

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD QUERETARO

**Desarrollo e investigación de sistemas híbridos de
generación de energía renovable**

Tesis que presenta

Francisco Javier Willars Rodríguez

Para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

En la Especialidad de
Materiales

Directores de Tesis:

Dr. Yurii Vorobiov Vasilievitch
Dr. Pavel Vorobiev

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
LIBROS**

Santiago de Querétaro, Qro.

Marzo 2015

CLASSIF. 20 07258
DATE 20-273-281
ECLA. 22-06-2019
PROCED. Don-2019

224334-1001

A mis padres: Antonio Willars Alcocer y Ma. Del Carmen Rodríguez Nabor.

A mis abuelos: Juan Rodríguez Delgado, María Nabor Hernández, Pedro Willars Martínez y Luz Alcocer Oviedo.

A mis hermanos: José Antonio Willars Rodríguez y Emmanuel Willars Rodríguez.

A Sofía y a mis amigos.

Agradecimientos:

A CONACYT por el apoyo económico brindado para mi manutención, mediante la beca número 488662.

A Dios, por permitirme llegar a este punto de mi vida.

A mis padres, por su amor, esfuerzo, por darme lo mejor de ellos, por su apoyo incondicional y ayudarme a ser la persona que soy hoy día.

A mis hermanos, por su cariño y apoyo incondicional.

Al Dr. Francisco Javier Espinoza Beltrán, por su confianza, apoyo y consejos.

Al Dr. Yurii Vorobiov, por su apoyo y sobre todo por su paciencia.

Al Dr. Pavel Vorobiev, por su apoyo para la realización de este trabajo y por sus comentarios atinados.

Al Dr. Juan Francisco Pérez Robles por su apoyo y sus atinados comentarios.

Al Dr. Rafael Ramírez Bon por su apoyo en la realización de este trabajo.

Al personal del CINVESTAV Querétaro, por sus consejos y dedicación al momento de enseñar.

Y por último y no menos importante a mis amigos y compañeros por su ayuda y demás cualidades que no puedo expresar con palabras.

Al Dr. Edgar Arturo Chávez Urbiola por su apoyo.

Al M.C. Iker Chávez Urbiola por su apoyo.

Contenido

Lista de figuras.....	4
Resumen	7
Abstract	8
Hipótesis	9
Justificación	9
Metodología experimental.....	9
Objetivo general	10
Objetivos particulares.....	10
Capítulo 1.....	11
Panorama mundial de las nuevas fuentes de energía renovable.	11
La gran transición energética	11
El consumo mundial de las fuentes renovables y su papel en la generación de energía eléctrica	11
Fuentes de energías renovables.....	13
Pero ¿qué es la energía?.....	13
Capítulo 2.....	16
Energía solar	16
El sol.....	16
Potencia y distribución espectral de la radiación solar	17
Geometría Sol-Tierra	20
¿Qué es la energía solar térmica?	21
¿Qué aplicaciones tiene la energía solar térmica?.....	21
Clasificación de los colectores solares según su factor de concentración	21
Sin concentración $C=1$	22
Con concentración, $C>1$	25
Energía solar fotovoltaica	26
Interacción de la radiación con la materia	26
Unión PN.....	27
Ecuaciones de las celdas solares	28
Potencia máxima y factor de llenado	29
Capítulo 3.....	31
La energía alternativa en México	31

Capítulo 4.....	33
Efecto termoeléctrico.....	33
Efecto Seebeck.....	33
Efecto Peltier	34
Efecto Thomson.....	34
Figura de Mérito	34
Aplicaciones de los generadores termoeléctricos (TEG).....	36
Mediciones sobre TEG1.....	39
Pasta térmica comercial marca Steren.....	39
Pasta conductora Manhattan.....	40
Pasta térmica Cooler Master IceFusion.....	41
Mediciones sobre TEG2.....	42
Pasta térmica comercial marca Steren.....	42
Pasta conductora Manhattan.....	43
Pasta térmica Cooler Master IceFusion.....	44
Mediciones sobre TEG3.....	45
Pasta térmica comercial marca Steren.....	45
Pasta conductora Manhattan.....	45
Pasta térmica Cooler Master IceFusion.....	46
Método de elemento finito (FEM).....	46
Simulación mediante el método de elemento finito del fenómeno termoeléctrico	46
Resultados	47
Capítulo 5.....	56
Celdas solares	56
Capítulo 6.....	59
Teoría para el diseño de calentador de agua	59
Balance de energía en el calentador solar.....	59
Circulación natural del agua en el calentador solar	60
Cálculo de pérdidas y el coeficiente de convección.....	61
Estimación del coeficiente de convección.....	63
Capítulo 7.....	67
Sistema híbrido Fotovoltaico-TEG-Térmico.....	67
Resultados experimentales	68

Discusión de resultados.....	72
Conclusiones.....	73
Capítulo 8.....	74
Películas selectivas delgadas cerámicas /poliméricas.....	74
Resumen.....	74
Introducción.....	74
Recubrimientos SOL-GEL.....	74
Proceso sol-gel.....	75
Desarrollo experimental.....	76
Síntesis por sol-gel de SiO ₂ híbrida.....	77
Preparación del sustrato.....	77
Preparación de la tinta.....	77
Deposición del recubrimiento “dip-coating”.....	78
Tratamiento térmico.....	78
Caracterización del recubrimiento.....	78
Síntesis por sol-gel de solución coloidal.....	78
Preparación del sustrato.....	78
Generación del material.....	78
Preparación de la tinta.....	79
Deposición del recubrimiento “dip-coating”.....	79
Tratamiento térmico.....	79
Caracterización del recubrimiento.....	79
Resultados.....	79
Caracterización del recubrimiento sol-gel de SiO ₂ híbrida.....	79
Caracterización del sol-gel de la solución coloidal.....	82
Discusión de resultados.....	84
Conclusiones.....	84
Capítulo 9.....	85
Perspectivas futuras y conclusiones.....	85
Anexo 1.....	87
Anexo 2.....	93
Trabajos presentados.....	93
Bibliografía.....	94

Lista de figuras

Figura 1 Participación energética a nivel mundial desde 1850 a 2100, medida en porcentaje [2] ..	12
Figura 2 Producción mundial de energía en el año 2011, la producción energética en el 2011 fue de 19 Bill kWh.....	12
Figura 3 Tasa de crecimiento de la capacidad global de producción de energía renovable, 2006-2011 en porcentaje [4]	13
Figura 4 Estructura del sol (no se encuentra a escala el esquema) [8]	17
Figura 5 Radio solar y la distancia de Sol-Tierra [8].....	18
Figura 6 Se muestra el espectro solar llamado masa de aire cero (Air Mass Zero AM0) el cual es aproximadamente la radiación de un cuerpo negro a 6000 K. También se observan los espectros solares AM1 y AM1.5.....	19
Figura 7 Posición de la Tierra en los solsticios de invierno y verano en los equinoccios de primavera y otoño, así como el ángulo formado por la línea que une los centros de la tierra y el sol y su proyección sobre el ecuador a este ángulo se le llama plano de la elíptica y está representado por la letra griega δ . [8]	20
Figura 8 Variación de la irradiancia extraterrestre en una superficie normal calculada por la expansión de Fourier (curva gruesa) y por la ecuación de aproximación (curva delgada).	21
Figura 9 En la figura se observan 2 tipos de calentadores solares en la figura 9a se observa un colector solar de baja temperatura, en la figura 9b se tienen un calentador con tubos de vacío.....	23
Figura 10 Sistemas solares con concentración solar, en la figura 10a se observa un sistema cilindro parabólico, en 10b se muestra un sistema de Fresnel, en 10c se muestra un sistema de torre de potencia solar y en la figura 10d se observa un sistema de disco parabólico o disco Stirling.	25
Figura 11 La separación de los huecos y electrones en una celda solar. (a) Los fotones incidentes generan pares electrón-hueco. El campo eléctrico integrado en la región de transición está apuntando hacia la región de tipo p. Los electrones, con carga negativa, son arrastrados por el campo en la región de tipo n. Mediante la conexión de los dos terminales, se genera una corriente eléctrica. La corriente de cortocircuito se determina por la tasa de generación de par electrón-hueco de la radiación. (b) Si los terminales no están conectados, los electrones migran a la región de tipo n se acumulan y se construye una tensión a través de la capacitancia de la unión. En el equilibrio, se establece un voltaje de circuito abierto [12].....	28
Figura 12 Circuito equivalente de la celda solar. Una celda solar puede ser representada por una fuente de corriente conectado en paralelo con un diodo de unión pn. La fuente de corriente es la fotocorriente generada por la luz solar entrante [12].	28
Figura 13 Potencia máxima y factor de llenado. El punto máximo de potencia ocurre cuando $P_{max} = I_{mp}V_{mp}$	29
Figura 14 Esquema de un termopar	33
Figura 15 Diagrama representativo de un ciclo de Carnot	35
Figura 16 Generación termoeléctrica por efecto Seebeck.....	35
Figura 17 Esquema del ensamble del dispositivo construido [47].	37
Figura 18 Esquema del ensamble del dispositivo final.....	38
Figura 19 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura.	39

Figura 20 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura.	39
Figura 21 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura (Manhattan).	40
Figura 22 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura (Manhattan).	40
Figura 23 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura (Cooler Master IceFusion)	41
Figura 24 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura (Cooler Master IceFusion)	41
Figura 25 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura aplicado al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Steren.	42
Figura 26 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Steren.	42
Figura 27 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura aplicado al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Manhattan	43
Figura 28 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Manhattan.	43
Figura 29 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura aplicado al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.	44
Figura 30 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.	44
Figura 31 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG 3.	45
Figura 32 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 56-3075 con pasta térmica Manhattan.	45
Figura 33 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 56-3075 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.	46
Figura 34 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG TMG 127-1.4-2.5 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.	48
Figura 35 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 56-3075 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.	48
Figura 36 Gráfica de coeficiente de Seebeck contra temperatura.	49
Figura 37 Gráfica de conductividad térmica contra temperatura.	49
Figura 38 Gráfica de conductividad eléctrica contra temperatura.	50
Figura 39 Gráfica del número adimensional ZT contra la temperatura.	50
Figura 40 Gráfica de la eficiencia del TEG contra la temperatura, en donde se grafican la eficiencia teórica, la eficiencia óptima, la máxima eficiencia y la eficiencia debida a las diferentes pastas térmicas.	51
Figura 41 Gráfica de eficiencia del generador termoeléctrico contra el gradiente térmico generado.	51
Figura 42 Gráfica de eficiencia contra gradiente térmico.	52
Figura 43 Elemento termoeléctrico sometido a una diferencia de temperatura de 150°C evaluado en "COMSOL Multiphysics 4.4".	52

