rápidas de bronce. En la figura 3.3 se muestra un esquema del sistema de refrigeración usado en la campaña experimental.

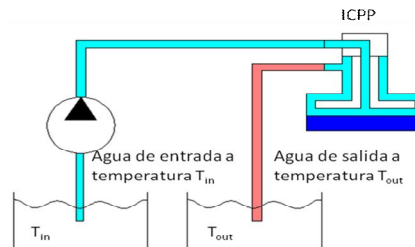
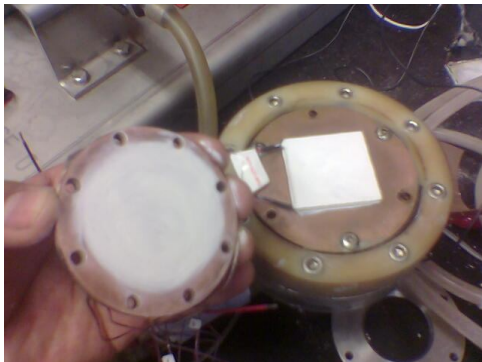
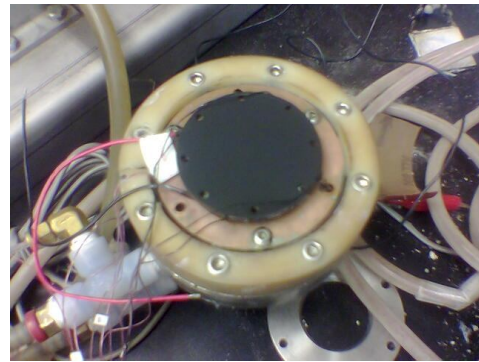


Figura 3.3. Esquema del sistema de refrigeración usado en los experimentos.

En la figura 3.4 se muestran la secuencia de imágenes de la forma cómo se integró el dispositivo termoelectrico, el ICPP y la placa receptora, formando un emparedado, garantizando que existiera un buen contacto térmico entre cada uno de los elementos.



a) Se aplicó un silicón conductor térmico y se colocó la placa receptora.



b) Se muestra el sistema ensamblado.

Figura 3.4. Imágenes de la integración del sistema de generación eléctrica.



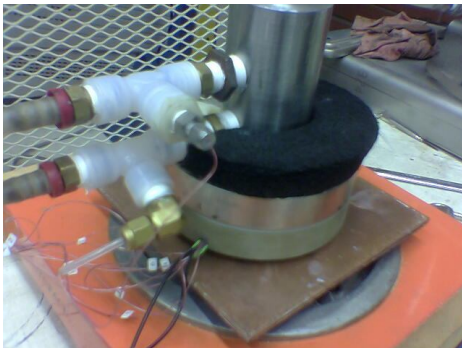
Para mejorar el contacto térmico entre ambas placas de cobre y las dos caras del dispositivo termoelectrico se uso un silicón con una alta conductividad térmica, especial para estos propósitos (*TECHSPRAY, Heat Sink Compound 1978*).

### 3.2 Montaje del generador termoelectrico y el elemento calefactor

La caracterización con el elemento calefactor se logró utilizando como fuente de calor una resistencia eléctrica, controlada por un transformador de corriente alterna variable (*variac*), lo cual permitió regular el voltaje de alimentación a la resistencia y con ello la potencia de calor suministrada a la celda termoelectrica.

Para integrar la celda termoelectrica y la resistencia eléctrica, se colocó entre ambos elementos una placa de cobre, de  $4\text{ mm}$  de espesor, para distribuir el calor recibido por la resistencia lo más homogéneamente posible, esto se logro debido a que los coeficientes de conducción y difusión térmica del cobre son de los más altos que se pueden conseguir comercialmente ( $k = 401\text{ W/mK}$ ,  $\alpha = 1.17 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ ) [Incropera, 2006]. De esta manera se suministro la energía térmica a la placa caliente de la celda termoelectrica necesaria para incrementar su temperatura y con ello generar un potencial eléctrico.

Una vez que se integró la celda termoelectrica al elemento calefactor, se aísló el exterior de ambos componentes del sistema incluyendo a la resistencia eléctrica, con una fibra de vidrio, la cual presenta una muy baja conductividad ( $0.038\text{ W/m}^2\text{K}$ ) [Incropera, 1999] y posteriormente, todo el conjunto se forró con papel de aluminio. En la figura 3.5 se muestra como se ensamblaron los elementos y como quedo aislado todo el sistema en el medio controlado.



a) Integración del sistema de generación y la resistencia eléctrica.



b) Medio controlado con aislamiento térmico.

Figura 3.5. Imágenes del medio controlado.



### 3.3 Diseño de experimentos

Una vez integrado la celda termoeléctrica al calorímetro y a la resistencia eléctrica se hicieron pruebas de toda la instrumentación y posteriormente se hicieron pruebas del funcionamiento de todos los equipos. Con ello se definieron las características de los experimentos a realizar.

- a) Caracterización de la celda termoeléctrica con el elemento calefactor.

Tomando en cuenta trabajos similares realizados anteriormente en los que se caracterizó el comportamiento de los dispositivos termoeléctricos [Palacios, 1998] [Rowe, 1988], con ello se definieron los parámetros a analizar y así compararlos con los obtenidos en trabajos anteriores. Los datos que se buscaron obtener con los experimentos fueron los siguientes:

- a) Distribución de temperaturas en la cara caliente.
- b) Distribución de temperaturas en la cara fría.
- c) Curvas voltaje-corriente de la respuesta de la celda termoeléctrica a diferentes niveles de potencia de calor incidente.
- d) Curvas de eficiencia.

Las temperaturas tanto en la cara caliente como en la cara fría se obtuvieron directamente de los termopares ubicados en las placas de cobre del sistema de generación.

Para conocer la curva voltaje-corriente de la celda termoeléctrica se realizaron una serie de experimentos para conocer el comportamiento del dispositivo termoeléctrico a diferentes valores de carga, manteniendo fijos los valores de voltaje de alimentación a la parrilla y de caudal de agua en el calorímetro.

Los parámetros que definieron el comportamiento del sistema fueron: potencia de alimentación a la parrilla, caudal de agua en el calorímetro y tiempo entre cada experimento. La potencia se definió que fuera constante con un valor de 42 W, para valores de carga resistiva entre 0 y 1 M  $\Omega$ , con un caudal de 0.63 l/min, y un tiempo de 30 minutos en cada prueba. Esta serie de experimentos se repitieron 5 veces para comprobar que fueran reproducibles, es decir que se pudieran repetir obteniendo valores similares en cada experimento.

La siguiente campaña experimental que se hizo fue para conocer el

---

comportamiento del dispositivo termoelectrico a diferentes valores de potencia de alimentación y así determinar la curva de eficiencia tanto del dispositivo termoelectrico como del sistema completo. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros y valores que se definieron para la campaña experimental en la que se buscó conocer el comportamiento de la eficiencia del sistema para diferentes valores de potencia de entrada y temperaturas de operación, en cada caso se midió el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito.

Con base a los experimentos realizados para determinar la curva voltaje-corriente en los que se definió trabajar con  $42\text{ W}$  de alimentación a la parrilla, se encontró que la corriente y el voltaje medidos para esta potencia de alimentación era de  $1.4\text{ A}$  y  $30\text{ V}$  respectivamente. A partir de estos valores se determinó que para esta nueva campaña experimental se variaría  $0.5\text{ A}$  la corriente de alimentación a la parrilla eléctrica, partiendo de  $1\text{ A}$  y llegando a  $3.5\text{ A}$ , esperando obtener una potencia de entrada máxima de  $260\text{ W}$  aproximadamente, que era un valor cercano a usar 4 espejos del DEFRAC.

*Tabla 3.1. Valores de potencia de entrada para conocer la curva de eficiencia en el medio controlado.*

<b>Prueba</b>	<b>Caso (carga eléctrica)</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Caudal (l/min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	corto circuito	22	0.63	30
2	circuito abierto			30
3	corto circuito	48		30
4	circuito abierto			30
5	corto circuito	86		30
6	circuito abierto			30
7	corto circuito	134		30
8	circuito abierto			30
9	corto circuito	192		30
10	circuito abierto			30
11	corto circuito	260		30
12	circuito abierto			30

Después de realizar estas series de experimentos en el medio controlado, se obtuvo información que permitió entender mejor el funcionamiento del sistema, por lo que se pasó a la siguiente etapa de los experimentos. La segunda etapa de experimentos consistió en probar el funcionamiento del sistema de generación eléctrica integrado al DEFRAC.

### 3.4 Montaje del generador termoeléctrico en un sistema de concentración solar (DEFAC)

Una vez que se comprobó que el modelo teórico corresponde al fenómeno real en el medio controlado, se procedió a integrar el sistema de generación eléctrica a un sistema de concentración solar de foco puntual DEFAC.

El sistema de generación eléctrica se ubicó en la zona focal del sistema de concentración solar, quedando la placa receptora a una distancia de  $1.70\text{ m}$ , de acuerdo al trazado de rayos que se realizó previamente.

El sistema de generación eléctrica se instaló en la zona focal del DEFAC sujetándolo directamente a una base que permitía el ajuste de la distancia focal y luego sujetando esta base a la base superior del DEFAC por medio de un tubo de  $\frac{3}{4}$ ". Posteriormente se sujeto la base del sistema de generación a los brazos que soportan la base superior del DEFAC. En la figura 3.6 se muestran imágenes de cómo se sujetó el sistema de generación eléctrica.



*Figura 3.6. Imagen de cómo se instaló el sistema de generación eléctrica en el DEFAC.*

Para lograr que la placa receptora quedara alineada con el eje central del sistema de concentración se usó un láser y para que quedara perpendicular a este se usaron niveles. En la figura 3.7 se muestra un esquema de cómo quedó alineado el sistema de generación eléctrica.

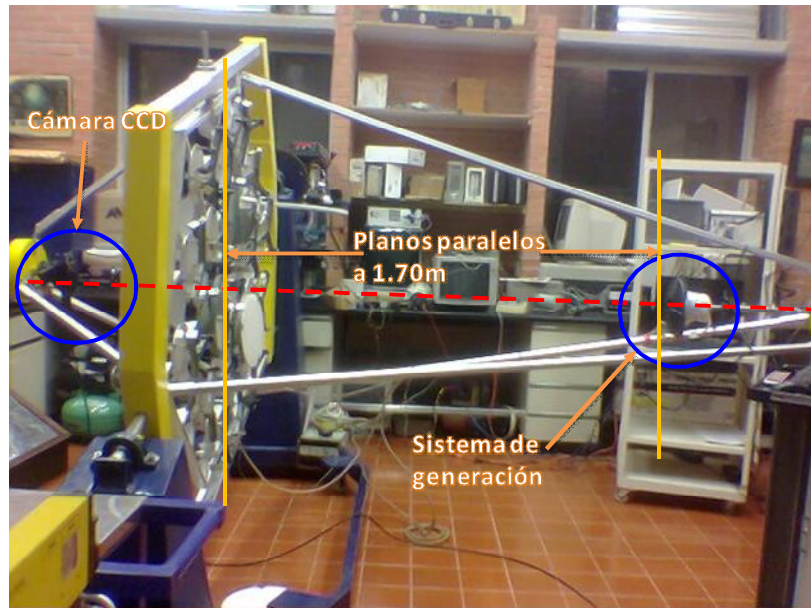


Figura 3.7. Esquema de la alineación del sistema de generación eléctrica, el conjunto de espejos concentradores y una cámara CCD.

### 3.5 Experimentos con la celda termoelectrica y el DEFAC

Los experimentos que se programaron para la caracterización del sistema de generación eléctrica integrado en el DEFAC, se hicieron con parámetros similares a los utilizados en el medio controlado, sólo que en este caso el control de la potencia de entrada se hacía con la cantidad de espejos utilizados. Cada espejo suministraría una potencia aproximada de  $70\text{ W}$  siempre y cuando se tuvieran valores de radiación solar directa cercanos a los  $1000\text{ W/m}^2$ .

Al igual que en la campaña experimental realizada en el medio controlado, se programó conocer las temperaturas en la cara caliente y fría del generador, la curva voltaje-corriente, la curva de eficiencia del dispositivo termoelectrico y del sistema en conjunto.

Los parámetros que se definieron para conocer el comportamiento de la curva voltaje-corriente en los experimentos realizados en el DEFAC fueron: potencia de entrada, definida por la cantidad de espejos utilizados, caudal de agua en el calorímetro y tiempo entre cada experimento. La cantidad de espejos fue de 4, para valores de carga resistiva entre  $0$  y  $1\text{ M}\Omega$ , con un caudal de  $0.63\text{ l/min}$ , y un tiempo de  $30$  minutos en cada prueba.