Figura 44 Potencial eléctrico que arroja el “COMSOL Multiphysics 4.4”	53
Figura 45 Elemento termoelectrico sometido a una diferencia de temperatura de 250°C.....	53
Figura 46 Potencial eléctrico de salida de un elemento termoelectrico.....	53
Figura 47 Representación 3D de diversos elementos termoelectricos acoplados en serie evaluados con una diferencia térmica de 170°C, evaluado en “COMSOL Multiphysics 4.4”	54
Figura 48 Potencial eléctrico de salida de un dispositivo termoelectrico de base Bi_2Te_3	54
Figura 49 Potencial eléctrico de salida de un dispositivo termoelectrico de base PdTe.	54
Figura 50 Gráficas de la potencia de salida de una celda solar contra el voltaje de la celda y la corriente de salida contra el voltaje generado por la celda solar.	56
Figura 51 Corriente de la celda solar y la potencia de salida.	56
Figura 52 Representación de la velocidad del aire a través de las celdas solares generado en “COMSOL 4.4”	57
Figura 53 Distribución térmica a lo largo de las celdas solares.....	57
Figura 54 Distribución del viento a través de las celdas solares.	58
Figura 55 Pérdidas térmicas debido a diversos factores.	60
Figura 56 Diagrama esquemático del sistema de termosifón.....	60
Figura 57 Modelo MEF del intercambiador de calor, en diferentes configuraciones.....	66
Figura 58 Diferentes vistas del prototipo híbrido solar.....	67
Figura 59 Modelo MEF a detalle de la tubería del intercambiador de calor.....	68
Figura 60 Gráfico de la potencia eléctrica generada contra el tiempo de los elementos del sistema híbrido solar.....	69
Figura 61 Gráfico de la potencia eléctrica generada contra el tiempo de los elementos del sistema híbrido solar.....	69
Figura 62 Temperatura del agua y del ambiente a lo largo del día.....	70
Figura 63 Temperatura del agua y del ambiente a lo largo del día.....	71
Figura 64 Proceso sol-gel para la preparación de vidrios a partir de soluciones coloidales	75
Figura 65 Proceso sol-gel para preparación de vidrios a partir de compuestos metalorgánicos	76
Figura 66 Diagrama de bloques del desarrollo experimental para los experimentos realizados.	77
Figura 67 Reflexión de diferentes películas.....	80
Figura 68 Transmisión de distintas configuraciones de recubrimientos.....	80
Ilustración 69 Micrografía SEM del recubrimiento híbrido con un 25% de PVA, se observan grietas dentro de la estructura del recubrimiento.....	81
Figura 70 Micrografía SEM del recubrimiento híbrido con un 50% de PVA.....	82
Figura 71 Reflexión de diferentes películas.....	82
Figura 72 Transmisión de distintas configuraciones de recubrimientos.....	83
Figura 73 Micrografía SEM del recubrimiento generado con sílice coloidal.....	83

Resumen

Se ha realizado la investigación, desarrollo y simulación de un sistema híbrido fotovoltaico-termo-eléctrico para la producción de energía térmica y eléctrica, diseñado y construido partiendo de una unidad de concentración solar (lente de Fresnel). Adicionalmente se realizó el estudio de dos recubrimientos selectivos solares para la implementación en este tipo de sistemas.

Para el diseño y posterior construcción del sistema híbrido se recurrió a la herramienta computacional de simulado por elemento finito (MEF), herramienta que ayudo a optimizar los parámetros de diseño. Con la optimización realizada se procedió a construir el prototipo manteniendo el costo lo asequible posible.

Nuestro sistema híbrido tiene dos zonas térmicas: una de baja temperatura menor a los 100°C, zona de trabajo de las celdas fotovoltaicas y otra región de media temperatura que supera los 300°C, donde esta implementado el concentrador térmico.

Los resultados experimentales arrojan que nuestro sistema alcanza una eficiencia total superior a los 45% y produce más de 100 Watts en las mediciones realizadas en los meses de junio y julio, en las mediciones en los meses de diciembre y enero el equipo alcanzo una eficiencia del 40%. La energía producida por este prototipo podría ser empleada en aplicaciones domésticas y en aplicaciones rurales donde la demanda energética es baja respecto al consumo ciudadano.

Con el objetivo de desarrollar recubrimientos selectivos solares fueron realizadas diferentes películas cerámicas a las cuales se les añadió una "tinta" como colorante.

Se realizó la caracterización óptica y morfológica de las películas y se observó que las películas híbridas pueden ser aplicadas en concentradores solares de baja temperatura, ya que tienen un 5% de reflexión y 70% de absorbanca de la parte del color en el espectro solar. Los recubrimientos coloidales muestran buena estabilidad térmica por lo que pueden ser ocupados como capas protectoras térmicas en dispositivos solares en donde la temperatura no exceda los 400°C.

Abstract

The research, development and simulation was performed of a photovoltaic-thermo-electric hybrid system for the production of thermal and electric power, designed and built starting from a unit of solar concentrator (Fresnel lens). Additionally, the study was performed of two solar selective coatings for the implementation in this type of systems.

For the design and subsequent construction of the hybrid system there was implemented a computational tool simulation by finite element (FEM), tool that helped to optimize the design parameters. With the optimization performed we proceeded to build the prototype keeping the cost as affordable as possible.

Our hybrid system has two thermal zones: one low temperature region whose temperature is less than 100°C, an operating range of photovoltaic cells and a region of medium temperature that exceeds 300 °C, an area where the thermal concentrator is implemented.

The experimental results show that our system achieves an overall efficiency greater than 45% and produces more than 100 Watts in measurements made in the months of June and July, while during the months of December and January the equipment reached an efficiency of 40%. The energy produced by this prototype could be used in domestic applications and rural applications where energy demand is low compared to the urban consumption.

Aiming to develop selective solar coatings different ceramic films were prepared with an added "ink" as colorant.

During optical and morphological characteristics of the films it was observed that the hybrid films can be applied to low temperature solar concentrators, since they have a 5% reflection and 70% absorbance index in the color part of solar spectrum. Colloidal coatings show good thermal stability and can therefore be employed as protective coatings for solar thermal devices where the temperature does not exceed 400 ° C.

Hipótesis

Es posible desarrollar un sistema híbrido de bajo costo el cual provea energía eléctrica y térmica (agua caliente), dirigido a comunidades carentes de estos recursos energéticos. El sistema tiene que presentar una eficiencia mayor al 40% debido a la eficiencia de los elementos que conforman al sistema híbrido.

Justificación

El proyecto está orientado al posicionamiento de un sistema híbrido de generación de energía limpia, sustentable y económica. Debido a que las necesidades energéticas en el país y a nivel mundial se incrementan día a día por diversos factores. El precio y el consumo de energía se ha incrementado en todo el mundo.

El consumo mundial de energía primaria creció un 2.3% en 2013, debajo de la media del 2.6% de los últimos diez años. El petróleo continúa siendo el principal combustible, con un 33.1% del consumo mundial de energía, aunque sigue perdiendo mercado por 14° año consecutivo y su actual cuota de mercado es la más baja que se ha registrado desde que la empresa BP comenzó la recopilación de datos en 1965 [1].

La producción mundial de petróleo aumentó 1.9 millones de barriles diarios o el 2.2% y la mezcla Dated Brent alcanzo una media de 116.67 USD por barril en el año 2012, un aumento de 0.4 USD por barril respecto a 2011 [1], combustibles como el carbón y el gas natural aumentaron en 2.5% respecto al año 2012 [2].

Es debido al agotamiento y al encarecimiento energético que es fundamental maximizar el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables. También hay que considerar que México es uno de los mejores países en lo que se refiere a recursos energéticos.

Metodología experimental

- **Análisis preliminar:** Consiste en una investigación de material científico como: artículos, tesis y proyectos que estén relacionados con el tema propuesto, con el fin de entender las tendencias previas. Al finalizar el análisis preliminar se espera tener una idea clara de lo que ya existe, lo que ha funcionado, lo que ha fracasado, hacia donde se dirigen las tendencias actuales en el campo de la energía alternativa y en especial en los dispositivos híbridos de generación de energía.
- **Análisis detallado:** Recopilar información y documentación del tema a desarrollar. Estos documentos serán analizados de forma detallada con el fin de delimitar lo más posible nuestro tema a desarrollar. Es además un buen momento para descubrir que avances tecnológicos y de investigación recientes podrían unirse a lo ya planeado para mejorar al máximo o en un futuro la propuesta a desarrollar.
- **Análisis de requerimientos:** una vez delimitada la dirección de nuestro proyecto es tiempo de definir:
 - Los requerimientos de nuestro proyecto
 - Tipo de herramientas que se necesitan para el desarrollo

- Alcances que pretendemos que tenga el proyecto
- **Diseño del prototipo:** en esta etapa se evalúan materiales y costos, así como metodologías de optimización del prototipo a desarrollar, esta metodología incluiría el diseño, planeación de construcción, etc.
- **Desarrollo y construcción del prototipo:** fase de construcción, y evaluación del diseño propuesto.
- **Evaluación:** en esta etapa se utilizará el prototipo y se evaluará la parte experimental, en donde se comprobará la eficiencia del equipo.
 - Realizar la simulación por elemento finito del concentrador solar.
 - Realizar simulación de elementos termoeléctricos.
 - Caracterización de la eficiencia de los generadores termoeléctricos (TEG).
 - Caracterización de las celdas fotovoltaicas.
 - Caracterización del desempeño del equipo en diferentes condiciones climáticas.

Objetivo general

- Realizar la investigación, diseño y construcción de un prototipo híbrido fotovoltaico-térmico-eléctrico el cual pueda generar energía térmica-eléctrica.

Objetivos particulares

- Analizar la literatura científica, con el fin de conocer un panorama sobre los trabajos realizados en sistemas híbridos.
- Aumentar el rendimiento de los sistemas que emplean paneles fotovoltaicos.
- Utilizar el calor de desecho en el sistema para calefacción de agua.

Capítulo 1

Panorama mundial de las nuevas fuentes de energía renovable.

En este capítulo se aborda la problemática energética actual que se tiene a nivel mundial en los aspectos de disponibilidad futura de las fuentes convencionales de energía, así como los fundamentos teóricos asociados a las energías renovables que se tienen en el mundo.

La gran transición energética

Uno de los aspectos más decisivos en la historia de la humanidad es quizá el descubrimiento y manipulación del fuego, y gracias a él, la humanidad comenzó a manipular y controlar muchos procesos que hasta entonces dependían de factores ajenos al control de la humanidad. Fue entonces que la energía se convirtió en un elemento básico e indispensable en la satisfacción de las necesidades cotidianas, desde las más elementales como lo eran la cocción de alimentos hasta procesos sofisticados que complementan nuestra vida diaria.

Desde nuestra óptica, la energía es entonces ubicua y permanente. Ya que para nuestras necesidades biológicas, sociales, profesionales, dependemos de ella, ya sea desde la ingesta de alimentos, procesos fotovoltaicos, molienda de granos o para nuestro entretenimiento se necesitan cantidades específicas de energía. Y es permanente ya que las actividades pasadas, presentes y futuras están regidas por tres factores, los cuales son: el crecimiento poblacional, el desarrollo económico y el progreso tecnológico que dependen de gran forma de la energía que se tenga.[3]

Otro aspecto decisivo fue la creciente diversificación energética y su abastecimiento. La introducción de la electricidad fue quizá el factor más importante para que esta transición ocurriera, ya que la energía eléctrica puede ser fácilmente convertida en calor, luz, trabajo, etc. Otro factor importante fue el desarrollo y la innovación del motor de combustión interna, el cual ha revolucionado los patrones de transporte individuales y colectivos. Sin embargo esto dio pie a una creciente dependencia de los combustibles fósiles como combustible primario para la satisfacción de energía eléctrica y para el transporte.

La figura 1 muestra el panorama energético mundial a partir de 1850. En esta puede verse de forma clara la sustitución paulatina de la biomasa tradicional por los combustibles fósiles, también se observa el declive gradual del carbón a favor del petróleo y también el surgimiento de otras fuentes energéticas como el gas natural, la energía nuclear. Sin embargo, a pesar del surgimiento de otras fuentes energéticas continuamos viviendo en la era de los combustibles fósiles.

El consumo mundial de las fuentes renovables y su papel en la generación de energía eléctrica

Los cambios sucesivos en la estructura energética mundial ocurrida a lo largo del siglo XX han creado un panorama muy diferente al existente en el siglo XIX, en donde quizá el cambio más dramático ha sido el correspondiente a la participación de las fuentes renovables de energía. De constituir más del 80% de la oferta energética mundial en 1850, los energéticos renovables pasaron a conformar únicamente el 14% de esta oferta para el año 2000.

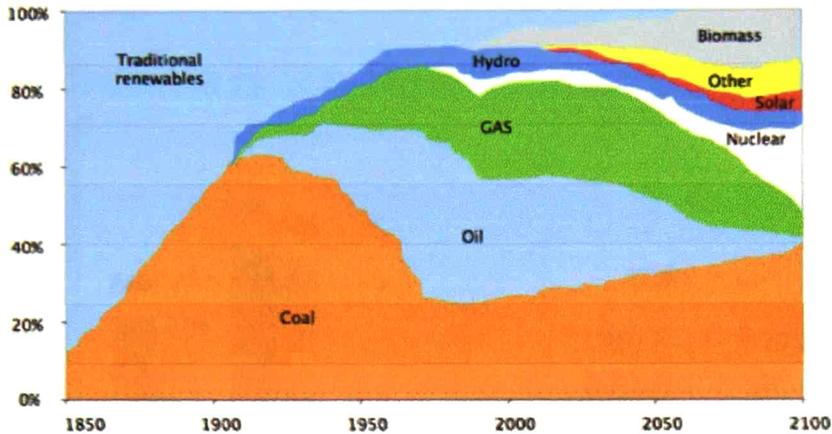


Figura 1 Participación energética a nivel mundial desde 1850 a 2100, medida en porcentaje [2]

Esta reducción tan acentuada a favor de las fuentes fósiles, que en su conjunto representaron el 80.5% de la oferta mundial de energía primaria [2]. El crecimiento de la población mundial se dio junto con importantes cambios en la industrialización, transporte, tecnología. Esto determinó el surgimiento de nuevas y mayores necesidades energéticas que las fuentes tradicionales como la leña ya no podían cubrir a un nivel masivo. Así, se hizo cada vez más necesario recurrir a fuentes energéticas que fuesen más transportables, que contaran con mayor densidad energética, por lo que los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo cubrieron esas necesidades.

También cabe mencionar que algunas regiones del planeta cuentan con recursos energéticos, que por índole estratégica o económica son más eficientes en la producción de electricidad que los recursos petrolíferos. Así, la permanencia de las fuentes renovables de energía en el panorama mundial es un factor que no puede descartarse y que incluso ofrece un gran potencial de crecimiento.

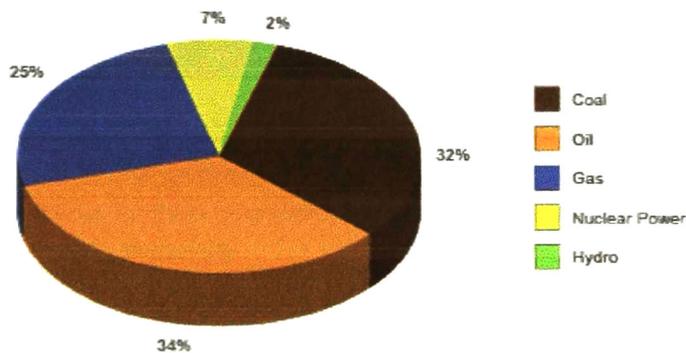


Figura 2 Producción mundial de energía en el año 2011, la producción energética en el 2011 fue de 19 Bill kWh.

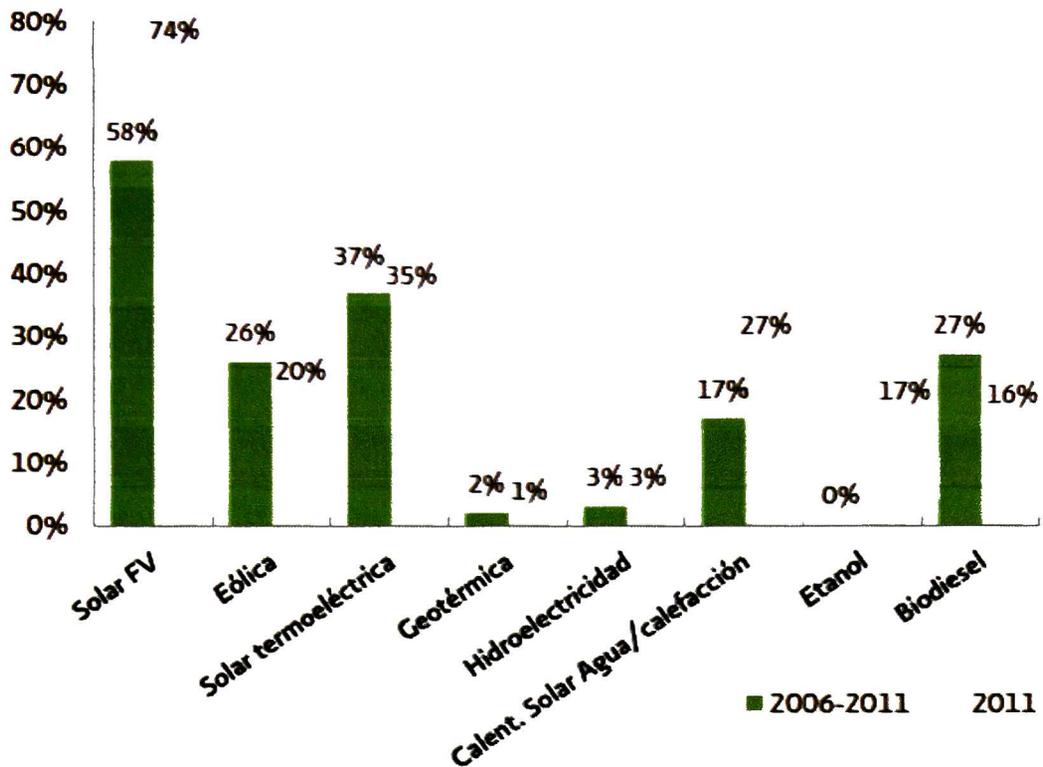


Figura 3 Tasa de crecimiento de la capacidad global de producción de energía renovable, 2006-2011 en porcentaje [4]

Se ha observado que el potencial de crecimiento de las nuevas fuentes renovables de energía (geotérmica, solar, eólica, y otras) en los últimos años se ha incrementado en mayor porcentaje que las fuentes renovables tradicionales.

Fuentes de energías renovables

En lo mostrado hasta ahora en este trabajo, la energía es lo que ha llevado a la humanidad y más preciso a las sociedades a convertirse en lo que son hoy día

Pero ¿qué es la energía?

Para la física, la energía es la capacidad potencial que tienen los cuerpos para producir trabajo o calor, y se manifiesta mediante un cambio. Es energía el esfuerzo que hace una persona cuando pedalea sobre una bicicleta. También lo es el movimiento continuo del agua en un río, o el calor que desprende el carbón cuando se quema.

Se habla de diferentes fuentes de energía. ¿Cuál es la diferencia?

Se habla de dos tipos generales de energía, la energía convencional y la energía renovable.

La energía convencional o energía no renovable es aquella fuente de energía que se encuentra en la naturaleza en cantidades limitadas, las cuales, una vez consumidas en su totalidad, no podrán

sustituirse, ya que no existe sistema de producción o de extracción que obtenga este tipo de recurso energético. A este tipo de energía pertenecen los combustibles fósiles y los combustibles nucleares.

Combustibles fósiles: Término general empleado para designar a los depósitos geológicos de materiales orgánicos combustibles que se encuentran enterrados y que se formaron por la descomposición de plantas y animales que posteriormente fueron convertidos en petróleo, gas natural, carbón, o aceites pesados al estar sometidos al calor y presión de la corteza terrestre durante cientos de millones de años.

Energía nuclear: El núcleo atómico de elementos pesados como el uranio, plutonio, etc. puede ser desintegrado (fisión nuclear) y liberar energía radiante y cinética. Las centrales termonucleares aprovechan esta energía para producir electricidad mediante turbinas de vapor de agua.

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que poseen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la solar, hidráulica, eólica, biomasa, geotérmica y mareomotriz.

Energía solar: La energía solar que recibe nuestro planeta es resultado de un proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el interior del Sol. De toda la energía que produce ese proceso nuestro planeta recibe menos de una milmillonésima parte. Esa energía, que en ocho minutos recorre los más de 145 millones de kilómetros que separan al Sol de la Tierra resulta, sin embargo, una cantidad enorme en proporción al tamaño de nuestro planeta.

La energía solar se manifiesta en un espectro que se compone de radiación ultravioleta, visible e infrarroja. Al llegar a la Tierra, pierde primero su parte ultravioleta, que es absorbida por una capa de ozono que se presenta en el límite superior de la atmósfera. Ya en la atmósfera, la parte infrarroja se pierde ya sea por dispersión al reflejarse en las partículas que en ella se presentan o al llegar a las nubes, que son capaces de reflejar hasta un 80% de la radiación solar que a ellas llega. El resto llega a la superficie, ya sea de manera directa o indirectamente como reflejo de las nubes y partículas en la atmósfera [5].

Energía hidráulica: La energía que llega del sol da lugar, entre otros fenómenos, a la evaporación del agua contenida sobre su superficie, principalmente en los océanos. Esta humedad se acumula en nubes que viajan largas distancias y se deposita en forma de lluvia sobre montañas, muchas alejadas del mar. El agua, acumulada en corrientes y por gravedad, busca de nuevo el mar, formando ríos. Este caudal, que se puede manifestar en grandes caídas o en muchas corrientes, es la fuente de la energía hidroeléctrica.

En muchos casos, esta energía se deposita en forma potencial en embalses y se transforma en energía aprovechable al desplazarse hacia niveles inferiores. El agua en movimiento empuja dispositivos giratorios que la convierten en energía mecánica, o para mover generadores de electricidad. Por ejemplo, para lograr una capacidad de 3,000 kW, que es la suficiente para satisfacer, por ejemplo, 1,000 departamentos, se requiere tener una caída de agua de 100 metros

con un gasto de 3 metros cúbicos por segundo. Esto se logra ampliamente en cualquier zona montañosa del planeta con un régimen regular de lluvias

Energía eólica: Los vientos ocurren por diferencias de presión generadas por un calentamiento no uniforme de la atmósfera terrestre, desplazándose grandes masas de aire de las zonas de alta presión a las de baja.

Aproximadamente el 2% del calor del Sol que llega a la Tierra se convierte en viento, pero sólo una fracción muy pequeña puede ser aprovechada, ya que buena parte de estos vientos ocurre a grandes alturas o sobre los océanos, mar adentro. Además, se requieren condiciones de intensidad y regularidad en el régimen de vientos para poder aprovecharlos. Se considera que vientos con velocidades promedio entre 5.0 y 12.5 metros por segundo son los aprovechables.

El viento contiene energía cinética (de las masas de aire en movimiento) que puede convertirse en energía mecánica o eléctrica por medio de aeroturbinas, las cuales se componen por un arreglo de aspas, generador y torre, principalmente. Las aeroturbinas pueden ser clasificadas, por la posición de su eje, en horizontales y verticales [5].

Biomasa: las plantas acumulan energía a través de la fotosíntesis donde, alimentadas por la energía solar, separan las moléculas de bióxido de carbono, acumulando el carbono en forma de hidrocarburos y soltando el oxígeno. La eficiencia de conversión de energía solar en energía almacenada en forma de materia orgánica (a través de la fotosíntesis) es muy baja, estimándose su límite máximo en cerca de 3%, aunque algunas especies forestales en explotación comercial alcanzan eficiencias de conversión de hasta 1%.

Energía geotérmica: la energía que aprovecha el calor del interior de la tierra.

El término “geotérmico” viene del griego “geo” que significa tierra y “thermos” cuyo significado es calor, literalmente “calor de la tierra”. El interior de la tierra está caliente y la temperatura aumenta con la profundidad. Las capas profundas, están a temperaturas elevadas y, a menudo, a esa profundidad hay capas freáticas en las que se calienta el agua: al ascender, el agua caliente o el vapor producen manifestaciones en la superficie, como los géiseres o las fuentes termales, utilizadas para baños desde la época de los romanos. Actualmente, el progreso en los métodos de perforación y bombeo permiten explotar la energía geotérmica en numerosos lugares del mundo [6].

Energía mareomotriz: El movimiento periódico y alternativo de descenso y ascenso de las aguas del mar, producido por las acciones del sol y de la luna, es lo que se conoce como marea. Es decir, principalmente las mareas se forman por fenómenos astronómicos, pero debido a variables como la desigual superficial del lecho marino, las costas, fenómenos meteorológicos, etc. La intensidad de la marea varía de una locación a otra. En otras palabras la energía mareomotriz es el aprovechamiento que se tiene de las corrientes y mareas mediante medios mecánicos como las turbinas para la producción de energía eléctrica.

Capítulo 2

En este capítulo se hará énfasis a la energía solar que es la base de la mayoría de las energías alternativas, ya que este tipo de energía además de aportar ventajas ambientales y sociales impulsa el crecimiento económico, regional, científico y tecnológico.