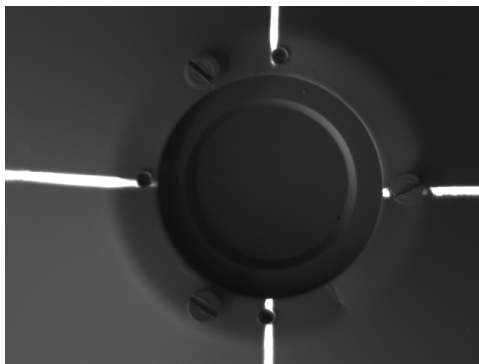
La siguiente serie de experimentos que se programaron fueron para conocer el comportamiento del sistema de generación eléctrica variando la cantidad de espejos utilizados. Con esta serie de experimentos se obtuvieron los valores de la curva de eficiencia. En la tabla 3.2 se muestran los parámetros que se definieron para encontrar la curva de eficiencia.

Tabla 3.2. Valores para conocer la curva de eficiencia en el DEFRACT.

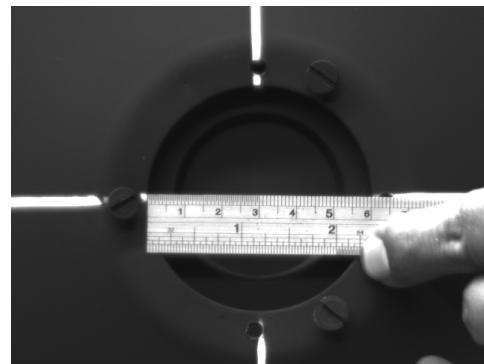
Prueba	Caso	Número de Espejos	Caudal (l/min)
1	Corto circuito	1	0.63
2	Circuito abierto		
3	Corto circuito	2	
4	Circuito abierto		
5	Corto circuito	3	
6	Circuito abierto		
7	Corto circuito	4	
8	Circuito abierto		

Otra parte muy importante en los experimentos fue la de conocer la distribución real de la radiación solar concentrada sobre la placa de cobre receptora. Para lograr esto, se instaló una cámara CCD que tomaba las imágenes de la mancha solar formada por la concentración solar sobre la placa receptora del sistema de generación. La cámara se instaló en la base inferior del DEFRACT y se alineó con el eje central del sistema de concentración y el sistema de generación eléctrica como se observó en la figura 3.7.

Para poder relacionar la imagen captada por la cámara, se instaló una lámina alrededor de la placa de cobre receptora y se dibujó sobre la lámina un plano coordenado como se muestra en la figura 3.8.



a) Plano coordenado



b) Dimensionamiento de la imagen.

Figura 3.8. Imágenes del plano coordenado en la placa receptora del sistema de generación.

Para la caracterización térmica de la celda termoeléctrica fue necesario instalar

una serie de sensores y transductores, con los cuales se midieron los siguientes parámetros:

- La potencia radiativa incidente a través de la medición de la radiación solar directa ( $G_b$ ).
- Determinar las temperaturas de ambas caras de la celda termoeléctrica, así como su distribución y la temperatura de entrada y salida del fluido refrigerante del calorímetro de placa plana ( $T_n$ ).
- La medición del flujo másico del caudal de agua empleado para la refrigeración del calorímetro de placa plana.
- El cálculo de la potencia eléctrica generada por la celda termoeléctrica mediante las mediciones de voltaje y corriente producidos por la misma.

A continuación se describe la instrumentación de los dispositivos con los que se midieron estos parámetros, así como sus características.

### 3.6 Instrumentación del sistema

Para conocer la distribución de temperaturas tanto en la cara caliente como en la cara fría de la celda termoeléctrica, se instrumentaron las placas de cobre del sistema, con una serie de termopares *tipo T* calibre 30 a diferentes distancias, distribuidos de manera radial y con la misma distribución en ambas placas, del centro a la periferia ( $r = 0, 12.5, 17.5$  y  $20$  mm). En la figura 3.9 se muestra la placa receptora y la del calorímetro, indicando las ubicaciones de los termopares.

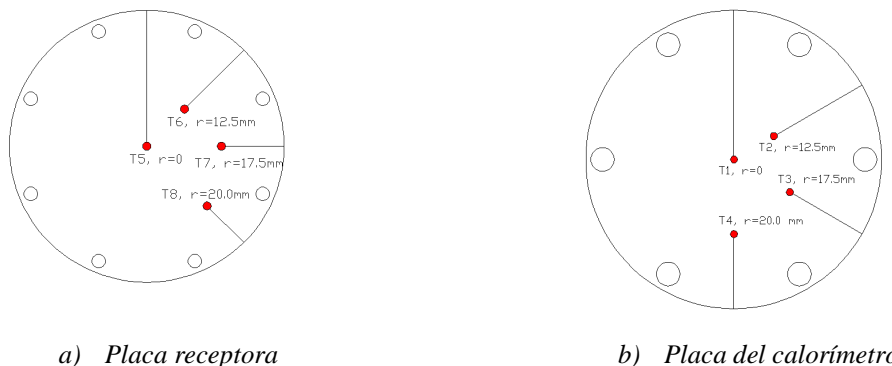


Figura 3.9. Ubicación de los termopares en las placas de cobre.

Por otra parte, se instrumentaron la entrada y la salida del flujo de agua del

calorímetro colocando termopares *tipo T* en el centro de la tubería a través de una conexión T, esto para conocer los incrementos de temperatura del agua y con ello hacer un balance calorimétrico para determinar la potencia térmica que paso por la celda termoeléctrica. Todos los termopares se calibraron antes de ser instrumentados en los puntos donde se tomaron las mediciones, utilizando un pozo de calor calibrado previamente, sacando la curva de ajuste de cada termopar.

Además de las mediciones de temperatura, se instrumentó con un medidor de flujo (caudalímetro) para medir el flujo de agua de refrigeración del calorímetro y así junto con los datos de temperatura de entrada y salida del agua se calculó la cantidad de calor transferida al agua por efecto de la convección forzada. El caudalímetro utilizado funciona a través de una turbina que esta acoplada a un sensor infrarojo que registra la frecuencia de giro del eje, este dispositivo es de la marca JLC (*IR-Opflow Type2*). Esta señal, se convirtió después en el flujo másico mediante una constante de proporcionalidad. Para obtener esta constante de calibración, se midió el tiempo que tardaba el flujo de agua proveniente de la bomba, en llenar un recipiente con un volumen de 1 litro. Esta calibración se hizo varias veces para un mismo valor de flujo y posteriormente para diferentes, es decir, primero se mantuvo fija la velocidad de la bomba y se midió varias veces el tiempo que tardaba en llenarse el recipiente con 1 litro de agua y posteriormente se repitió este procedimiento para diferentes velocidades de operación de la bomba. Una vez medido el tiempo que tardaba en llenarse el recipiente, se comparaba con el valor de frecuencia recibido del flujómetro. Como existió una relación lineal entre el tiempo de llenado y el valor de frecuencia, fue posible obtener esta constante de proporcionalidad.

Todos los termopares y el caudalímetro se conectaron a un adquisidor de datos y este a su vez se comunicó con una computadora. En la computadora se podían observar en tiempo real los parámetros medidos y al mismo tiempo se almacenaban en un archivo para poder analizarlos después.

El software usado fue el "*BenchLink DataLogger*". El adquisidor de datos utilizado era de la marca "*Agilent, modelo 34970A*", con una tarjeta modelo "*34901A*".

Además de la instrumentación instalada para medir el flujo másico y las temperaturas, se conectaron las terminales del dispositivo termoeléctrico al adquisidor en las entradas diseñadas para medir el voltaje y la corriente.

Para poder conocer la potencia eléctrica generada por el dispositivo termoeléctrico, fue necesario medir el voltaje y la corriente en circuito abierto, en

---

corto circuito y con diferentes cargas resistivas.

En el caso de los experimentos en el medio controlado, fue necesario medir el voltaje y la corriente de alimentación a la parrilla eléctrica para conocer la potencia de entrada al sistema. Para medir el voltaje, se conectó en paralelo el canal de entrada de la tablilla del adquisidor al contacto de alimentación de la parrilla. Para medir la corriente se utilizó un amperímetro de gancho digital con una precisión de  $\pm 2\%$ , esto se debió a que el canal de medición de corriente eléctrica del adquisidor, solo podía medir corrientes menores a  $1.2\text{ A}$ .

En el caso de los experimentos del concentrador de foco puntual fue necesario conocer la radiación solar directa y para medirla se usó un pirheliómetro que también estaba conectado al adquisidor de datos, tomando lecturas cada segundo. En la figura 3.10 se muestra la imagen del pirheliómetro utilizado en los experimentos.



*Figura 3.10. Imagen del pirheliómetro usado en los experimentos.*

Un pirheliómetro es un dispositivo que mide la radiación solar directa ( $G_b$ ), es decir la radiación solar que incide sobre una superficie que siempre es perpendicular a la posición del Sol. En la figura 3.11 se muestra un esquema referente a la radiación solar directa, en este caso, cuando el ángulo theta ( $\theta$ ) es cero, los rayos del Sol son normales a la superficie receptora del pirheliómetro y es cuando se puede medir este parámetro.



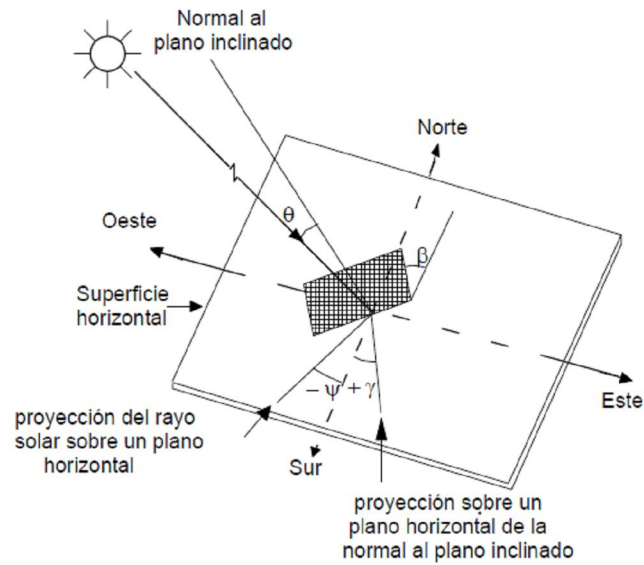


Figura 3.11. Esquema de la radiación solar con respecto a una superficie receptora.

En el capítulo siguiente se presentan todos los resultados obtenidos en las campañas experimentales, primero los del medio controlado y después los del DEFAC, en los que se muestran tanto los resultados de la caracterización del sistema de generación eléctrica como los de la distribución de la radiación solar concentrada sobre la placa receptora.

## Capítulo 4

### Resultados experimentales y análisis

Una vez que se realizaron los experimentos, fue necesario sintetizar, depurar y analizar todos los datos para conocer los resultados del comportamiento del dispositivo termoeléctrico y del sistema en general, para ello, se realizó una verificación de los resultados experimentales frente a las modelaciones presentadas en el capítulo 2. Posteriormente se realizó un análisis de los resultados para hacer una caracterización de las celdas termoeléctricas, con y sin concentración solar. A continuación se presentan los resultados de los experimentos tanto en el medio controlado como en el sistema de concentración solar.

#### 4.1 Resultados en el medio controlado

De acuerdo con los experimentos desarrollados en el proceso de caracterización del sistema de generación en un medio controlado, se presentan los resultados de esos experimentos, así como la comparativa con los resultados obtenidos en la simulación.

Para conocer los valores medidos definitivos en cada experimento, fue necesario conocer el tiempo que tardaba el sistema de generación eléctrica en llegar al estado permanente. Para definir el transitorio del sistema de generación eléctrica, se desarrollo un experimento que duró hasta que se estabilizo el valor de la

temperatura registrada por el termopar ubicado en el centro de la placa receptora ( $T_5$ ) y el de la placa refrigerada ( $T_1$ ), partiendo de la temperatura de equilibrio inicial, que era la del ambiente ( $T_a$ ), y con una potencia de entrada fija,  $Q_{in} = 22 \text{ W}$ . En la figura 4.1 se muestra la grafica del comportamiento del transitorio en el medio controlado.

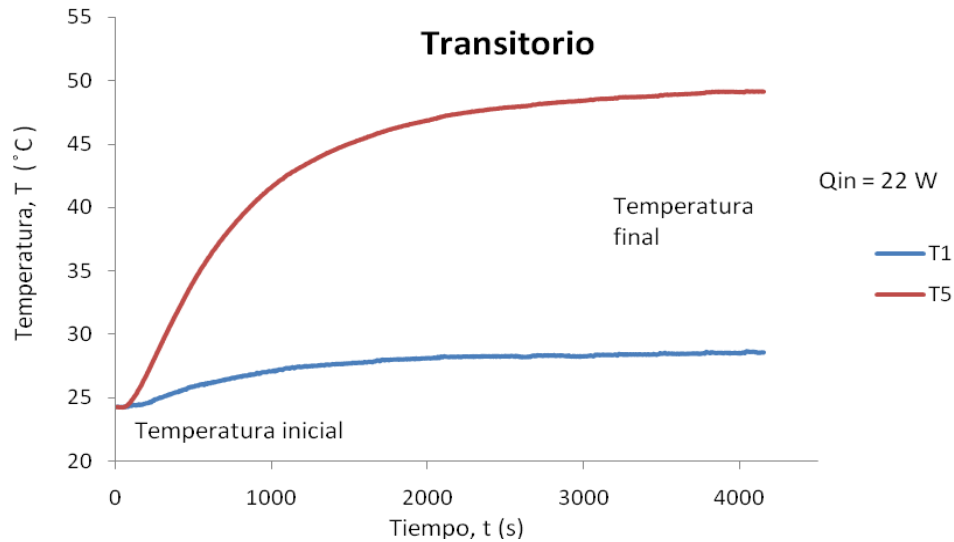


Figura 4.1. Grafica del comportamiento del transitorio en el medio controlado.

La grafica del comportamiento del transitorio mostrado en la figura 4.1 puede aproximarse mediante la ecuación siguiente:

$$Transitorio(t) = (T_{final} - T_{inicial}) \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) + T_{inicial} \quad 4.1$$

Donde ( $t$ ) es el tiempo en segundos y ( $\tau$ ) es el tiempo de respuesta del sistema de generación eléctrica, integrado al medio controlado, el cual fue de 875 segundos.

Con esta función que describe el transitorio, se determinó el tiempo que duraría cada experimento hasta que se alcanzara aproximadamente el 95% de la temperatura en estado permanente de la placa receptora, el cual fue de  $2\tau = 1750s$ .

Los parámetros que se midieron durante cada experimento, una vez que se alcanzó el estado permanente fueron:

- a) Voltaje de alimentación a la parrilla.
- b) Corriente del circuito eléctrico de la parrilla.
- c) Caudal de agua suministrado al calorímetro.
- d) Temperatura del agua de entrada al calorímetro.
- e) Temperatura del agua de salida del calorímetro.
- f) Temperaturas en la placa de cobre del calorímetro.
- g) Temperaturas en la placa receptora del sistema de generación.
- h) Voltaje de salida del dispositivo termoeléctrico.
- i) Corriente de salida del dispositivo termoeléctrico.

Después de la medición y captura de los diferentes parámetros, se realizó un análisis estadístico para conocer los valores finales con los respectivos errores de cada parámetro medido. Para todos los casos se tomaron los últimos 20 datos registrados, una vez que se alcanzó el estado permanente del sistema de generación eléctrica.

Las fórmulas utilizadas para determinar la propagación de errores, se muestran en la tabla 4.1.

*Tabla 4.1. Ecuaciones para el cálculo de la propagación de errores.*

Relación	Cálculo de la incertidumbre
$y = ax_1 + bx_2$ ; $y = ax_1 - bx_2$	$\delta_y^2 = a^2 \delta_{x_1}^2 + b^2 \delta_{x_2}^2$
$y = a \cdot x_1 \cdot x_2$ ; $y = a \cdot \frac{x_1}{x_2}$	$\frac{\delta_y^2}{y^2} = \frac{\delta_{x_1}^2}{x_1^2} + \frac{\delta_{x_2}^2}{x_2^2}$

En la tabla 4.2 se muestran los valores obtenidos de los experimentos realizados con la fuente de calor controlada, con la que se buscó conocer el comportamiento del dispositivo termoeléctrico, manteniendo la potencia de calor fija y variando la resistencia de carga, encontrando con esto, la curva de voltaje-corriente ( $V-I$ ).

Tabla 4.2. Valores obtenidos en la campaña experimental con la fuente de calor controlada para conocer la curva V-I.

Caso $\Omega$	$Q_{in}$ (W)	$m$ (l/min) $\times 10^{-2}$	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)
Corto circuito	$41.73 \pm 0.85$	$63.18 \pm 0.36$	$0 \pm 0$	$0.5795 \pm 0.0002$
1.3	$40.91 \pm 0.82$	$63.60 \pm 0.60$	$0.5222 \pm 0.0001$	$0.45317 \pm 0.00006$
2.5	$41.18 \pm 0.82$	$62.79 \pm 0.43$	$0.8964 \pm 0.0002$	$0.36564 \pm 0.00006$
6.4	$41.35 \pm 0.83$	$62.29 \pm 0.28$	$1.4005 \pm 0.0005$	$0.21644 \pm 0.00006$
12	$42.95 \pm 0.86$	$62.80 \pm 0.44$	$1.7778 \pm 0.0006$	$0.14853 \pm 0.00004$
30	$39.88 \pm 0.93$	$62.72 \pm 0.45$	$1.8150 \pm 0.0010$	$0.06127 \pm 0.00002$
55	$40.04 \pm 0.80$	$62.63 \pm 0.46$	$1.9670 \pm 0.0010$	$0.03292 \pm 0.00002$
109	$40.78 \pm 0.83$	$62.55 \pm 0.46$	$2.0462 \pm 0.0004$	$0.017929 \pm 0.000003$
218	$40.44 \pm 0.86$	$62.47 \pm 0.47$	$2.0138 \pm 0.0004$	$0.009058 \pm 0.000002$
1K $\Omega$	$40.42 \pm 0.86$	$62.38 \pm 0.47$	$2.0415 \pm 0.0003$	$0.00200 \pm 0.00001$
1M $\Omega$	$40.34 \pm 0.82$	$62.30 \pm 0.48$	$2.0464 \pm 0.0003$	$0 \pm 0$
Circuito abierto	$44.52 \pm 0.89$	$62.21 \pm 0.49$	$2.1800 \pm 0.0002$	$0 \pm 0$

En la figura 4.2 se muestra el comportamiento del dispositivo termoeléctrico manteniendo la potencia de calor fija y variando la resistencia de carga.

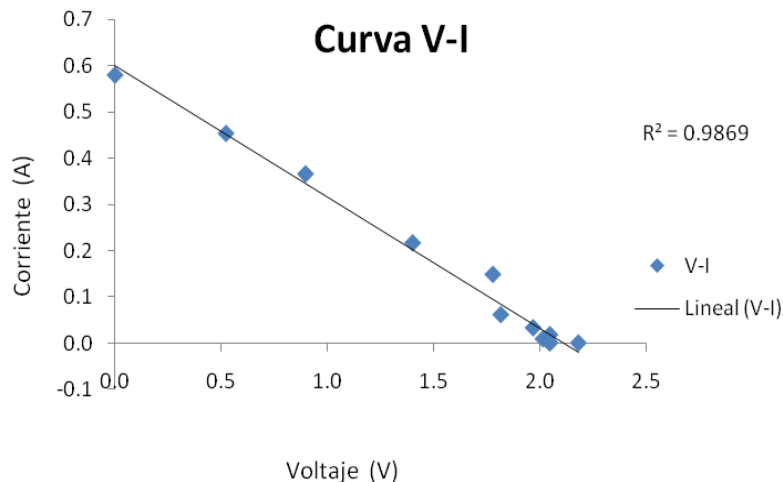


Figura 4.2. Gráfica de la curva voltaje-corriente (V-I), obtenida de la campaña experimental en el medio controlado.

En la gráfica de la figura 4.2 se puede observar que el comportamiento de la relación voltaje-corriente del dispositivo termoeléctrico es lineal, tal y como se reportó en otros trabajos similares [Palacios, 1998] [Rowe, 2006]. Para este dispositivo termoeléctrico se encontró el valor de carga óptimo, con el que se aprovecharía la máxima potencia generada. Este valor de carga se obtuvo

encontrando el punto medio de la curva voltaje-corriente, siendo para el caso de una carga puramente resistiva, el cociente entre el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, el cual está dado por la ley de Ohm. Para la celda termoeléctrica empleada en los experimentos el valor de la carga resistiva óptima fue de  $3.76 \Omega$ .

Una vez que se obtuvo la curva voltaje-corriente de la celda termoeléctrica, se realizó otra serie de experimentos para conocer la curva de eficiencia del dispositivo termoeléctrico y del sistema de generación eléctrica, variando la potencia de entrada, en este caso, la potencia de la parrilla eléctrica. En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos en estos experimentos realizados para encontrar la curva de eficiencia.

Tabla 4.3. Valores obtenidos en la campaña experimental en el medio controlado para conocer la curva de eficiencia del dispositivo termoeléctrico y el sistema de generación.

Caso	$Q_{in}$ (W)	$Q_c$ (W)	$Q_{out}$ (W)	Eficiencia GTE	Eficiencia Global
1	$21.24 \pm 0.42$	$18.04 \pm 0.63$	$0.05234 \pm 0.00001$	$0.29 \pm 0.01\%$	$0.25 \pm 0.01\%$
2	$48.5 \pm 0.1$	$39.8 \pm 1.0$	$0.4168 \pm 0.0002$	$1.05 \pm 0.03\%$	$0.86 \pm 0.02\%$
3	$86.1 \pm 1.8$	$66.9 \pm 0.9$	$1.1385 \pm 0.0009$	$1.7 \pm 0.02\%$	$1.32 \pm 0.03\%$
4	$133.4 \pm 2.7$	$98.7 \pm 0.9$	$2.1616 \pm 0.0004$	$2.19 \pm 0.02\%$	$1.62 \pm 0.03\%$
5	$192.2 \pm 3.8$	$137.2 \pm 1.4$	$3.055 \pm 0.001$	$2.23 \pm 0.02\%$	$1.59 \pm 0.03\%$
6	$259.7 \pm 5.2$	$175.1 \pm 1.8$	$3.003 \pm 0.003$	$1.7 \pm 0.01\%$	$1.16 \pm 0.02\%$

En la figura 4.3 se muestra la gráfica de la curva de generación de potencia eléctrica del dispositivo termoeléctrico  $Q_{out}$  dependiendo de la potencia de alimentación  $Q_{in}$ .

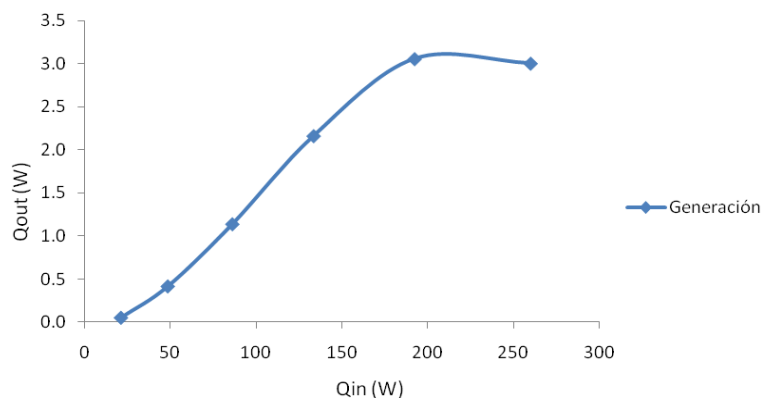


Figura 4.3. Gráfica de la curva de generación de potencia eléctrica  $Q_{out}$  en función de la potencia de entrada  $Q_{in}$ .

En la figura 4.3 se puede observar que aproximadamente cuando la potencia de

alimentación es  $Q_{in} = 200 \text{ W}$ , se tiene la máxima generación de potencia eléctrica del dispositivo termoelectrico con un valor aproximado de  $Q_{out} = 3 \text{ W}$ . En la figura 4.4 se muestra la gráfica de la eficiencia del dispositivo termoelectrico en función de  $Q_c$  que es el calor que realmente paso a través del dispositivo termoelectrico, y la del sistema de generación en función de las potencias de entrada  $Q_{in}$ .