Energía solar

El sol

El sol es una esfera gaseosa intensamente caliente con un diámetro de 1.39×10^9 m y, se encuentra a una distancia media de, 1.5×10^{11} m de la tierra. Observado desde la tierra el sol rota sobre su propio eje cada cuatro semanas. Sin embargo su rotación no es como la de un cuerpo solido; el ecuador solar toma alrededor de 27 días y las regiones polares toman alrededor de 30 días para cada rotación.

El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K. La temperatura en las regiones centrales interiores varía de 8×10^6 a 40×10^6 K y la densidad es estimada alrededor de 100 veces la densidad que tiene el agua. El sol, en efecto, es un reactor de fusión continua con sus gases constituyentes como combustible y retenido por fuerzas gravitacionales.

La energía producida en el interior de la esfera solar que se encuentra a millones de grados debe ser transferida primeramente a la superficie y posteriormente radiada al espacio.

Una figura esquemática del sol es mostrada en la figura 4. Y se estima que el 90% de la energía producida por el sol es generada en la región de 0 a $0.23R$ (donde R es el radio del sol) esta zona contiene el 40% de la masa del sol. En una distancia de $0.7R$ desde el centro la temperatura ha descendido hasta los 130000 K al igual que la densidad que tiene un valor de 70 kg/m^3 . La siguiente zona solar que va de los $0.7R$ a R comienza a tener procesos de convección importantes, la temperatura es de alrededor de 5000 K y la densidad es alrededor de 10^{-5} kg/m^3 [7].

La fotosfera es la zona visible donde se emite luz visible del Sol. La fotosfera se considera como la «superficie» solar y, vista a través de un telescopio, se presenta formada por gránulos brillantes que se proyectan sobre un fondo más oscuro. A causa de la agitación de nuestra atmósfera, estos gránulos parecen estar siempre en agitación. Puesto que el Sol es gaseoso, su fotosfera es algo transparente: puede ser observada hasta una profundidad de unos cientos de kilómetros antes de volverse completamente opaca. Normalmente se considera que la fotosfera solar tiene unos 100 o 200 km de profundidad.

Aunque el borde o limbo del Sol aparece bastante nítido en una fotografía o en la imagen solar proyectada con un telescopio, se aprecia fácilmente que el brillo del disco solar disminuye hacia el borde. Este fenómeno de oscurecimiento del centro al limbo es consecuencia de que el Sol es un cuerpo gaseoso con una temperatura que disminuye con la distancia al centro. La luz que se ve en el centro procede en la mayor parte de las capas inferiores de la fotosfera, más caliente y por tanto más luminosa. Al mirar hacia el limbo, la dirección visual del observador es casi tangente al borde del disco solar por lo que llega radiación procedente sobre todo de las capas superiores de la

fotosfera, más fría y emitiendo con menor intensidad que las capas profundas en la base de la fotosfera.

Un fotón tarda un promedio de 10 días desde que surge de la fusión de dos átomos de hidrógeno, en atravesar la zona radiante y un mes en recorrer los 200 000 km de la zona convectiva, empleando tan sólo unos 8 minutos y medio en cruzar la distancia que separa la Tierra del Sol. No se trata de que los fotones viajen más rápidamente ahora, sino que en el exterior del Sol el camino de los fotones no se ve obstaculizado por los continuos cambios, choques, quiebros y turbulencias que experimentaban en el interior del Sol.

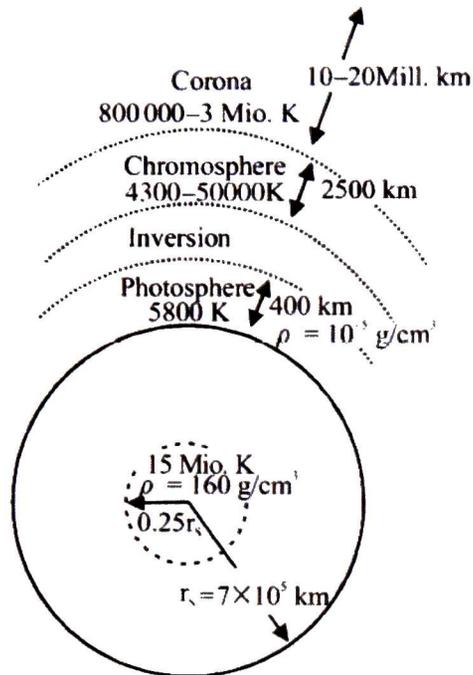


Figura 4 Estructura del sol (no se encuentra a escala el esquema) [8]

Potencia y distribución espectral de la radiación solar

La potencia radiante del sol es el resultado del proceso en donde 4 núcleos de hidrogeno se fusionan en 1 núcleo de helio. Con este proceso existe una pérdida de masa de 4.3 millones de toneladas por segundo, mismos que son transformados en potencia liberada al espacio a razón de $3.845 \times 10^{26} \text{ W}$. Esta energía, lanzadas a temperaturas extremadamente altas ($>10^7 \text{ K}$), es transferida por radiación y convección en la fotosfera exterior.

La fotosfera está compuesta por gases no homogéneos de baja densidad, fuerte mente ionizados que constantemente se recombinan con los electrones libres y cuya energía cinética es transferida en un espectro de irradiancia continua. Sobre ella hay una capa de inversión de cierto espesor (100 km), que contiene casi todos los elementos de la corteza de la tierra. La cromosfera, que consiste en hidrógeno y helio y alrededor de 2500 km de espesor, forma la atmósfera del Sol, junto con la

capa de inversión. La corona, que se expande lejos en el sistema solar, es una capa de gas mucho más caliente que la cromosfera [8].

Si el sol es considerado como un cuerpo negro, una temperatura de irradiación equivalente T_s , puede ser calculada la emisividad radiante específica M , con base a la ley de Stefan-Boltzmann (donde la constante de $\sigma = 5.67051 \times 10^{-8} \text{ (W/(m}^2\text{K}^4))$). La emisividad radiante específica es definida como la relación de la potencia radiante total F y la superficie solar A_s ($6.0874 \times 10^{12} \text{ km}^2$).

$$M(T) = \frac{\Phi}{A_s} = \sigma T_s^4 = \frac{3.845 \times 10^{26} \text{ W}}{6.0874 \times 10^{18} \text{ m}^2} \approx 63.11 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \quad (1)$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{M}{\sigma}} = 5777 \text{ K} \quad (2)$$

Donde M es la emisividad radiante específica [W/m^2], Φ potencia radiante total [W], A_s superficie solar, σ constante de Stefan-Boltzmann $5.67051 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ y T_s temperatura de irradiación equivalente.

La irradiancia de la atmosfera terrestre externa G_{sc} , conocida como la constante solar, puede ser calculada a partir emisividad radiante total del sol (el producto de la emisividad radiante específica y la superficie del sol MA_s), relacionando este factor a un metro cuadrado de la superficie esférica A_{se} , que está formado por el radio de la distancia del sol a la tierra. La distancia media entre el sol y la tierra es $r_0 = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ que es llamada unidad astronómica.

$$G_{sc} = M \frac{A_s}{A_{se}} = M \left(\frac{r_s}{r_0} \right)^2 = 63.11 \left(\frac{6.9598 \times 10^8}{1.4959789 \times 10^{11}} \right)^2 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (3)$$

Donde G_{sc} es la irradiancia de la atmosfera externa [W/m^2], A_{se} superficie esférica terrestre [m^2], r_0 distancia media del sol y la tierra [m] y r_s radio solar [m].

La potencia radiante del sol de $3.845 \times 10^{26} \text{ W}$ es diluida por la relación cuadrada de sus radios r_s y la distancia del sol a la tierra r_0 .

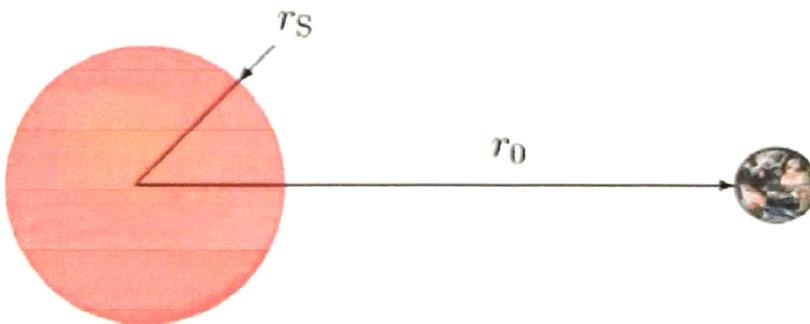


Figura 5 Radio solar y la distancia de Sol-Tierra [8]

La desviación existente entre la distribución espectral de un emisor de cuerpo negro y la irradiancia extraterrestre medida son causadas por la absorción y dispersión en el exterior, en las capas más frías de la fotosfera, que además de hidrogeno y helio contienen aproximadamente 2% en masa de elementos pesados.

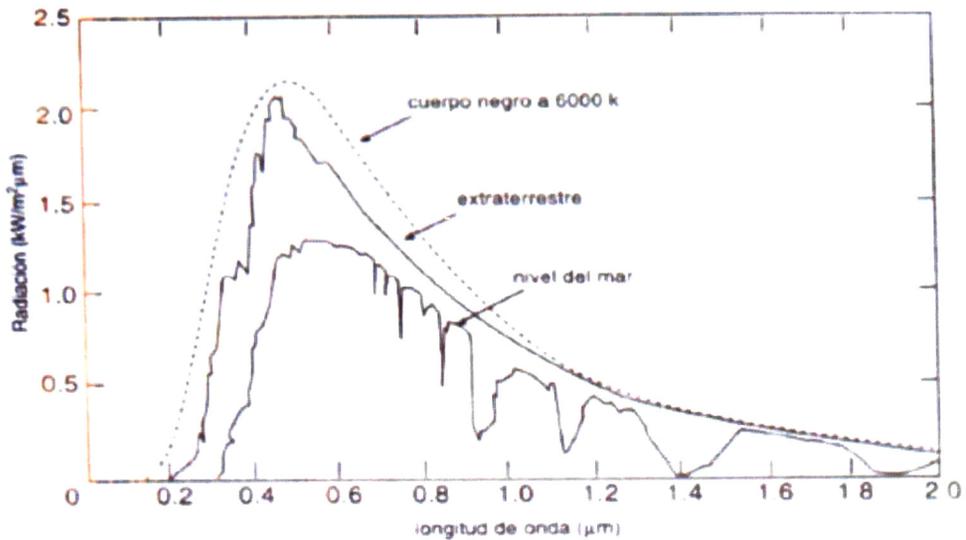


Figura 6 Se muestra el espectro solar llamado masa de aire cero (Air Mass Zero AM0) el cual es aproximadamente la radiación de un cuerpo negro a 6000 K. También se observan los espectros solares AM1 y AM1.5.

La emisividad radiante espectral de un emisor térmico G_λ [$Wm^{-2}\mu^{-2}$] es calculada usando la ley de irradiancia de Plank, como una función de la temperatura T [K] y de la longitud de onda [μm].

$$G_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (4)$$

Donde G_λ es la emisividad radiante espectral [$W/m^2\mu^2$], C_1 y C_2 constantes, λ longitud de onda [μm] y T la temperatura medida en [K].

Con C_1 y C_2 como constantes, $C_1 = 3.7427 \times 10^8$ [$W\mu m^4 m^{-2}$] y $C_2 = 1.4388 \times 10^4$ [$\mu m K$]. A la temperatura superficial del sol de 5777 K el espectro calculado se ilustra en la figura 6. Si la irradiancia extraterrestre es integrada sobre la longitud de onda, la potencia de irradiancia acumulada puede ser calculada. Sólo el 48% de la intensidad de irradiancia está en el rango visible 380-780 nm. La parte que corresponde a <380 nm representa el 6.4% y está en el rango ultravioleta. El resto del espectro solar corresponde a la parte infrarroja y ocupa un 45.6%. Por encima de 3000 nm la irradiancia es insignificante.

La irradiancia que se encuentra por debajo de los 380 nm es aproximadamente 92.6 W/m^2 . El área visible del espectro tiene una potencia total aproximada de 660 W/m^2 , y el resto de la irradiancia total corresponde a la parte del infrarrojo.