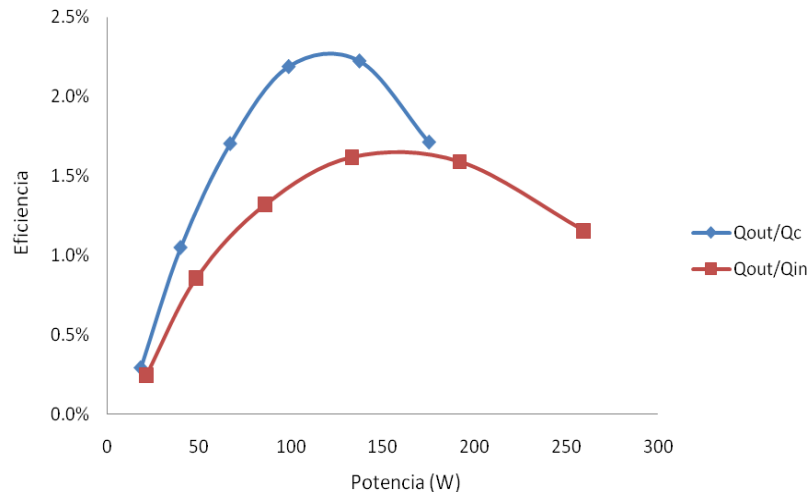


Figura 4.4. Grafica de las curvas de eficiencia, una del dispositivo termoelectrico ( $Q_{out}/Q_c$ ) y la otra del sistema de generación ( $Q_{out}/Q_{in}$ ).

En la grafica 4.4 se puede observar que la máxima eficiencia del dispositivo termoelectrico fue cercano al 2.3%, el cual se obtuvo para una potencia calorimétrica  $Q_c$  de aproximadamente 130 W, mientras que la del sistema de generación fue de 1.5% con una potencia de entrada  $Q_{in}$  de aproximadamente 170 W. Este desfaseamiento que se dio entre las dos curvas de eficiencia fue debido a las perdidas de calor, a través del aislamiento térmico del sistema de generación.

## 4.2 Resultados en el sistema de concentración solar

Al igual que en los experimentos realizados en el medio controlado, fue necesario definir el transitorio del sistema de generación eléctrica integrado ahora, al DEFAC. En la figura 4.5 se muestra la grafica que describe el transitorio del sistema de generación eléctrica integrado en el DEFAC.

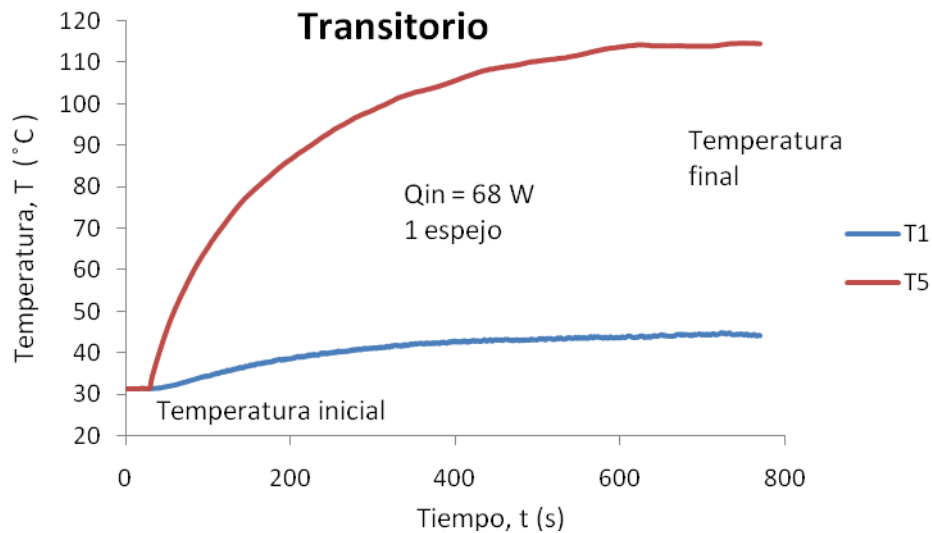


Figura 4.5. Grafica del comportamiento del transitorio en el DEFRACT.

Para la aproximación del transitorio del sistema de generación eléctrica integrado en el DEFRACT, se utiliza la misma ecuación usada en el medio controlado, solo que en este caso el valor de tau ( $\tau$ ) fue de 155 segundos. La diferencia de tiempos en los que se alcanza el estado permanente entre al medio controlado y el DEFRACT se debió a dos factores, el primero de ellos es que la potencia de entrada en el DEFRACT era instantánea, mientras que en el medio controlado tenía un transitorio la resistencia eléctrica de la parrilla, por otro lado, la masa del sistema de generación eléctrica más la masa de la parrilla junto con el sistema de aislamiento térmico, eran mayor que la que sumaban el sistema de generación eléctrica con su aislamiento térmico, integrados en el DEFRACT. Con esta función que describe el transitorio del sistema de generación eléctrica, se determinó el tiempo que duraría cada experimento en alcanzar aproximadamente el 95% de la temperatura en estado permanente de la placa receptora, que fue de  $2\tau = 310 \text{ s}$ .

Una vez que se integró el sistema de generación al sistema de concentración solar de foco puntual (DEFRACT), se hicieron varios experimentos para encontrar nuevamente la curva voltaje-corriente del dispositivo termoelectrico y las de las eficiencias del dispositivo termoelectrico y del sistema de generación. Para conocer la curva  $V-I$  se usó una resistencia variable con lo que se logró tener una gama más amplia de valores de carga resistiva. En la figura 4.6 se presentan los resultados de los experimentos de la curva voltaje-corriente.



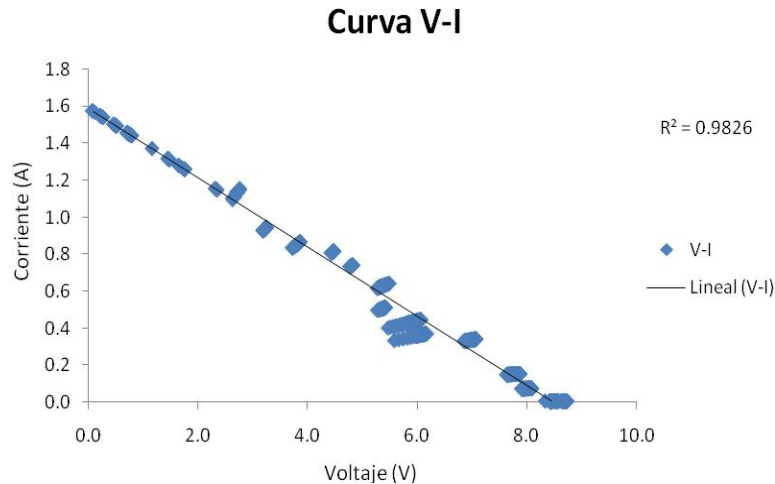


Figura 4.6. Gráfica de la curva voltaje-corriente obtenida en la campaña experimental con el DEFAC.

Con esta campaña experimental se pudo reproducir nuevamente el comportamiento del dispositivo termoeléctrico a diferentes valores de carga resistiva, tal y como se hizo en el medio controlado. En la figura 4.7 se muestran los resultados de los experimentos en los que se obtuvo la curva  $V-I$  para diferentes valores de potencia de entrada  $Q_{in}$ , en estos casos como ya se conocía que se tenía un comportamiento lineal, solo se registraron el voltaje de circuito abierto, el de corriente de corto circuito, así como el voltaje y la corriente para una carga resistiva de  $R = 6 \Omega$ .

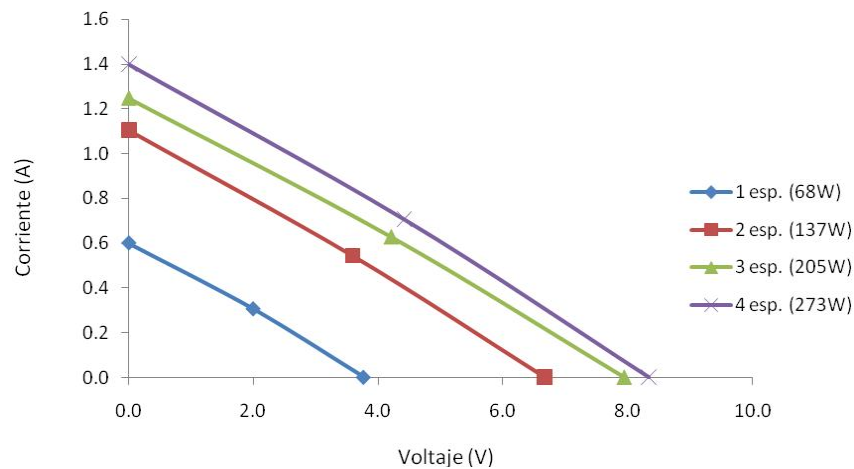


Figura 4.7. Gráfica de la curva voltaje-corriente obtenida en la campaña experimental para diferente número de espejos del DEFAC.

Con estos resultados se pudo determinar que el comportamiento de la curva  $V-I$  es independiente de la potencia de entrada  $Q_{in}$ , al menos dentro del rango de potencias de operación del dispositivo termoelectrico.

La siguiente campaña experimental que se realizó fue para conocer las curvas de eficiencia del dispositivo termoelectrico y del sistema de generación. En la figura 4.8 se muestra la gráfica de generación del dispositivo termoelectrico  $Q_{out}$  en función de la potencia de entrada  $Q_{in}$  suministrada por la cantidad de espejos del DEFAC. En este caso se aplicó una curva de tendencia para apreciar más claramente el comportamiento del dispositivo termoelectrico.

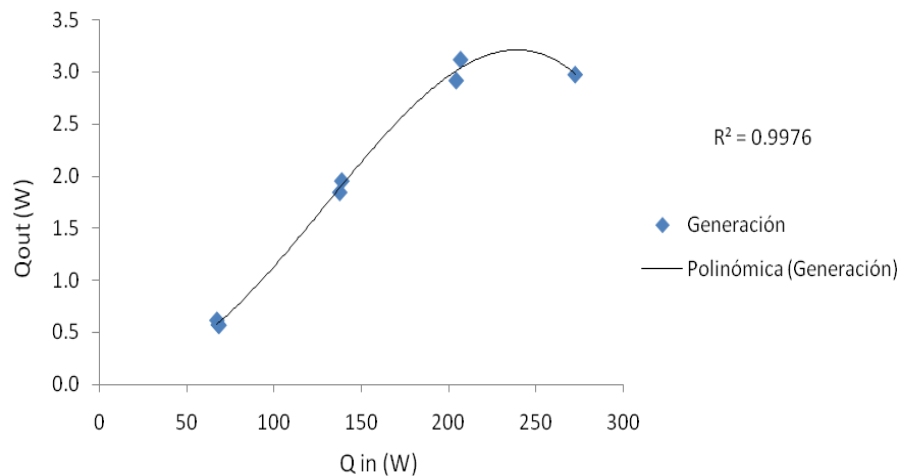


Figura 4.8. Gráfica de la curva de generación de potencia eléctrica  $Q_{out}$  en función de la potencia de entrada  $Q_{in}$  del DEFAC.

En la grafica de la figura 4.8 se puede observar que aproximadamente cuando la potencia de alimentación es  $Q_{in}= 250 W$ , se tiene la máxima generación de potencia eléctrica del dispositivo termoelectrico con un valor aproximado de  $Q_{out}= 3.5 W$ . En la figura 5.6 se muestra la gráfica de la eficiencia del dispositivo termoelectrico en función de  $Q_c$  que es el calor que realmente paso a través del dispositivo termoelectrico, y la del sistema de generación en función de las potencias de entrada  $Q_{in}$  suministradas por los espejos del DEFAC. Al igual que en la gráfica de la figura 4.9 se aplicaron curvas de la tendencia del comportamiento de cada eficiencia para que se puedan apreciar mas claramente.

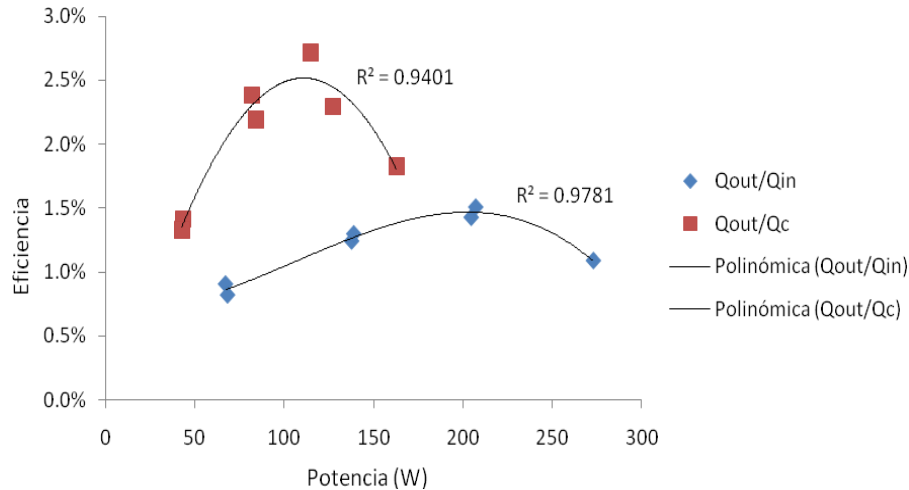


Figura 4.9. Gráfica de las curvas de eficiencia, una del dispositivo termoeléctrico ( $Q_{out}/Q_c$ ) y la otra del sistema de generación ( $Q_{out}/Q_{in}$ ) de los experimentos en el DEFRACT.

En la gráfica 4.9 se puede observar que la máxima eficiencia del dispositivo termoeléctrico se obtiene para una potencia calorimétrica  $Q_c$  de aproximadamente  $120\text{ W}$ , dato similar al obtenido en la campaña experimental realizada en el medio controlado, mientras que la del sistema de generación con una potencia de entrada  $Q_{in}$  de  $220\text{ W}$  aproximadamente. Este desfaseamiento que se dio entre las dos curvas de eficiencia se debió a las pérdidas de calor radiativas y convectivas en la placa receptora del sistema de generación ya que esta placa quedó expuesta al ambiente, sin la posibilidad de retener todo el calor que recibía lo que ocasionó que estas pérdidas de calor fueran mayores que las que se dieron por el sistema de aislamiento del medio controlado.

#### 4.2.1 Resultados Ópticos

Para conocer la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora se tomaron imágenes con una cámara CCD (*ALLIED, PIKE210*) ubicada como se mostró en la figura 3.7 del capítulo anterior. En la figura 4.10 se muestra una imagen tomada por la cámara CCD con 3 espejos del grupo A del DEFRACT.

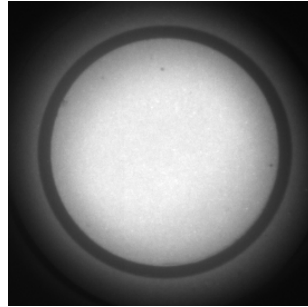


Figura 4.10. Imagen del spot de radiación solar concentrada sobre la placa receptora, con 3 espejos del grupo A del DEFRAC.

Para lograr tomar esa imagen del spot de la figura 4.10, se usaron filtros, polarizadores (de un espectro plano) y el obturador de la lente, que atenuaban la intensidad de la radiación que llegaba al sensor de la cámara y así se pudiera tener toda la gama de valores en una escala de grises menor a 255, correspondiente a usar imágenes de 8 bites, es decir usar un rango dinámico de 0 a 255 bites. Esta imagen se importó en MatLab para poder procesarla. En la figura 4.11 se muestra la imagen del spot procesada por MatLab.

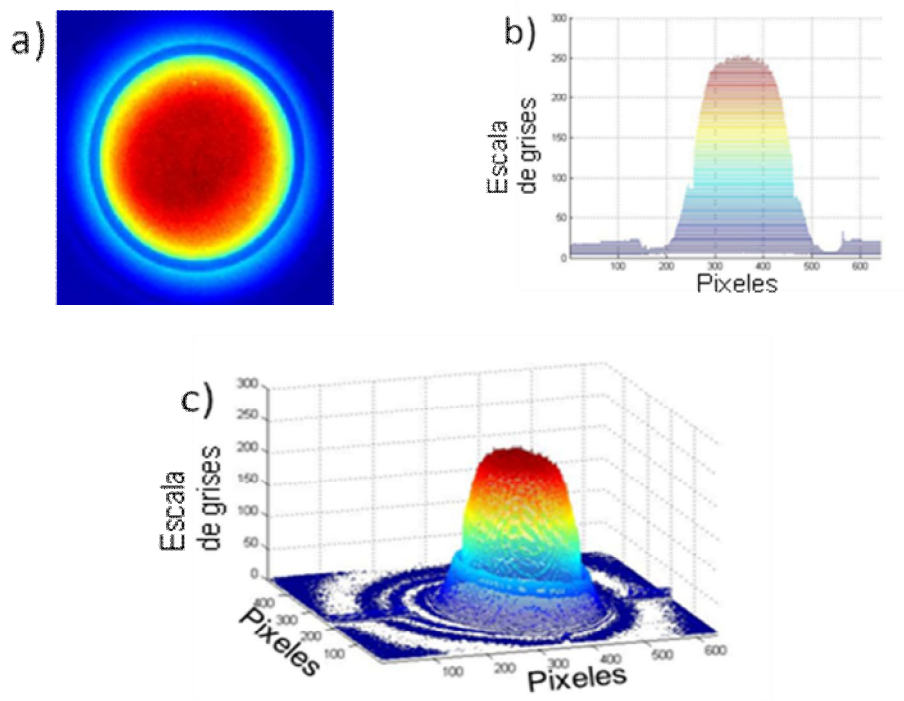


Figura 4.11. Imagen del spot de radiación solar concentrada sobre la placa receptora procesada en MatLab.

Una vez importada la imagen en MatLab se ubicó el centro del spot, usando como guía el plano coordenado dibujado sobre la placa receptora, como se mostró en la figura 3.8 del capítulo anterior. Ya que se definió el centro del spot, se tomaron los valores completos de la fila correspondiente de la matriz de datos en la misma ubicación de ese centro. La matriz de datos era de 480x640 y el centro del spot se ubicó en las coordenadas (361,201), por lo que se obtuvieron todos los datos de la fila 201. En la figura 4.12 se muestra la grafica de la distribución de radiación solar concentrada en la parte central del spot.

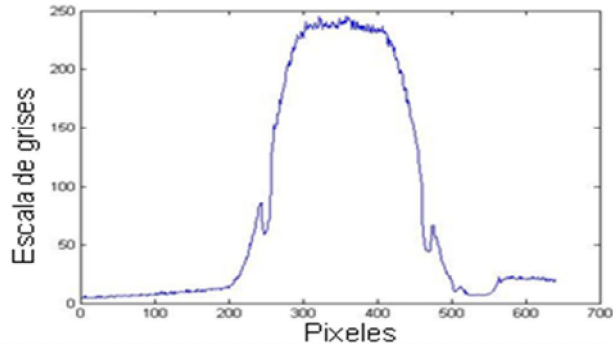


Figura 4.12. Imagen de la distribución de la radiación solar concentrada sobre la placa receptora en la parte central del spot procesada en MatLab en escala de grises y píxeles.

Para conocer la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora a partir de la gráfica en escala de grises y píxeles, fue necesario transformarla a intensidad de radiación ( $W/cm^2$ ) y distancia ( $m$ ). Para hacer esta transformación, se aplicó la metodología siguiente:

Primero se depuró la imagen de la gráfica 4.12 recorriendo el cero (0,0) del plano vertical hasta el punto central de la circunferencia del spot (361,201), y limitándola hasta el punto (511,201). Esta nueva gráfica se muestra en la figura 4.13.

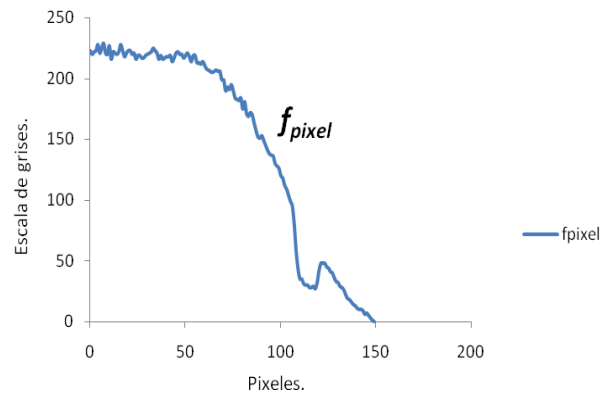


Figura 4.13. Se muestra la grafica de la distribución de la función  $f_{pixel}$ .

Teniendo la función depurada y definida, se evaluó la potencia incidente en el receptor  $Q_R$  que depende de la intensidad de radiación solar en el instante de la experimentación  $G_b = 965 \text{ W/m}^2$ , la reflectividad de los espejos  $\rho = 0.92$  y del área de captación total de los espejos, que para tres fue de  $A_T = 0.212 \text{ m}^2$ . En la ecuación 4.2 se describe esta relación:

$$Q_R = G_b A_T \rho \quad 4.2$$

Con lo que se obtuvo una potencia incidente en la placa receptora de  $Q_R = 188.21 \text{ W}$ . Por otro lado, se define que la potencia incidente  $Q_R$  es el volumen bajo la curva que describía la distribución de radiación concentrada (ecuación 4.3)

$$Q_R = C \int_0^{2\pi} \int_0^r f_{\text{pixel}} r dr d\theta \quad 4.3$$

Donde  $C$  es la constante de conversión y  $f_{\text{pixel}}$  es la función de escala de pixeles de la imagen CCD (niveles de grises) que depende de la intensidad de radiación que incide en el sensor el cual fue atenuado de manera homogénea por toda la serie de filtros y polarizadores de la cámara.

Por otra parte, para determinar las dimensiones de cada pixel, se dividió la cantidad de pixeles de la imagen entre el diámetro de la circunferencia del receptor mostrado en la imagen de la figura 3.8 del capítulo anterior. Se determinó que la relación de pixeles y la distancia fueron de  $1 \text{ m}$  por  $5000$  pixeles, por lo tanto, la relación es de  $1:5000$ . Con esta relación se identifica los valores de la escala de grises de la función  $f_{\text{pixel}}$  correspondiente para cada valor de  $r_i$  que va de  $0 \leq i \leq 0.03 \text{ m}$  con incrementos de  $0.0002 \text{ m}$  dando una nueva función que ahora depende del radio  $F(r)$ . Como se observa en la figura 4.14 inciso a.

La integral de volumen de la distribución de la función  $F(r)$  se puede discretizar como una sumatoria de cada valor de la escala de grises del correspondiente  $r_i$  y se describe con la ecuación 4.4.

$$F(r) \approx \sum 2\pi \Delta r f_{\text{pixel}} r_i \quad 4.4$$

Ya con estas conversiones la función de la radiación concentrada sobre la placa receptora  $Q_R$  se representa con la ecuación 4.5.

$$Q_R(r) = CF(r) \quad 4.5$$

En la figura 4.14 se muestra la grafica de la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora equivalente a la obtenida por la imagen de la cámara CCD comparándola con la de  $f_{pixel}$ .

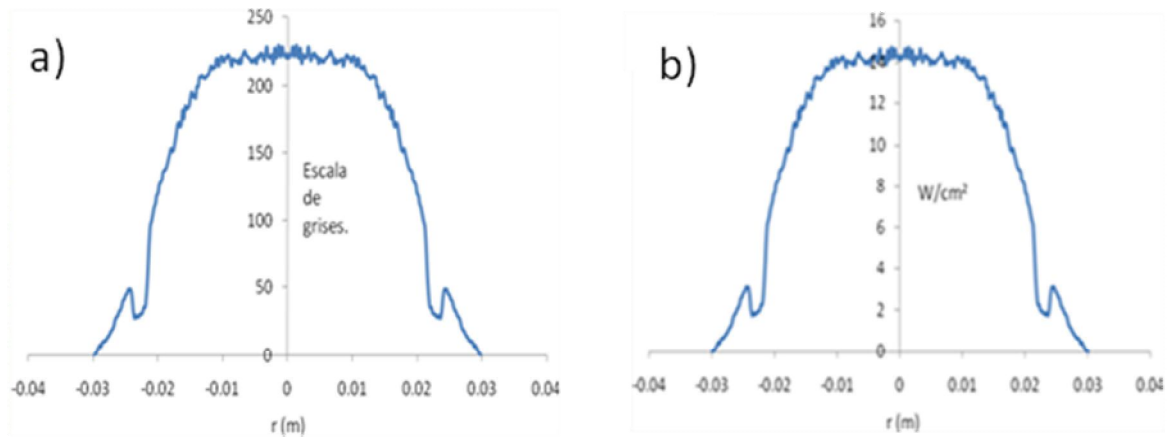


Figura 4.14. Se muestra la comparativa de la transformación de la distribución de niveles de grises a la de la intensidad de flujo radiativo. a) Distribución de la intensidad de niveles de grises de la imagen tomada con la cámara CCD. b) Distribución de la intensidad de flujo radiativo concentrado obtenida de la transformación de la imagen tomada con la cámara CCD.