Geometría Sol-Tierra

La órbita de la Tierra alrededor del Sol en el llamado plano elíptico es ligeramente elíptico con una distancia mínima de 0.983 UA (unidades astronómicas) el día 3 de enero y una distancia máxima de 1.017 UA, el 4 de julio, como se muestra en la figura 7.

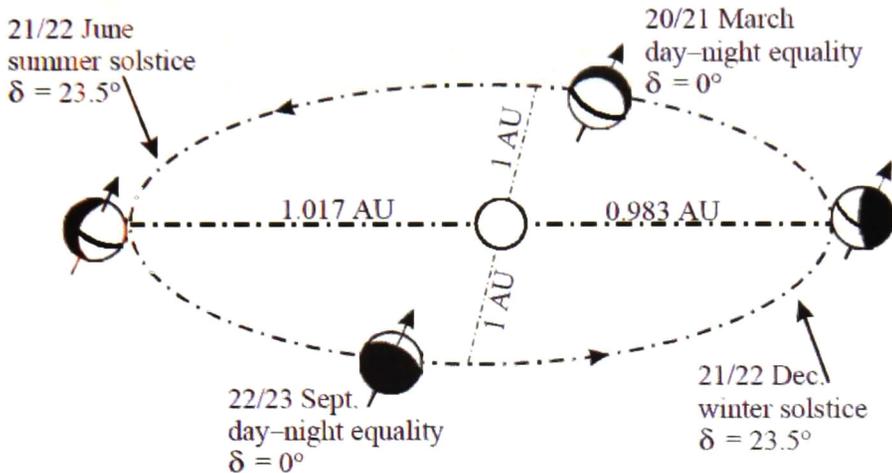


Figura 7 Posición de la Tierra en los solsticios de invierno y verano en los equinoccios de primavera y otoño, así como el ángulo formado por la línea que une los centros de la tierra y el sol y su proyección sobre el ecuador a este ángulo se le llama plano de la elíptica y está representado por la letra griega δ . [8]

La distancia cambiante que se mostró en la figura 7 conduce a una fluctuación de la irradiancia extraterrestre sobre una superficie normal G_{en} de aproximadamente el $\pm 3\%$. Para un determinado número de día n la irradiación puede ser calculada por una simple fórmula [7] con un error menor al 0.3% o para una mejor aproximación se ocupa la expresión de Spencer [9] la cual considera un desarrollo en series de Fourier.

$$G_{en} = G_{sc} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (5)$$

$$G_{en} = G_{sc} (a + b \cos B + c \sin B + d \cos 2B + e \sin 2B) \quad (6)$$

$$a = 1.000110, b = 0.034221, c = 0.00128, d = 0.000719, e = 0.000077 \quad (7)$$

$$\text{Con } B = 360^\circ \frac{n-1}{365} \quad (8)$$

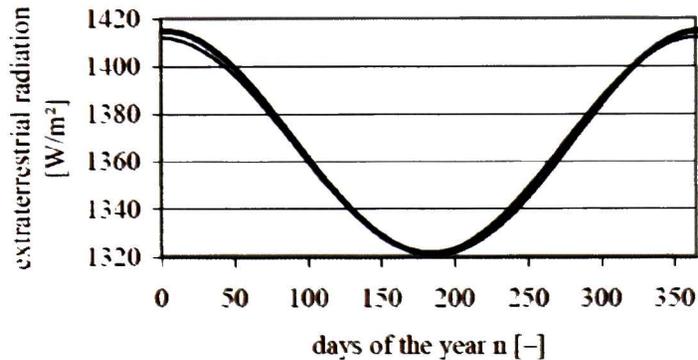


Figura 8 Variación de la irradiación extraterrestre en una superficie normal calculada por la expansión de Fourier (curva gruesa) y por la ecuación de aproximación (curva delgada).

Con G_{en} irradiación extraterrestre sobre la superficie normal [W/m^2], G_{sc} la irradiación de la atmosfera externa [W/m^2] y n corresponde al número de día específico.

¿Qué es la energía solar térmica?

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua o aire. La tecnología actual permite también calentar agua con el calor solar hasta producir vapor y posteriormente obtener energía eléctrica.

¿Qué aplicaciones tiene la energía solar térmica?

La energía más abundante en el planeta tierra es la radiación solar, emitida por la estrella central del sistema planetario, el Sol. Se trata de una mezcla de radiaciones de diferentes longitudes de onda (λ) entre 200 y 4000 nm, distinguiéndose la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, con una distribución espectral similar a la de emisión de un cuerpo negro a 5777 K. En consecuencia, se denomina energía solar térmica la que resulta de la conversión de la radiación solar para aplicaciones térmicas.

Una instalación solar térmica se define como aquella que está constituida por un conjunto de componentes encargados de realizar las funciones de captar la radiación solar, transformándola directamente en energía térmica cediéndola a un fluido de trabajo y, por ultimo almacenar dicha energía térmica de forma eficiente, ya sea en el mismo fluido de trabajo o transfiriéndolo a otro, para su consumo posterior.

Clasificación de los colectores solares según su factor de concentración

El factor de concentración se define como el cociente existente entre el área de aceptación y el área del receptor.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (9)$$

Donde C es el factor de concentración [adimensional], A_a área de aceptación [m^2], y A_r el área del receptor [m^2].

El valor máximo del factor de concentración puede ser determinado si se consigue igualar la absorptividad y la emisividad. Esto sucede cuando el receptor ideal alcanza el equilibrio, esto es cuando se llega a la temperatura de 5777 K.

$$\varepsilon\sigma T_{max}^4 = \alpha C G_{sc} \rightarrow T_{max}^4 = \left(\frac{\alpha C G_{sc}}{\varepsilon\sigma}\right)^{0.25} \quad (10)$$

si $\alpha = \varepsilon$

$$C = \frac{\sigma T_{max}^4}{G_{sc}} = \frac{5.6704 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * (5777 K)^4}{1367 \frac{W}{m^2}} = 46201.34 \quad (11)$$

Con ε emisividad [adimensional], α absorción térmica [adimensional].

Además de este enfoque Rabl [10] propone un desarrollo que se basa en el mismo balance energético del colector ideal del razonamiento anterior y que demostraba que para el mismo colector ideal existía un límite geométrico como se muestra en la figura 5 basado en la distancia Tierra-Sol.

Retomando la ecuación 9 y la relación geométrica formada por la Tierra-Sol se tiene que:

$$C_{ideal\ 3D} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{r_o^2}{r_s^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_c} \quad (12)$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{\sqrt{(r_s^2 + r_o^2)}} \right) = 0.2665569^\circ \quad (13)$$

$$C_{ideal\ 3D} = \frac{1}{\sin^2(0.2665569)} = 46202.826 \quad (14)$$

Con θ_c como el ángulo formado por el radio del sol y la distancia media del sol a la tierra [radianes, grados].

Valor que coincide con el de la concentración máxima para una radiación igual a la constante solar con una temperatura igual a la equivalente al Sol, que se muestra en la fórmula 11.

Para el caso de colectores no tridimensionales se puede seguir la fórmula propuesta por Rabl [10].

$$C_{ideal\ 2D} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{1}{\sin \theta_s} = 214.948 \quad (15)$$

Sin concentración C=1

Diseñados para aplicaciones que demandan energía a una temperatura relativamente baja, en general hasta 100° C, aunque se pueden alcanzar los 130° C con tubos de vacío. Estos dispositivos aprovechan la radiación directa así como la difusa, no requieren de seguimiento solar y precisan

escaso mantenimiento. Además, mecánicamente son bastante más simples que los colectores de concentración.

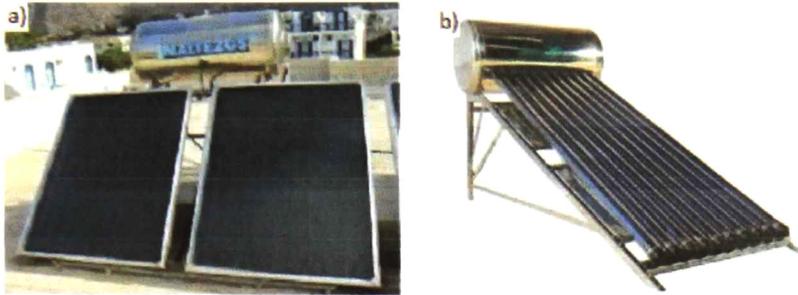


Figura 9 En la figura se observan 2 tipos de calentadores solares en la figura 9a se observa un colector solar de baja temperatura, en la figura 9b se tienen un calentador con tubos de vacío.

Este tipo de colectores tienen diversas aplicaciones entre las más sobresalientes se tienen:

Producción de agua caliente sanitaria (ACS)

La principal aplicación de la energía solar térmica es la producción de agua caliente sanitaria (ACG) para el sector doméstico y de servicios. El agua caliente sanitaria se usa a una temperatura de 45 °C, temperatura que se alcanza de manera relativamente sencilla. La energía aportada por los captadores debe ser tal que en los meses más favorables aporte el 100%. El resto de las necesidades que no aportan los captadores se obtiene de un sistema auxiliar, que habitualmente suelen ser gasóleo, gas o energía eléctrica.

Calefacción de baja temperatura

La energía solar térmica puede ser un complemento al sistema de calefacción, sobre todo para sistemas que utilicen agua de aporte a menos de 60 °C.

Para calefacción con aporte solar, el sistema que mejor funciona es el de suelo radiante, ya que la temperatura del fluido que circula a través de este círculo es de unos 45 °C.

Calentamiento de agua de piscinas

Otra de las aplicaciones extendidas es la del calentamiento del agua de piscinas. El uso de colectores puede permitir el apoyo energético en piscinas al exterior alargando el periodo del baño, mientras que en instalaciones para uso de invierno, en las épocas de poca radiación solar, podrán suministrar una parte pequeña de apoyo a la instalación convencional.

El coeficiente de transferencia térmica U_f para ese tipo de dispositivos se muestra en [8].

$$U_f = \frac{1}{R_{a-o}} = \frac{1}{\frac{1}{(h_r + h_c)}} = h_r + h_c \approx 25 \frac{W}{m^2 K} \quad (16)$$

Con U_f como coeficiente de transferencia térmica [$W/(m^2K)$], R_{a-o} resistencia térmica [$(m^2K)/W$], $1/hr$ resistencia por radiación de calor [$(m^2K)/W$], $1/hc$ resistencia presente por convección de calor.

Colectores solares planos

El colector solar plano trabaja haciendo pasar un líquido a través de él, convirtiendo la energía luminosa del sol en calor y elevando la temperatura del líquido que fluye. Puede usarse agua pura, pero es mejor una solución anticongelante.

Para atrapar la energía solar y convertirla en calor se utiliza un proceso simple de entender. Toda superficie negra expuesta al sol se pondrá más caliente que una de cualquier otro color. Una pintura negra mate no brilla y por lo tanto no pierde energía por reflexión. Por consiguiente, si una superficie se pinta de negro mate y se pone un líquido en contacto con la parte posterior, el líquido se calentará eficientemente. Este simple aparato es llamado el "absorbente". Usualmente es una lámina de metal con pasajes para el líquido los cuales están pintados de negro mate por un lado.

Una vez que la energía solar se convierte en calor y que se absorbe por el líquido, se debe aislar el absorbente térmicamente para prevenir pérdidas de calor. La parte posterior del absorbente así como los lados deben aislarse con fibra de vidrio o espuma de uretano. Sin embargo, en el caso del uretano, se debe usar una cobija de una pulgada de fibra de vidrio para protegerlo de las altas temperaturas. Las pérdidas de calor por el lado soleado del absorbente se reducen con una cubierta de vidrios. El vidrio transmite la radiación solar de alta energía (pequeñas longitudes de onda) hacia el absorbente y retarda la radiación de pequeña energía (grandes longitudes de onda) que es emitida por el absorbente caliente hacia el exterior, también evita que las corrientes de aire lo enfríen.

Para el caso de los colectores solares planos el coeficiente de transferencia térmica es alrededor de $5-6 W/m^2K$.

$$U_f = \frac{1}{R_{a-g} + R_{g-o}} \approx (5 - 6) \frac{W}{m^2K} \quad (17)$$

Donde R_{a-g} representa la resistencia térmica existente entre la capa absorbente y la capa de vidrio [$(m^2K)/W$], y R_{g-o} resistencia térmica existente entre la cubierta de vidrio y el aire [$(m^2K)/W$].

La eficiencia de un colector solar está descrita por un balance de energía que indica la distribución de energía solar incidente en una ganancia energética útil y varias pérdidas. El balance de energía en todo el colector se puede escribir como [11]:

$$A_c \{ [HR(\tau\alpha)]_{directa} + [HR(\tau\alpha)]_{difusa} \} = Q_\mu + Q_L + Q_s \quad (18)$$

Donde A_c área del colector, H es la energía solar incidente en una unidad unitaria [J/m^2], R factor para convertir la radiación directa o difusa a la que incide en el plano del colector [adimensional], $(\tau\alpha)$ producto transmitancia-reflectancia, Q_μ razón de energía transferida al fluido dentro del

colector solar [J], Q_L razón de pérdida de energía del colector por radiación, convección y conducción térmica [J] y Q_s es la razón de energía almacenada en el colector [J].

Una medida de la eficiencia del colector (η) es la eficiencia de colección, definida como la razón de la ganancia útil durante cualquier periodo de tiempo igual a la energía solar incidente en el mismo periodo de tiempo.

$$\eta = \frac{\int \frac{Q_{\mu}}{A_c} d\tau}{\int HR d\tau} \quad (19)$$

La eficiencia del colector para cada hora de operación se puede encontrar de la siguiente manera:

$$\eta_{hora} = \frac{Q_{\mu}}{HRA_c} \quad (20)$$

Con concentración, $C > 1$

Los colectores con concentración se pueden clasificar del siguiente modo, atendiendo a su factor de concentración:

- Sistema cilindro-parabólico y sistemas Fresnel $\rightarrow C = 30-200$
- Sistema de torre de potencia (o de receptor normal) $\rightarrow C = 200-1000$
- Discos parabólicos (o disco Stirling) $\rightarrow C = 1000-5000$

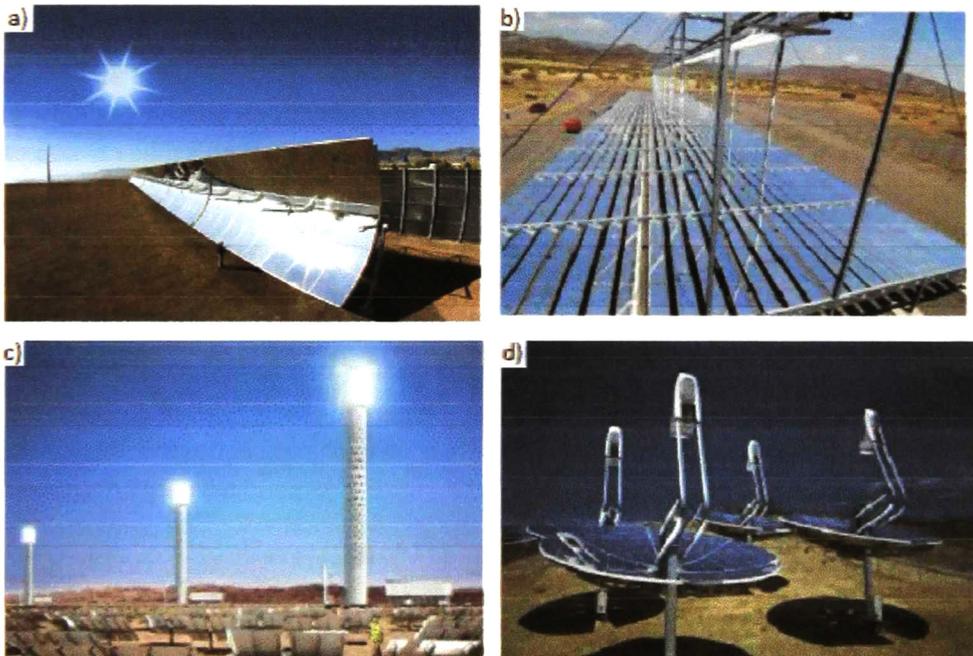


Figura 10 Sistemas solares con concentración solar, en la figura 10a se observa un sistema cilindro parabólico, en 10b se muestra un sistema de Fresnel, en 10c se muestra un sistema de torre de potencia solar y en la figura 10d se observa un sistema de disco parabólico o disco Stirling.

Con cualquiera de estas tecnologías se busca concentrar los rayos solares, que son aproximadamente paralelos e incidentes en una gran superficie (el concentrador), en una superficie pequeña en términos relativos (el receptor). Por ello, la geometría óptima del concentrador es la de un paraboloide de revolución que se mueva de tal forma que siempre este orientado al Sol.

Los sistemas cilindro parabólicos consisten en canales de espejos cilíndricos cuya sección transversal es una parábola, de tal forma que la radiación solar se concentra en el eje focal de dicha parábola, donde se encuentra la superficie que absorbe los rayos concentrados o receptor (figura 10a).

Los sistemas de torre de potencia están formados por espejos cuasi-planos denominados heliostatos, distribuidos en una superficie horizontal, y orientados de manera que reflejen la radiación solar hacia la parte superior de la torre, donde se coloca el receptor (figura 10 c).

Los discos Stirling son espejos de tipo paraboloide de revolución (figura 10d). Llevan acoplados un motor de combustión externa tipo Stirling y son instalaciones más autónomas, ya que por cada concentrador paraboloide se dispone de un motor independiente, pudiéndose generar desde unas decenas de kilovatios eléctricos con una unidad aislada hasta el orden de megavatios con un campo solar de discos convenientemente distribuidos.

Los sistemas Fresnel lineales son un desarrollo más reciente aunque mantienen la misma filosofía de los colectores cilindro-parabólico (figura 10b). En este caso el tubo que absorbe la radiación solar concentrada permanece inmóvil y son los espejos situados en el suelo los encargados de mantener el enfoque y concentrarla radiación solar sobre el receptor.

Energía solar fotovoltaica

Interacción de la radiación con la materia

La radiación proveniente del sol tiene una distribución espectral como se muestra en la figura 6. Puesto que la energía de los fotones que componen la luz y la longitud de onda de la luz, están relacionadas por la ecuación de la energía del fotón

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (21)$$

Siendo E la energía de un fotón [eV], h la constante de Plank [eVs], c la velocidad de la luz [m/s] y λ la longitud de onda medida en [μm].

Reduciendo esta ecuación y considerando que $h = 4.1357 \times 10^{-15} \text{ eVs}$ y que c es la velocidad de la luz, la ecuación 21 queda:

$$E = \frac{(4.1357 \times 10^{-15} \text{ eVs}) \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{\lambda} = \frac{1.24071 \times 10^{-6} \text{ eVm}}{\lambda} = \frac{1.24071 \text{ eV}\mu\text{m}}{\lambda}$$

Los fotones más energéticos corresponden a los de menor longitud de onda y los menos energéticos a los que presentan una longitud de onda menor como el espectro infrarrojo.

Cuando un fotón interactúa con un cristal, por ejemplo Si-i, hay una cierta probabilidad de que sea absorbido por un electrón de la banda de valencia. Si la energía absorbida por el electrón es superior E_g el electrón "se desplaza" a la banda de conducción convirtiéndose en un electrón de conducción y dejando en la banda de valencia un "hueco". Entonces se produce un par electrón-hueco

Unión PN

Cuando dos materiales p y n se juntan se producen una unión pn, los electrones que se encuentran en exceso en el semiconductor n migran hacia el semiconductor p y los huecos del semiconductor p al semiconductor n. De esta manera, se establece un campo eléctrico en la interface de la juntura. El campo eléctrico de la juntura es el responsable de establecer la corriente eléctrica a partir de los electrones que en su difusión el sólido alcanza la región de la juntura donde se encuentra el campo eléctrico [12].

El potencial asociado depende de la concentración de impurezas y de portadores intrínsecos. Para el Si, con un nivel de impurezas de $10^{15}/\text{cm}^3$ tanto en el lado n así como el p, se tienen potenciales de 550 mV

Mediante la absorción de fotones, se forman pares electrón-hueco tanto en el semiconductor tipo p como en el n. Debido a la difusión, los portadores de carga minoritarios en cada semiconductor alcanzan la juntura, en donde el campo eléctrico existente se encarga de desplazarlos a la región donde estos electrones y huecos son portadores de carga mayoritaria: la región p se carga positivamente mientras la n negativamente, dando lugar a la fuerza electromotriz y en un circuito exterior acoplado, a una corriente. De esta manera se tiene el efecto fotovoltaico, fundamento de las celdas solares

En la figura 11 se muestra la estructura de bandas de energía para una unión pn, los procesos que producen el efecto fotovoltaico y los mecanismos de pérdida. Hay sin embargo dos mecanismos de pérdida inherentes que limitan la conversión de energía solar en electricidad: el exceso de energía de los fotones que se transforman en calor por la termalización de los electrones y los fotones que no son absorbidos por el material, por poseer energía inferior al ancho de banda.

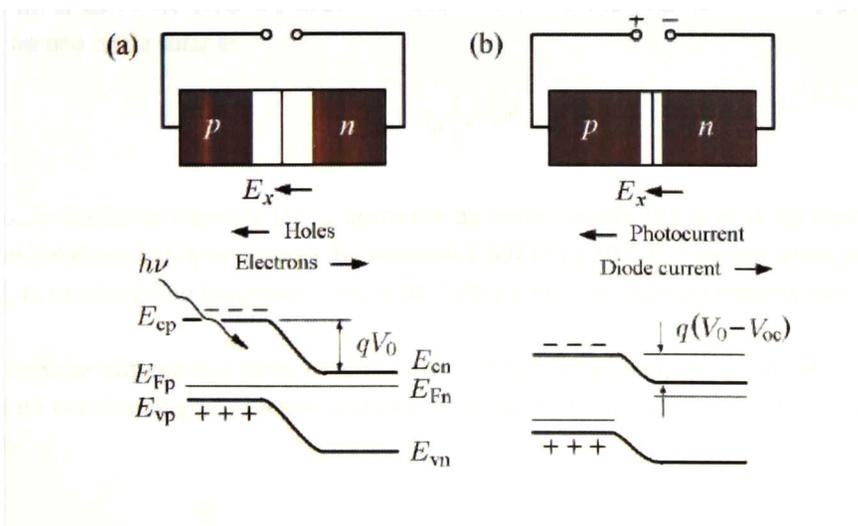


Figura 11 La separación de los huecos y electrones en una celda solar. (a) Los fotones incidentes generan pares electrón-hueco. El campo eléctrico integrado en la región de transición está apuntando hacia la región de tipo p. Los electrones, con carga negativa, son arrastrados por el campo en la región de tipo n. Mediante la conexión de los dos terminales, se genera una corriente eléctrica. La corriente de cortocircuito se determina por la tasa de generación de par electrón-hueco de la radiación. (b) Si los terminales no están conectados, los electrones migran a la región de tipo n se acumulan y se construye una tensión a través de la capacitancia de la unión. En el equilibrio, se establece un voltaje de circuito abierto [12].

Ecuaciones de las celdas solares

Una celda solar puede ser representada mediante una fuente de corriente conectada en paralelo con un diodo con juntura pn; como se observa en la figura 12. La fuente de corriente es la fotocorriente generada por la luz solar entrante, definido por la ecuación modificada del diodo

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_{sc} \quad (21)$$

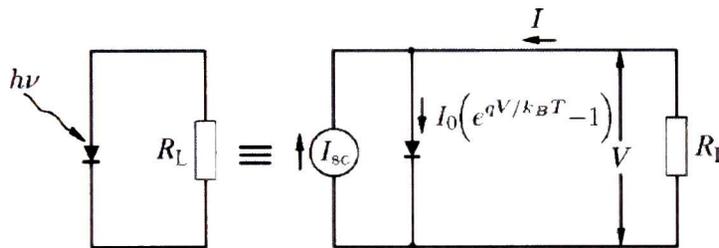


Figura 12 Circuito equivalente de la celda solar. Una celda solar puede ser representada por una fuente de corriente conectado en paralelo con un diodo de unión pn. La fuente de corriente es la fotocorriente generada por la luz solar entrante [12].