En la figura 4.15 se muestra la comparativa entre la modelación y la imagen real de la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora ubicada a  $1.70m$  de distancia focal.

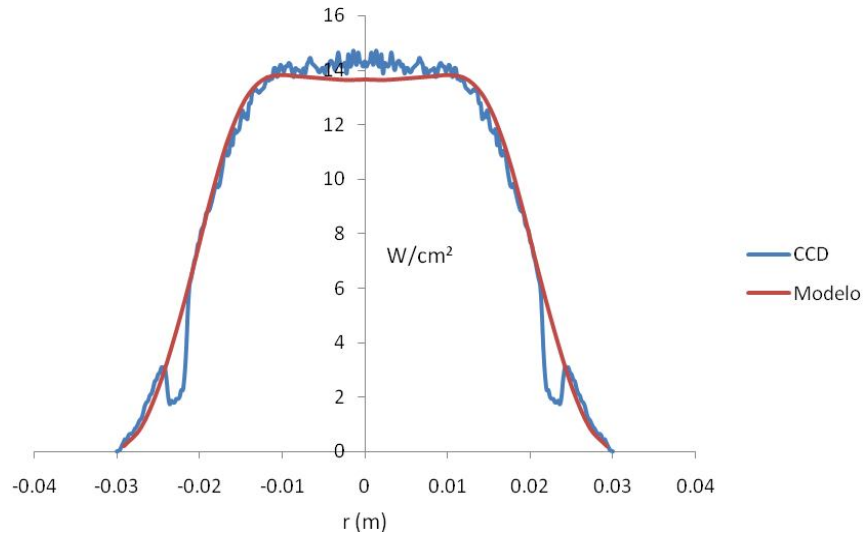


Figura 4.15. Comparativa de la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora entre la modelación en código CIRCE2 y la imagen de la cámara CCD

En la figura 4.15 se puede observar que la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora obtenida en la modelación fue bastante aproximada a la registrada por la imagen CCD. Las perturbaciones de la distribución de radiación solar concentrada sobre la placa receptora reflejadas en la grafica de la figura 4.15 a una distancia radial de  $0.025\text{ m}$ , se debieron a la placa circular que sujetaba a la placa receptora, esto puede observarse en la imagen de la figura 3.8a. Esta distribución tan uniforme de intensidad solar se vio reflejada en la distribución de temperaturas registradas en la placa receptora como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Distribución de temperaturas en la placa receptora con una potencia de entrada  $Q_{in}=205\text{W}$ .

Potencia suministrada por 3 espejos del grupo A del DEFRAC			
Temperaturas en la placa receptora ( $^{\circ}\text{C}$ )			
$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$
$258.65 \pm 0.15$	$257.88 \pm 0.17$	$256.12 \pm 0.14$	$256.19 \pm 0.15$

La distribución de temperaturas que se dio en la placa receptora fue tan uniforme que la diferencia de temperaturas entre la más alta y la más baja fue de  $2.5^{\circ}\text{C}$ , lo cual representó apenas un  $1\%$ . En la placa refrigerada se presentó una distribución similar como se muestra en la tabla 4.5, en la que se muestra que la diferencia de temperaturas fue menor de  $1^{\circ}\text{C}$ , lo que represento un porcentaje menor al  $2\%$ .



Tabla 4.5. Distribución de temperaturas en la placa refrigerada con una potencia de entrada  $Q_{in}=205W$ .

Potencia suministrada por 3 espejos del grupo A del DEFRAC			
Temperaturas en la placa refrigerada ( $^{\circ}C$ )			
$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
$46.94 \pm 0.04$	$46.893 \pm 0.055$	$46.941 \pm 0.075$	$46.095 \pm 0.088$

Para entender mejor los valores de temperaturas presentados en las tablas 4.4 y 4.5, se presentan a continuación los resultados térmicos de las campañas experimentales.

#### 4.2.2 Resultados térmicos

Después de haber realizado las campañas experimentales en el medio controlado y en el DEFRAC, se pudieron comparar los resultados obtenidos con los resultados de las simulaciones. En la tabla 4.6 se presentan las temperaturas registradas por los termopares ubicados en el centro de la placa receptora y de la placa de cobre del calorímetro en los experimentos con el medio controlado. Las temperaturas que se consideraron para el caso del medio controlado fueron las del circuito abierto y las del DEFRAC fueron las de los casos de circuito abierto y corto circuito ya que representan las máximas y mínimas respectivamente.

Tabla 4.6. Se muestran las temperaturas registradas por los termopares ubicados en el centro de las placas de cobre en el medio controlado.

$Q_{in} (W)$	$m (l/min) \times 10^{-2}$	$T_{in}(^{\circ}C)$	$T_c (^{\circ}C)$	$T_h(^{\circ}C)$	$DT (^{\circ}C)$
$21.24 \pm 0.42$	$63.2 \pm 0.4$	$23.90 \pm 0.01$	$27.82 \pm 0.03$	$49.58 \pm 0.02$	$21.75 \pm 0.04$
$48.5 \pm 1.0$	$63.6 \pm 0.6$	$24.49 \pm 0.01$	$33.39 \pm 0.06$	$82.16 \pm 0.03$	$48.77 \pm 0.07$
$86.1 \pm 1.7$	$62.8 \pm 0.4$	$24.82 \pm 0.01$	$39.57 \pm 0.05$	$121.63 \pm 0.12$	$82.06 \pm 0.13$
$133.4 \pm 2.7$	$62.3 \pm 0.3$	$25.18 \pm 0.01$	$46.55 \pm 0.06$	$166.32 \pm 0.04$	$119.77 \pm 0.07$
$192.2 \pm 3.8$	$62.8 \pm 0.4$	$25.22 \pm 0.01$	$53.72 \pm 0.09$	$218.38 \pm 0.07$	$164.66 \pm 0.11$
$259.7 \pm 5.2$	$62.7 \pm 0.5$	$25.16 \pm 0.01$	$61.06 \pm 0.15$	$277.64 \pm 0.37$	$216.6 \pm 0.4$

En esta tabla 4.6 se puede observar que para el caso de la fila 5 en que se tuvo una potencia de entrada de  $Q_{in} = 192.18 W$  se registró una temperatura en la placa receptora  $T_h = 218.38 ^{\circ}C$  que representa  $491.5 K$  y en la modelación de MatLab se estimó una temperatura de  $519 K$  mientras que en FLUENT fue de  $498.85 K$ . Por otro lado la temperatura en la placa refrigerada fue  $T_c = 53.72 ^{\circ}C$  que representa  $326.9 K$  y en la modelación de MatLab se estimó una temperatura de  $356 K$  mientras que en FLUENT fue de  $348.65 K$ . Con estas comparativas se observó que los modelos desarrollados en MatLab y FLUENT fueron aproximados a lo que sucedió en la realidad.

En la tabla 4.7 se muestran las temperaturas registradas por los termopares ubicados en la parte central de la placa receptora  $T_h$  y en la placa refrigerada  $T_c$  de los experimentos realizados para el caso de 3 espejos del DEFAC.

*Tabla 4.7. Se muestran las temperaturas registradas por los termopares ubicados en el centro de las placas de cobre en el DEFAC.*

<b>Caso</b>	$T_h$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{in}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$m$ (l/min) $\times 10^{-2}$	$Q_{in}$ (W)
Circ. Abier.	$218.1 \pm 0.8$	$41.4 \pm 0.3$	$26.6 \pm 0.1$	$63.6 \pm 0.3$	$204.6 \pm 0.8$
Corto Circ.	$195.3 \pm 0.4$	$42.5 \pm 0.2$	$26.65 \pm 0.2$		

En esta tabla 4.7 se puede observar que para el caso de circuito abierto con una potencia de entrada de  $Q_{in} = 204.6 \text{ W}$  se registró una temperatura en la placa receptora  $T_h = 218.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  que representa  $491.2 \text{ K}$  y en la modelación de MatLab se estimo una temperatura de  $519 \text{ K}$  mientras que en FLUENT fue de  $498.85 \text{ K}$ . Por otro lado la temperatura en la placa refrigerada fue  $T_c = 41.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  que representa  $314.5 \text{ K}$  y en la modelación de MatLab se estimo una temperatura de  $356 \text{ K}$  mientras que en FLUENT fue de  $348.65 \text{ K}$ . Con estas comparativas se observo que los modelos desarrollados en MatLab y FLUENT fueron más aproximados para la temperatura de la placa receptora que para la de la placa refrigerada.

## Capítulo 5

### Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se implementó y operó un generador de efecto termoeléctrico en un concentrador solar de foco puntual (DEFRAF). La intención de la implementación del dispositivo termoeléctrico en el sistema de concentración solar, fue la de aprovechar la versatilidad que brindan estos dispositivos de funcionar obteniendo la energía térmica de diversas fuentes, como por ejemplo: el calor de desecho de un equipo, sistema o proceso, el calor producido por la quema de algún combustible o el calor proveniente de un sistema con o sin concentración solar.

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo:

Para conocer el comportamiento de este dispositivo termoeléctrico en el sistema de concentración solar, primero se modeló la distribución de la radiación solar concentrada sobre la placa receptora del sistema de generación eléctrica, usando el método de trazado de rayos con el código CIRCE2 y TONALLI. Se encontró que la distancia focal óptima para tener una distribución uniforme de radiación solar concentrada formando un spot de 3 cm de diámetro sobre la placa receptora, fue de *1.70 m*, siempre y cuando se orienten los espejos hacia el centro del receptor. Esta modelación de distribución de radiación solar concentrada se corroboró con los resultados de los experimentos en los que por medio de imágenes CCD, del spot en la placa receptora. Se encontró que la distribución de la concentración

solar del modelo de trazado de rayos y la distribución experimental, tuvo una desviación menor a 2 %.

Después de los resultados de la modelación óptica, se hizo una modelación del fenómeno de transferencia de calor que ocurría en el sistema de generación eléctrica y se obtuvieron resultados muy similares a los que se dieron en las campañas experimentales. Para estimar las temperaturas que se alcanzarían en las placas de cobre del sistema de generación eléctrica, se desarrollo un programa del fenómeno de la transferencia de calor usando MatLab. Por otro lado se hizo una modelación del fenómeno de transferencia de calor con un software comercial especializado en la simulación de este tipo de fenómenos (FLUENT), en el que se pudo desarrollar un modelo del sistema de generación eléctrica, más parecido al real y con el que se obtuvieron resultados más similares a los experimentos, ya que no solo se modelo la transferencia de calor por conducción sino que también el comportamiento del fluido de refrigeración dentro del calorímetro de placa plana.

De las campañas experimentales se puede concluir que se logro reproducir el comportamiento del dispositivo termoeléctrico como el reportado en trabajos similares realizados con anterioridad [Palacios, 1998] [Rowe, 1998], en los que se describe que se tiene una relación lineal en la curva voltaje-corriente. Para el caso de la curva de eficiencia del dispositivo termoeléctrico y del sistema de generación eléctrica, se encontró que se tuvieron más pérdidas en el sistema de concentración solar que en el medio controlado, lo cual era de esperarse ya que en el DEFRAC se tuvieron perdidas radiativas, convectivas y conductivas, mientras que en el medio controlado en mayor medida solo fueron por conducción. Por otro lado, las eficiencias más altas del dispositivo termoeléctrico fueron de 2.7% con una generación de potencia eléctrica máxima de 3 W. Por otro lado, el sistema de generación eléctrica tuvo una eficiencia de 1.5% para potencias de entrada aproximadas a los 200 W, usando solo 3 espejos del DEFRAC.

Las recomendaciones que se hacen para trabajos futuros son las siguientes:

1. Mejorar la modelación del fenómeno de transferencia de calor que ocurre en el dispositivo termoeléctrico y en el sistema de generación eléctrica, diseñando un modelo que se aproxime mas a la estructura real del sistema de generación eléctrica, en el que se considere que existe una separación entre cada cubo de  $Bi_2Te_3$  del dispositivo termoeléctrico.
2. Para reducir las perdidas de calor por radiación y convección que se dan en la placa receptora, se utilicen cavidades similares a las utilizadas en los calorímetros de cavidad.

3. Implementar los dispositivos termoeléctricos en otros tipos de sistemas de concentración solar como los de canal parabólico [Siddig, 2000] o lentes de fresnel, ya que estos sistemas de concentración son más económicos y sencillos.
  
4. Integrar sistemas de generación de potencia eléctrica compuestos con dispositivos termoeléctricos y celdas fotovoltaicas [Nemir, 2008] en sistemas de concentración solar.
  