Esta es la ecuación fundamental de las celdas solares, en un formato consistente con la ecuación del diodo. Sin embargo en la ecuación 23 se observa que mientras el voltaje es siempre positivo, la corriente siempre será negativa. Esto es comprensible debido a que el diodo es un dispositivo que consume energía. La celda solar por otro lado es un dispositivo que funciona como batería, la dirección de la corriente eléctrica debe ser revertida. Por tanto una mejor forma de expresar la ecuación de una celda solar es:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (22)$$

Donde I es la corriente eléctrica [A], I_{sc} corriente de corto circuito [A], I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo [A], q es la carga del electrón 1.602176×10^{-19} C, T temperatura absoluta de la unión [K], K_B constante de Boltzman 1.381×10^{-23} J/K y V es la tensión del sistema medida en [V]

De esta forma se obtiene que tanto el voltaje como la corriente siempre sean positivos.

El voltaje de circuito abierto es aquel voltaje cuando la corriente es cero, definido por la siguiente condición.

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1 \right) \quad (23)$$

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right) \quad (24)$$

Donde V_{oc} es el voltaje de circuito abierto medido en [V]

Debido a que el término I_{sc} es siempre mucho mayor en relación a I_0 la ecuación 26 puede simplificarse al siguiente término:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (25)$$

Potencia máxima y factor de llenado

La potencia de salida de una celda solar es determinada por el producto del voltaje y la corriente $P = VI$. La potencia nominal de una celda solar es la potencia máxima de salida de con la influencia de fotones procedentes de sol,

$$dP = IdV + VdI = 0 \therefore \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (26)$$

De acuerdo a la ecuación 28, la potencia de salida está en función del voltaje de salida.

$$P = IV = \left[I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \right] V \quad (27)$$

De la figura 13 podemos observar que el voltaje para la potencia máxima es ligeramente menor que el voltaje de circuito abierto. Se introduce un voltaje de desplazamiento u , y se escribe.

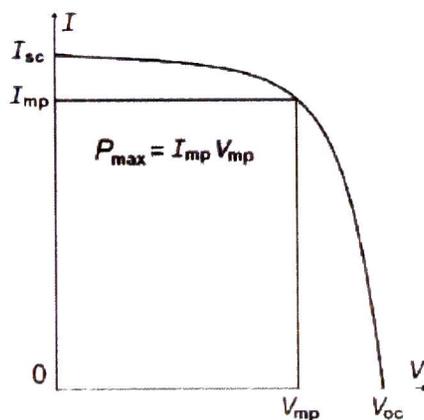


Figura 13 Potencia máxima y factor de llenado. El punto máximo de potencia ocurre cuando $P_{max} = I_{mp}V_{mp}$

$$V = V_{oc} - u \quad (28)$$

Donde v es el voltaje de offset medido en [V]

Utilizando las ecuaciones 29 y 30 se simplifica a la siguiente expresión.

$$P \approx I_{sc}(V_{oc} - v) \left[1 - e^{-\frac{qv}{k_B T}} \right] \quad (29)$$

Donde P es la potencia eléctrica medida en [W]

Tomando la derivada de la potencia con respecto a v , la condición de potencia máxima es:

$$e^{\frac{qv}{k_B T}} = 1 + \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (30)$$

Debido a que el término $I_{sc} \gg I_0$ encontramos:

$$v = \frac{k_B T}{q} \ln \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (31)$$

Por lo tanto, el voltaje a la potencia máxima es:

$$V_{mp} = V_{oc} - v = V_{oc} \left[1 - \frac{\ln \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \right] \quad (32)$$

Y la corriente a potencia máxima es:

$$I_{mp} = I_{sc} \left(1 - e^{-\frac{qv}{k_B T}} \right) = I_{sc} \left[1 - \frac{1}{\ln \frac{I_{sc}}{I_0}} \right] \quad (33)$$

Donde V_{mp} es el voltaje a la potencia máxima [V] e I_{mp} es la corriente a potencia máxima medida en [A].

Después de ciertas simplificaciones, la potencia máxima es:

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} = V_{oc} I_{sc} \left[1 - \frac{1 + \ln \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \right] \quad (34)$$

El factor de llenado η_f está definido:

$$\eta_f \equiv \frac{I_{mp} V_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = 1 - \frac{1 + \ln \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \quad (35)$$

Capítulo 3

La energía alternativa en México

México ha estado haciendo esfuerzos para el desarrollo y la promoción de las energías renovables desde la década de los 70's, cuando en el año de 1977 se inició el proyecto para la implementación de la energía geotérmica. Se tienen instalados en la actualidad más de 960 MWe, esto ubica al país en el cuarto lugar mundial del uso de este recurso renovable.

En el año de 1978 se comenzó el desarrollo de generación de energía mediante fuentes no convencionales, de las que destacan la energía fotovoltaica, la energía eólica y la energía de la biomasa [13].

Las energías renovables pueden ser la solución al problema energético de México. Las energías renovables son un recurso muy abundante en el país que puede contribuir a satisfacer la demanda energética de manera sustentable tanto de las ciudades como del campo mexicano. En la siguiente tabla se muestra el potencial de las energías renovables a nivel global

	Potencial Global Teórico	Técnicamente Factible	Capacidad Instalada (2008)
Hidráulico	4.6 TW	1.7 TW	0.9 TW
Biomasa	7-10 TW	5 TW	1.4 TW
Geotérmica	12 TW	0.6 TW	0.054 TW
Eólica	50 TW	2-4 TW	0.121 TW
Solar	600 TW	60 TW	0.0135 TW
TOTAL	676 TW	70 TW	2.53 TW

Tabla 1 Se muestra el potencial teórico y factible de las energías alternativas que se tienen a nivel global [14]

Con la información mostrada en la tabla 1 se puede concluir que existe una potencial de energía que no se ha explotado principalmente en el área de la energía solar.

Aunado a esto se ha estudiado que los sistemas híbridos (SH) tienen una eficiencia mayor que a los componentes que lo forman por separado como se muestra en diferentes publicaciones que van desde la década de los 70 [15] hasta esta última década [16] que presenta un SH de alta eficiencia conformado por sistema de termosifón unido a generadores termoeléctricos (TEG's) de diversos materiales termoeléctricos, [17] que muestra un enfoque general de los SH y a las combinaciones de las energías renovables más comunes para convertirlo así en un SH, [18] que muestra el análisis de un SH que opera a alta y baja temperatura.

La principal configuración que se muestra en la literatura para los SH, es la combinación eólico-solar que van desde la investigación y optimización de los dispositivos híbridos [19], hasta el estudio y la viabilidad de prototipos eólicos-fototérmicos implementados en la arquitectura citadina futurista [20], [21], [22].

Otra tendencia en los SH es la implementación de generadores termoeléctricos acoplados a sistemas térmicos para el aprovechamiento del calor residual. Los materiales que se están

empleando hoy en día van desde convencionales como el Bi_2Te_3 [23], [18]. Hasta materiales más complejos como en los trabajos presentados por [16] y [24].

Los sistemas híbridos son en la actualidad sistemas que se encuentran en investigación debido a las complicaciones técnicas, combinaciones existentes de los SH, materiales que se emplean.

Es debido a factores técnico-tecnológicos que aún no se tiene definida la arquitectura final de estos sistemas que se remontan desde la década de los 70's.

El CINVESTAV-Querétaro ha participado de forma muy activa desde componentes individuales [25], [26] hasta la implementación y estudio de SH [27],[28],[29].

En este proyecto se desarrollará un sistema híbrido fotovoltaico-termo-electro (PVTe) con las partes termoeléctricas y térmicas en un ambiente de media temperatura (100°C - 350°C) y la parte fotovoltaica en un ambiente de baja temperatura (30°C - 80°C).

Capítulo 4

Efecto termoeléctrico

La termoelectricidad se considera como la rama de la termodinámica paralela a la electricidad donde se estudian fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad. Existen varios fenómenos relacionados a la termoelectricidad pero el fenómeno más conocido es el de la generación de electricidad mediante la aplicación de calor en la unión de dos metales diferentes

Este fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck [30].

Efecto Seebeck

En 1821 el científico alemán Thomas Johann Seebeck (1770-1831) encontró que un circuito conformado por la unión de dos metales diferentes (cobre con bismuto) [31] reflectaban la aguja de una brújula al colocarlo a distintas temperaturas las juntas entre los dos metales.

Para el año de 1822 sus resultados experimentales fueron publicados por la academia prusiana de ciencia bajo el título "Polarización magnética de metales y Ores por diferencia de temperatura" [32]

Seebeck descubrió de forma accidental que si calentaba una de las uniones manteniendo a la otra a temperatura ambiente, aparecía un campo magnético en las inmediaciones de los alambres, lo que se ponía de manifiesto en la desviación que se producía en la guja de una brújula.

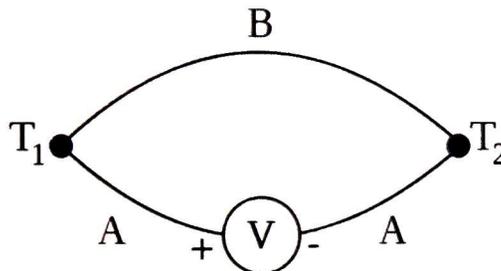


Figura 14 Esquema de un termopar

La ecuación que domina el efecto Seebeck nos introduce el coeficiente S , llamado coeficiente de Seebeck, que será de gran importancia a la hora de analizar la eficiencia de los materiales termoeléctricos.

La diferencia de potencial generado es proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión fría y caliente. El factor de proporcionalidad se llama coeficiente de Seebeck.

$$\Delta V = S\Delta T \quad (38)$$

El coeficiente S será positivo si la corriente generada sigue el sentido de las agujas del reloj.

Donde ΔV es la diferencia de voltaje [V], S es el coeficiente de Seebeck [V/K], y T temperatura absoluta medida en [K]

Efecto Peltier

Si se hace pasar corriente eléctrica por un circuito compuesto de materiales distintos con sus uniones a diferente temperatura, se produce el efecto inverso al efecto Seebeck. Se absorbe calor en una de las uniones y se desprende de la otra.

Este fenómeno inverso es llamado efecto Peltier, en honor al físico francés Jean Peltier que lo descubrió en 1834 [30].

Una corriente eléctrica de intensidad determinada a través de la unión de 2 materiales conductores diferentes A y B produce o absorbe calor según la ecuación.

$$W = \Pi I \quad (39)$$

Donde W es el calor producido o absorbido [W], Π es el coeficiente de Peltier [V], e I es la intensidad eléctrica aplicada [A].

Efecto Thomson

William Thomson, más tarde conocido como Lord Kelvin al estudiar los procesos irreversibles en sistemas termodinámicos llegó a lo que se conocería como la relación de Thomson.

Las conclusiones de sus investigaciones fue la relación existente entre los coeficientes de Seebeck y Peltier, siendo esta directamente proporcional a la temperatura.

$$\Pi = ST \quad (40)$$

Figura de Mérito

Para la caracterización de la eficiencia de los materiales termoeléctricos se determina la figura de mérito, representada por Z . Esta figura de mérito tiene dependencia con la temperatura y su valor es directamente proporcional a la eficiencia del material termoeléctrico.

Un generador termoeléctrico (TEG por sus siglas en inglés) es una maquina térmica y obedece a las leyes de la termodinámica. Si consideramos al TEG como un maquina ideal, es decir que no presente pérdidas de calor, la eficiencia se define como el cociente entre la energía eléctrica obtenida y el calor absorbido por el dispositivo termoeléctrico.

Para desarrollar una ecuación valida comencemos con el ciclo de Carnot, ya que su rendimiento será el máximo que se alcanza según las leyes de la termodinámica.