5. Diseñar un equipo de pruebas, especial para la caracterización de dispositivos termoeléctricos ya que el que se utilizó en este trabajo fue la fuente de calor controlada.

## Referencias

- Acosta, R. Pérez, C.A. Estrada C. 2001. "Estudio Teórico-Experimental del Comportamiento Térmico de la Placa Receptora del Calorímetro del DEFRAC". Memorias de la XXV Semana Nacional de Energía Solar, Vol. Único, pags. 197-204. Edito ANES, ISBN 968-5219-02-8. San Luis Potosi, SLP.
- Anatychuk, L.J., 1998. "Physics of Thermoelectricity", Institute of Thermoelectricity, ISBN 966-738-00-1.
- Anatychuk, Lukian, 1994, "Seebeck or Volta", Journal of Thermoelectricity.
- Ballestrin, J., Monterreal, R., 2002. "Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation". 11<sup>th</sup> International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, Switzerland.
- Ballestrin, J., Ulmer, S., Moreles, A., odriguez, M., 2003. "Systematic error in the measurement of very high solar irradiance". Sol. Energy Meter. Sol. Cells 80. Pp 375-381.
- Cruz, F., Estrada, C.A., J. Cervantes y J.H. Quiñones, 1997. "Caracterización del DEFRAC. Parte I: Estudio Térmico". Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, pp 170-176.
- Duffie J.A. and Beckman W. A., 1991. "Solar engineering of thermal processes", 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Estrada, C. A., Higuera, S., Oskam, Cervantes, J., 1995, "Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados: DEFRAC", Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, pp 183-186.
- Grajeda, P.M., 1997. "Sistema de control del DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados)". Tesis de licenciatura, CIE-UNAM Temixco, Morelos, México.
- Gurevich, Yuri; Dobrovolsky, Vladimir; 1998, "Fenómenos termoeléctricos" en Diccionario enciclopédico "Física del Estado Sólido", vol. 2, pp. 368- 369, Kiev, Naukova Dumka.
- IIE 2006.

- 
- Incropera P. Frank and DeWitt P. David, "Introduction to Heat Transfer", 4a ed., 1999, Prentice Hall, N.Y. United States of America, pp. 912.
- Jaramillo O.A., Pérez-Rábago C.A., Arancibia-Bulnes C. A., Estrada C.A., 2008. "A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation", *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2322-2328
- Key World Energy Statistics, 2008. International Energy Agency (IEA).
- Kwangsun Ryu, Jin-Geun Rhee, Kang-Min Park, Jeong Kim, 2006. "Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system" *Solar Energy*, Volume 80, Issue 12, Pages 1580-1587.
- Leutz, R., Suzuki, A., Akisawa, A. and Kashiwagi, T. 1998. "Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators". Tokyo University of Agriculture and Technology, Department of Mechanical Systems Engineering, 2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan UNESCO, Bouvin 3.26 SC/EST, 1, rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15.
- Nemir, D. and Beck, J. 2008. "Thermoelectric Technology and the Space Elevator". TXL Group, Inc.
- Palacios y Zhu, 2008, "Electrical Properties of Commercial Thermoelectric Modules", Universidad Pontificia Comillas, Madrid, Spain.
- Pérez-Rábago C.A., Marcos M.J., Estrada C.A., Romero M., 2006. "Heat Transfer in a Conical Cavity Calorimeter to Measure the Thermal Power of a Point Focus Concentrator", *Solar Energy*. pp. 9-10.
- Quiñones J.J., Estrada, C.A., Cruz, F. y Cervantes J., 1997. "Caracterización del DEFRAC. Parte II: Estudio Óptico". *Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar*, pp 160-166.
- Riveros, D. 2008. "Diseño Óptico del Horno Solar de alto Flujo del CIE-UNAM". Tesis doctoral, CIE-UNAM, Temixco, Morelos.
- Romero M, Buck R, Pacheco JE. "An update on solar central receiver systems". *ASME J Sol Energy Eng* 2002;124:98–108.
- Romero V., 1994. "Circe2/Dekgen2: A software package for facilitated optical analysis of 3D distributed solar energy concentrator", Sandia National Laboratories, SAND91-2238.
- Rowe D.M., 1998. "Evaluation of thermoelectric modules for power generation", *Journal of Power Sources* 73. 193–198. School of Engineering, University of Wales Cardiff, Cardiff, UK
- Rowe D.M., 2006. "Thermoelectrics Handbook Macro to Nano", Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300.
- Segal, A. and Epstein, M. 2000, "The optics of the solar tower reflector". Solar Research Facilities Unit, Weizmann Institute of Science, Rehovot 76100, Israel Received 20 June 2000; revised version accepted 13 September 2000
-

- Siddig A. Omer, David G. Inield, 2000. "Design and thermal analysis of a two stage solar concentrator for combined heat and thermoelectric power generation". School of the Built Environment, University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, UK Centre for Renewable Energy Technology, Loughborough University, Loughborough, LE11 3TU, UK.
- SolarPASES. 2009.
- Thomas, A. , 1995. "Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators", Instrumentation and Services Unit, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India
- Volker Quaschnig, 2004. "Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation", Solar Energy 77, pp 171-178.
- Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., 1977. "Atmospheric Science: An introductory survey", Academic Press, New York.
- Washom B., 1984. "Parabolic Dish Stirling Module Development and Test Results", Paper No. 849516, Proceedings of the IECEC, San Francisco, CA. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742
- World Energy Outlook (WEO), 2008. International Energy Agency (IEA).



## Apéndice A1

### Rediseño del sistema de seguimiento del DEFRACT

Uno de los elementos más importantes y críticos de un sistema de concentración solar de foco puntual, es el seguimiento aparente del Sol, ya que si este falla, se provocan errores que afectan la ubicación del spot solar sobre el receptor y una variación en la distribución de temperaturas del receptor. El DEFRACT es un sistema de concentración solar de foco puntual que depende del seguimiento solar para poder mantener fijo el spot solar sobre el receptor. El seguimiento aparente del Sol, del DEFRACT, estaba controlado por un servomotor, acoplado a un reductor de velocidad y funcionaba por medio de una secuencia de arranques y paros del servomotor, aproximándose al movimiento continuo aparente del Sol que tiene una velocidad angular de 15 grados por hora, que es lo mismo que  $6.94 \times 10^{-4}$  *rev/min*. Sin embargo, al ser un sistema de seguimiento intermitente provocaba que el spot solar oscilara entre cada paso del motor. Otro problema que se tenía, era que la flecha de la transmisión reductora de velocidad, accionaba directamente el eje de giro de la estructura que soporta al sistema óptico de concentración solar, lo que provocaba esfuerzos mecánicos en la pieza de unión de ambas flechas ocasionando daños en esta unión al no soportar esos esfuerzos.

Para disminuir los errores en el seguimiento aparente del sol, se sustituyó el servomotor, por un motor de engranaje de corriente directa. En la tabla A1.1 se muestran las especificaciones técnicas del motor del DEFRACT.

*Tabla A1.1 Especificaciones técnicas del motor del DEFRAC.*

Marca	DAYTON
Modelo	011-101-0186
Tipo	Motor de engranaje DC
Potencia	1/40 HP
Torsión	100 Pulg./Lb
Velocidad máxima salida	9.6 RPM
Reductor	185.5 : 1
Voltaje máximo	90 VDC
Rotación	Reversible

Para controlar la velocidad de operación del motor del DEFRAC, se usó un variador de voltaje. En la tabla A1.2 se muestran las especificaciones técnicas del control de velocidad.

*Tabla A1.2 Especificaciones técnicas del control de velocidad.*

Marca	DAYTON
Modelo	AZ527
Potencia	1/50 a 1/6 HP
Voltaje de entrada	115 VAC
Voltaje de salida	90 VDC
Rango de velocidad	10 : 1

El ajuste de la velocidad del motor se hizo de manera manual, por lo que se requirió de un tacómetro que permitiera conocer la velocidad instantánea a la que giraba el motor. En la tabla A1.3 se describen las especificaciones técnicas del tacómetro.

*Tabla A1.3 Especificaciones técnicas del tacómetro.*

Marca	DARK CONTROLS
Modelo	DM8000
Tipo	Digital
Voltaje de entrada	120-240 VAC
Entrada	1 a 30,000 pulsos por minuto
Precisión	+ 0.4 %

El motor del DEFRAC se acopló a un reductor de velocidad y éste a su vez a un volante motriz de 164 dientes, mediante un piñón de 15 dientes ubicado en la flecha de salida del reductor de velocidad, con lo que se logró una razón de reducción de 10.93 : 1. El volante motriz se unió a la flecha de giro de la estructura de soporte del sistema óptico de concentración del DEFRAC. En la tabla A1.4 se muestran las características del reductor de velocidad.

Tabla A1.4 Especificaciones técnicas del reductor de velocidad.

Tipo	Corona - Tornillo sinfín
Razón de reducción	100 : 1
Angulo entre ejes	90 grados
Diámetro de entrada	1/2"
Diámetro de salida	1/2"

Para definir la velocidad a la cual debía operar el motor del DEFRAC, se multiplicó el valor de la razón de reducción de cada reductor y luego por la velocidad angular a la que debía girar la estructura del sistema óptico de concentración, que fue de  $6.94 \times 10^{-4} \text{ rev./min}$ , dando un valor de  $140.84 \text{ rev./min}$ . En la figura A1.1 se muestra un esquema del sistema de seguimiento del DEFRAC.

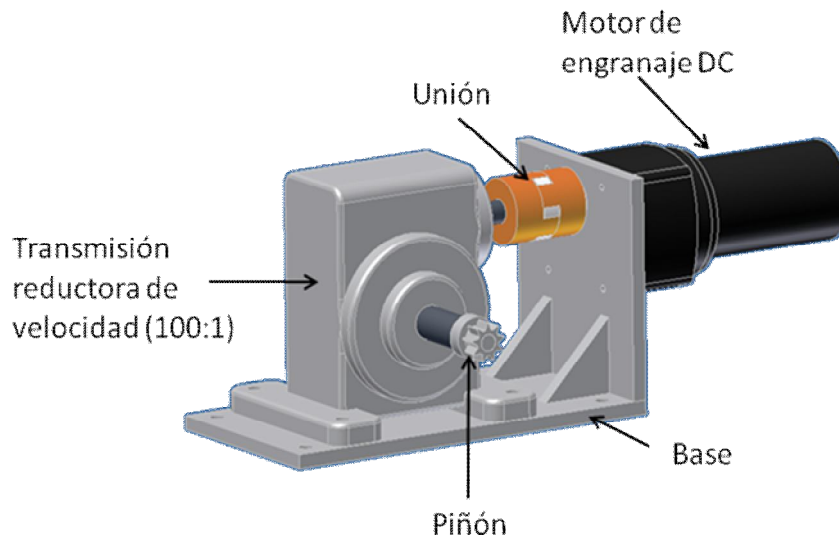
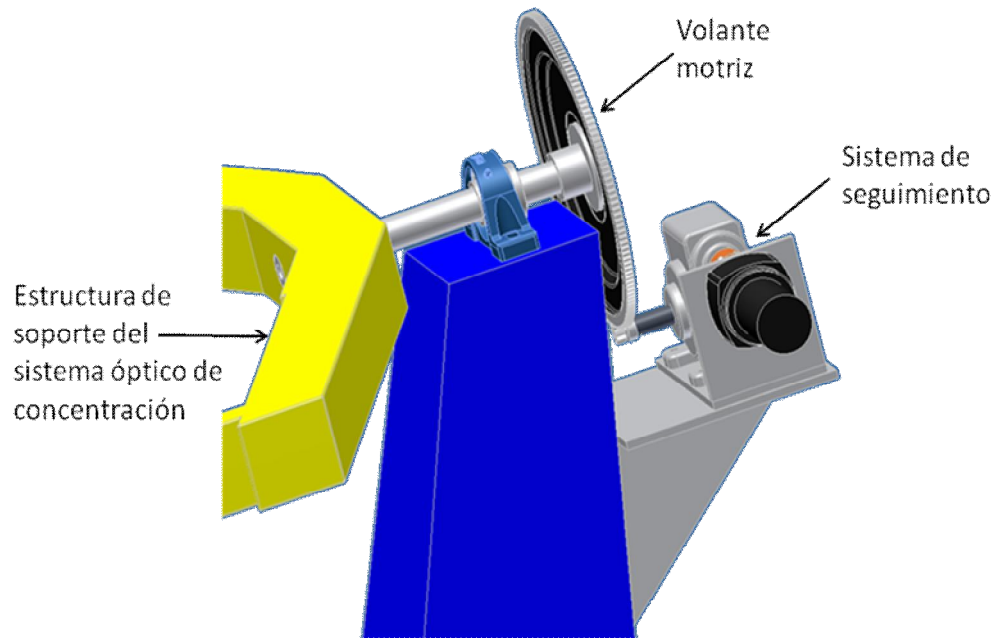


Figura A1.1. Esquema del sistema de seguimiento del DEFRAC.

Para soportar y sujetar el sistema de seguimiento del DEFRAC, se diseñó una base que se soldó en la torre superior del DEFRAC. En la figura A1.2 se muestra un esquema del sistema de seguimiento del DEFRAC, montado en su base.



*Figura A1.2. Esquema del sistema de seguimiento montado y acoplado en el DEFRAC.*

Con las modificaciones que se le hicieron al sistema de seguimiento del DEFRAC, se logró reducir mediante el volante motriz, el esfuerzo que se tenía en la unión de la flecha del reductor de velocidad y la flecha de giro de la estructura de soporte el sistema óptico de concentración y mediante el motor de corriente directa, se eliminó la intermitencia que se tenía en el seguimiento con el servomotor.

## Apéndice A2

# Programa de la transferencia de calor diseñado en MatLab

```
PROGRAMA: "MODELO DEL GENERADOR TERMOELECTRICO"
% SOLUCION NUMERICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO PERMANENTE

% PARAMETROS GEOMETRIA

    Ro = [0.0126]; % [R1] (m)
    Zo = [0.00400,0.00500,0.00700,0.00800,0.01300]; %
[Z1,Z2,Z3,Z4,Z5] (m)
    IR = [126]; % [A] Nodos [R
disco]
    JZ = [40,50,70,80,130]; % [B,C,D,E]
Nodos [z cobre, z alum_sup, z bite, z alum_inf, z cobre]

    DELTR = Ro(1)/(IR(1));
    DELTZ = Zo(5)/(JZ(5));

% PARAMETROS FISICOS.

    K = [401,25,2.5,25,401]; % conductividad
térmica [cu,al,bite,al,cu] (W/m K) [1,2,3,4,5]

% Coeficiente convectivo y temperaturas iniciales

    Hf = 1000;
    Ta = 25.0 + 273.0;
    Tf = 22.0 + 273.0;
    To = Ta;
```

```

% INICIALIZACION, R(i), Z(j), TN(i,j)

    i=1:IR(1);
    R=DELTR.*(i);

    j=1:JZ(5);
    Z=DELTZ.*(j);

    TN_OLD(i,j)=zeros(IR(1),JZ(5))+To;

% Radiación incidente

    Qin = 196;

    Qo = (Qin/0.00050176)*(ones(126,1));

% Coeficiente global de perdidas

    Ql = 59;

    Ul = (Ql/0.00050176)*(ones(126,1));

% VARIABLES INTERNAS

    GAMA1=2*DELTR/K(1);
    GAMA5=2*DELTR/K(5);
    Kint1=K(1)+K(2)/2;
    Kint2=K(2)+K(3)/2;
    Kint3=K(3)+K(4)/2;
    Kint4=K(4)+K(5)/2;

for n = 1:10000000

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DISCO DE COBRE SUPERIOR %%%%%%%%%%%%%%

    % NODOS CENTRALES

    i = 2:IR(1)-1;
    j = 2:JZ(1)-1;

    vec_J=length(j);
    mat_i = [i]'*ones(1, vec_J);

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);

```

```

    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) = ((1+(1./(2.*mat_i))).*TN_IP_J+(1-
(1./(2.*mat_i))).*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

    % NODOS DE ORILLA SUPERIOR

    i = 2:IR(1)-1;
    j = 1;

    mat_i = [i]';

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);

    TN(i,j) = (TN_IP_J.*(1+(1./(2.*mat_i)))+TN_IN_J.*(1-
(1./(2.*mat_i)))+2.*(TN_I_JP+GAMA1.*(Qo(i,j)-Ul(i,j))))./4;

    % NODOS DE ORILLA DERECHA

    i = IR(1);
    j = 2:JZ(1)-1;

    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) = (2*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

    % NODOS DE ORILLA IZQUIERDA

    i = 1;
    j = 2:(JZ(1)-1);

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) = (2*TN_IP_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

    % NODO ESQUINA SUPERIOR IZQUIERDA

    i = 1;
    j = 1;

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);

```

```

    TN(i,j) = (TN_IP_J+TN_I_JP-
(GAMA1/2).*U1(i,j)+Qo(i,j).*(GAMA1/2))./2;

% NODO ESQUINA SUPERIOR DERECHA

    i = IR(1);
    j = 1;

    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);

    TN(i,j) = (TN_IN_J+TN_I_JP-
(GAMA1/2).*U1(i,j)+Qo(i,j).*(GAMA1/2))./2;

% NODOS DE INTERFAZ 1

    i = 2:IR(1)-1;
    j = JZ(1);

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) =
(K(1)*TN_I_JN+K(2)*TN_I_JP+Kint1.*(TN_IP_J+TN_IN_J))./(K(1)+K(2)+2*Kint1)
;

% NODO ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA

    i = 1;
    j = JZ(1);

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) =
(2*Kint1*TN_IP_J+K(1)*TN_I_JN+K(2)*TN_I_JP)./(K(1)+K(2)+2*Kint1);

% NODO ESQUINA INFERIOR DERECHA

    i = IR(1);
    j = JZ(1);

    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) =
(2*Kint1*TN_IN_J+K(1)*TN_I_JN+K(2)*TN_I_JP)./(K(1)+K(2)+2*Kint1);

```



```

%%%%%%%%% ALUMINA SUPERIOR %%%%%%%%%%

% NODOS CENTRALES

i = 2:IR(1)-1;
j = JZ(1)+1:JZ(2)-1;

vec_J=length(j);
mat_i = [i]'*ones(1, vec_J);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1, j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1, j);
TN_I_JP = TN_OLD(i, j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i, j-1);

TN(i, j) = ((1+(1./(2.*mat_i))).*TN_IP_J+(1-
(1./(2.*mat_i))).*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE ORILLA DERECHA

i = IR(1);
j = JZ(1)+1:JZ(2)-1;

TN_IN_J = TN_OLD(i-1, j);
TN_I_JP = TN_OLD(i, j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i, j-1);

TN(i, j) = (2*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE ORILLA IZQUIERDA

i = 1;
j = JZ(1)+1:JZ(2)-1;

TN_IP_J = TN_OLD(i+1, j);
TN_I_JP = TN_OLD(i, j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i, j-1);

TN(i, j) = (2*TN_IP_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE INTERFAZ 2

i = 2:IR(1)-1;
j = JZ(2);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1, j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1, j);
TN_I_JP = TN_OLD(i, j+1);

```

```

    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) =
(K(2)*TN_I_JN+K(3)*TN_I_JP+Kint2.*(TN_IP_J+TN_IN_J))./(K(2)+K(3)+2*Kint2)
;

% NODO ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA

i = 1;
j = JZ(2);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(2*Kint2*TN_IP_J+K(2)*TN_I_JN+K(3)*TN_I_JP)./(K(2)+K(3)+2*Kint2);

% NODO ESQUINA INFERIOR DERECHA

i = IR(1);
j = JZ(2);

TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(2*Kint2*TN_IN_J+K(2)*TN_I_JN+K(3)*TN_I_JP)./(K(2)+K(3)+2*Kint2);

%%%%%%%% TELURIO DE BISMUTO %%%%%%%%%

% NODOS CENTRALES

i = 2:IR(1)-1;
j = JZ(2)+1:JZ(3)-1;

vec_J=length(j);
mat_i = [i]'*ones(1, vec_J);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) = ((1+(1./(2.*mat_i))).*TN_IP_J+(1-
(1./(2.*mat_i))).*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

```

---

```

% NODOS DE ORILLA DERECHA

i = IR(1);
j = JZ(2)+1:JZ(3)-1;

TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) = (2*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE ORILLA IZQUIERDA

i = 1;
j = JZ(2)+1:JZ(3)-1;

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) = (2*TN_IP_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE INTERFAZ 3

i = 2:IR(1)-1;
j = JZ(3);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(K(3)*TN_I_JN+K(4)*TN_I_JP+Kint3.*(TN_IP_J+TN_IN_J))./(K(3)+K(4)+2*Kint3)
;

% NODO ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA

i = 1;
j = JZ(3);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(2*Kint3*TN_IP_J+K(3)*TN_I_JN+K(4)*TN_I_JP)./(K(3)+K(4)+2*Kint3);

% NODO ESQUINA INFERIOR DERECHA

i = IR(1);
j = JZ(3);

```

---

```

TN_IN_J    = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP    = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN    = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(2*Kint3*TN_IN_J+K(3)*TN_I_JN+K(4)*TN_I_JP)./(K(3)+K(4)+2*Kint3);

%%%%%%%%% ALUMINA INFERIOR %%%%%%%%%%

% NODOS CENTRALES

i    =    2:IR(1)-1;
j    =    JZ(3)+1:JZ(4)-1;

vec_J=length(j);
mat_i = [i]'*ones(1, vec_J);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) = ((1+(1./(2.*mat_i))).*TN_IP_J+(1-
(1./(2.*mat_i))).*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE ORILLA DERECHA

i    =    IR(1);
j    =    JZ(3)+1:JZ(4)-1;

TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) = (2*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE ORILLA IZQUIERDA

i    =    1;
j    =    JZ(3)+1:JZ(4)-1;

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) = (2*TN_IP_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

% NODOS DE INTERFAZ 4

```

```

i = 2:IR(1)-1;
j = JZ(4);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(K(4)*TN_I_JN+K(5)*TN_I_JP+Kint4.*(TN_IP_J+TN_IN_J))./(K(4)+K(5)+2*Kint4)
;

% NODO ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA

i = 1;
j = JZ(4);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(2*Kint4*TN_IP_J+K(4)*TN_I_JN+K(5)*TN_I_JP)./(K(4)+K(5)+2*Kint4);

% NODO ESQUINA INFERIOR DERECHA

i = IR(1);
j = JZ(4);

TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j) =
(2*Kint4*TN_IN_J+K(4)*TN_I_JN+K(5)*TN_I_JP)./(K(4)+K(5)+2*Kint4);

%%%%%%%% DISCO DE COBRE INFERIOR %%%%%%%%%

% NODOS CENTRALES

i = 2:IR(1)-1;
j = JZ(4)+1:JZ(5)-1;

vec_J=length(j);
mat_i = [i]'*ones(1, vec_J);

TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

```

```

    TN(i,j) = ((1+(1./(2.*mat_i))).*TN_IP_J+(1-
(1./(2.*mat_i))).*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

    % NODOS DE ORILLA DERECHA

    i = IR(1);
    j = JZ(4)+1:JZ(5)-1;

    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) = (2*TN_IN_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

    % NODOS DE ORILLA IZQUIERDA

    i = 1;
    j = JZ(4)+1:JZ(5)-1;

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_I_JP = TN_OLD(i,j+1);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) = (2*TN_IP_J+TN_I_JP+TN_I_JN)./4;

    % NODOS DE ORILLA INFERIOR

    i = 2:IR(1)-1;
    j = JZ(5);

    mat_i = [i]';

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    A=TN_IP_J.*(1+(1./(2.*mat_i)))+TN_IN_J.*(1-(1./(2.*mat_i)));

    TN(i,j) = (A+2.*TN_I_JN+GAMA5*Hf*Tf)./(GAMA5*Hf+4);

    % NODO ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA

    i = 1;
    j = JZ(5);

    TN_IP_J = TN_OLD(i+1,j);
    TN_I_JN = TN_OLD(i,j-1);

    TN(i,j) = (TN_IP_J+TN_I_JN+Hf*Tf*GAMA5/2)./(2+Hf*GAMA5/2);

    % NODO ESQUINA INFERIOR DERECHA

```

```
i = IR(1);
j = JZ(5);

TN_IN_J = TN_OLD(i-1,j);
TN_I_J   = TN_OLD(i,j);
TN_I_JN  = TN_OLD(i,j-1);

TN(i,j)  = (TN_IN_J+TN_I_JN+Hf*Tf*GAMA5/2)./(2+Hf*GAMA5/2);

TN_OLD=TN;

DT2(n)=TN(1,1)-TN(IR(1),JZ(5));

fprintf('%d,%f\n',n,DT2(n));

%FINAL

end

T=flipud(TN);
T=[T;TN];
T=rot90(T);
```