Como se observa en la figura 15 el ciclo de Carnot se compone de dos etapas isotérmicas y dos etapas adiabáticas. Por lo tanto existen dos focos a diferentes temperaturas. En los procesos isotérmicos se producirá un intercambio de calor entre el sistema y sus alrededores, de forma que el foco frio cede calor al entorno y el foco caliente absorbe calor. Como consecuencia de esto se produce un trabajo.

$$\eta_{carnot} = \frac{W_{\text{útil}}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \quad (41)$$

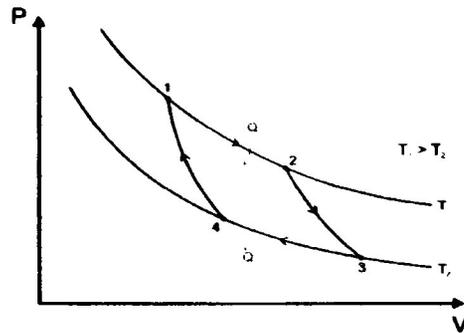


Figura 15 Diagrama representativo de un ciclo de Carnot

Para expresar la eficiencia de un generador termoeléctrico se parte de la configuración más sencilla, un termopar con dos elementos termoeléctricos.

En la figura 16 se muestra un circuito eléctrico en el cual se genera una energía eléctrica a partir de una fuente de calor. Se asume que la conductividad eléctrica y térmica, así como el coeficiente de Seebeck de ambos elementos es constantes.

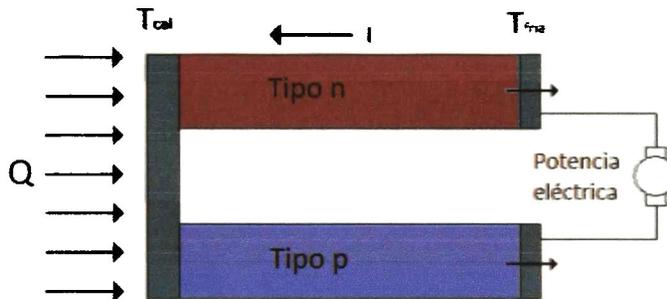


Figura 16 Generación termoeléctrica por efecto Seebeck

La eficiencia del sistema mostrado en la figura 16 se puede expresar de la siguiente forma.

$$\phi = \frac{W_{\text{producido}}}{Q_{\text{consumido}}} = \frac{I^2 R}{S_{AB} I T_c} = \frac{I^2 R}{k'(T_c - T_f) - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (42)$$

$$\phi_{\text{max}} = \eta_{\text{Carnot}} \gamma \quad (43)$$

Si se opera correctamente, resulta la siguiente expresión

$$\gamma = \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_f}{T_c}}$$

$$\bar{T} = \frac{T_c - T_f}{2} \quad (44)$$

$$Z = \frac{S_{AB}^2}{k'R}$$

Siendo φ la eficiencia de un elemento termoeléctrico [%], R la resistencia de los elementos termoeléctricos [Ω], Z la figura de mérito [1/K], \bar{T} es la temperatura media del sistema termoeléctrico [K], y k' o λ la conductividad térmica de A y B en paralelo.

En la práctica, los dos elementos termodinámicos de los que se compone el generador tienen constantes similares, suelen ser del mismo material. En este caso, el concepto de la figura de mérito para un material está dado por la siguiente ecuación [33].

$$Z = \frac{S^2}{k\rho} \quad (45)$$

Aplicaciones de los generadores termoeléctricos (TEG)

La teoría y las bases de los generadores y refrigeradores termoeléctricos se terminaron de delinear a principios del siglo XX. Para aplicaciones prácticas se necesitan materiales con un alto coeficiente de Seebeck, alta conductividad eléctrica y baja conductividad térmica.

En la década de los 40's la tecnología de los semiconductores permitió la obtención de materiales adecuados para los generadores termoeléctricos.

En la década de los 50's se desarrollaron las primeras termocoplas para sistemas de seguridad, que resultaron en la aplicación más masiva del efecto termoeléctrico y que se encuentran hoy en día en casi todos los termotanques, hornos y calefactores a gas domiciliarios.

Los generadores termoeléctricos son un producto para aplicaciones muy específicas, como las termocoplas de seguridad, y los dispositivos termoeléctricos de efecto Peltier para aplicaciones de refrigeración y de control de temperatura de baja capacidad.

Como se menciona los dispositivos termoeléctricos son elementos con una aplicación específica, los cuales funcionan a temperaturas específicas.

En la tabla siguiente se muestra algunas propiedades físicas de materiales termoeléctricos y su temperatura de funcionamiento.

Material	$\rho \cdot 10^5$ (Ωm)	$S \cdot 10^{-6}$ (V/K)	k (W/mK)	Referencia
	$T = 1000 \text{ K}$			
$\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$	4.58	164	0.715	[34]
$\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$	2	-200	1.43	[35]
$\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$	2.48	232	2.555	[36]

<i>T=700 K</i>				
$Ag_9Ti_4Te_5$	26	311	0.2	[37]
Zn_4Sb_3	3.33	206	0.693	[38]
$CeFe_4Sb_{12}$	8.86	127	1.703	[39]
$Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$	1.42	-150	1.56	[35]
Mg_2Si	4.12	-283	3.25	[40]
<i>T = 400 K</i>				
Tl_9BiTe_6	11	338	0.409	[41]
$In_{0.25}Co_4Sb_{12}$	1.34	-248	2.265	[42]
Zn_4Sb_3	2.53	161	0.75	[43]
$LaFe_3CoSb_{12}$	1.83	143	1.6	[44]
$Zr_{0.25}Hf_{0.25}Ti_{0.5}NiSn$	3.38	-330	3.003	[45]
<i>T = 300 K</i>				
Bi_2Te_3	0.55	162	1.468	[31]
Sb_2Te_3	0.122	63	5.205	[31]
$Sr_{0.146}Ga_{0.285}Ge_{0.569}$	1.94	-128	1.06	[46]
Zn_4Sb_3	2.17	136	0.783	[43]
$In_{0.2}Co_4Sb_{12}$	1.49	-222	2.476	[42]

Tabla 2 Diferentes materiales termoeléctricos y su temperatura de operación.

Estudio de los Generadores Termoeléctricos (TEG)

Para la determinar la eficiencia y el tipo de generador termoeléctrico que se debe de emplear en el sistema híbrido SH que se construirá. Es necesario conocer las características de los TEG's bajo diferentes condiciones de operación de los dispositivos.

Para determinar una serie de parámetros necesarios se realizó la reingeniería a un equipo realizado [47]. Dicho equipo consistía en dos placas de aluminio con dimensiones de las placas de 100x100x3.175 mm, acoplada a una fuente de calor que suministraba 1000 W de potencia máxima.

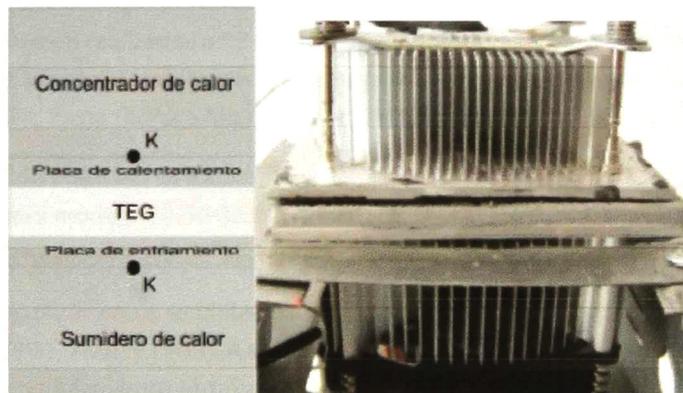


Figura 17 Esquema del ensamblaje del dispositivo construido [47].

Para el nuevo dispositivo de censado se realizaron las siguientes modificaciones.

La placa de calentamiento al igual que el concentrador de calor se conservaron del diseño original [47]. Una placa de aluminio ($k=193 \text{ W/mK}$) de dimensión $100 \times 100 \times 3.175 \text{ mm}$ acoplada a una fuente calórica de 1500 W de potencia máxima.

La placa de enfriamiento fue fabricada en cobre ($k=350 \text{ W/mK}$) de dimensiones $102 \times 142 \times 5 \text{ mm}$ acoplado a un serpentín de cobre por el cual fluía agua.

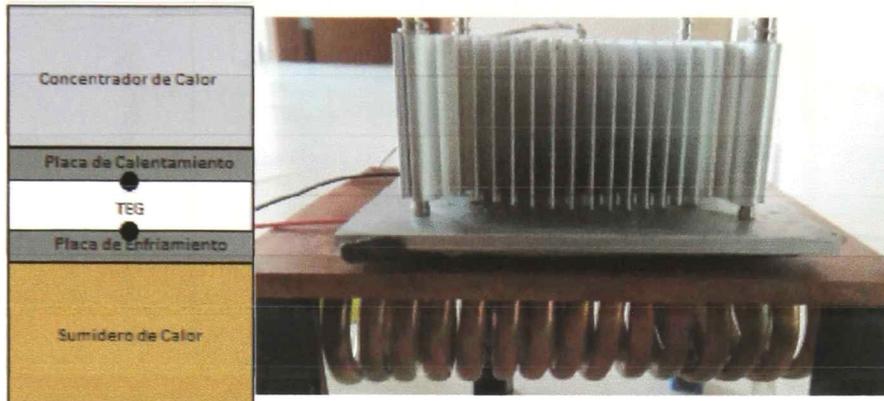


Figura 18 Esquema del ensamble del dispositivo final

Desempeño de los Generadores Termoeléctricos

Con el equipo construido, se experimenta el desempeño de los TEG's a diferentes condiciones de temperatura y diferentes acoples térmicos. Las mediciones realizadas fueron:

- Voltaje de circuito abierto (V_{OC})
- Corriente de corto circuito (I_{SC})
- Potencia eléctrica generada (W_E)

El objetivo de este experimento fue determinar las condiciones óptimas de temperatura y acoplamiento térmico.

Los experimentos fueron realizados en 3 diferentes generadores termoeléctricos, estos dispositivos fueron acoplados a 3 pastas conductoras diferentes, los compuestos térmicos fueron los siguientes: Pasta térmica Steren, Pasta térmica Manhattan y Pasta termina Cooler Master IceFusion.

- TEG modelo TGM-127-1.4-2.5 (TEG1)
- TEG Tellurex modelo G2-30-3013 (TEG2)
- TEG Tellurex modelo G2-56-3075 (TEG3)

Para esta serie de experimentos se utilizaron los mismos generadores termoeléctricos, etiquetados con los nombres (TEG1, TEG2 y TEG3). A continuación se muestran los resultados para las diferentes configuraciones de acoplamiento térmico.

Mediciones sobre TEG1

Pasta térmica comercial marca Steren

La pasta térmica Steren es la que presenta el peor acoplamiento térmico, los resultados obtenidos con la pasta Steren se presentan a continuación.

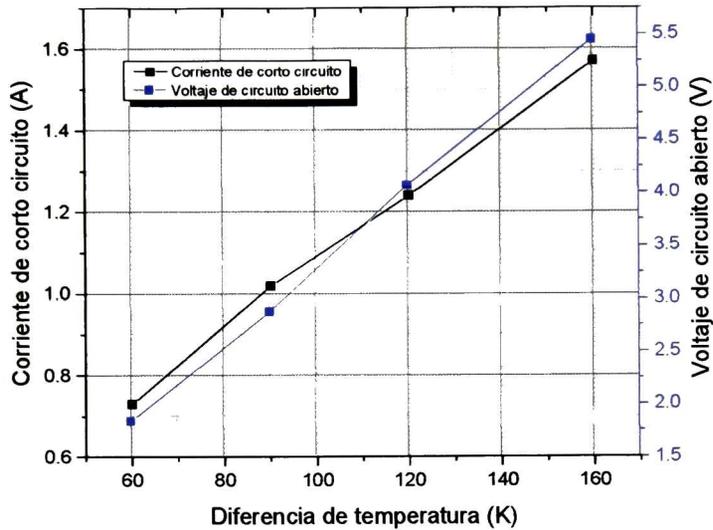


Figura 19 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura.

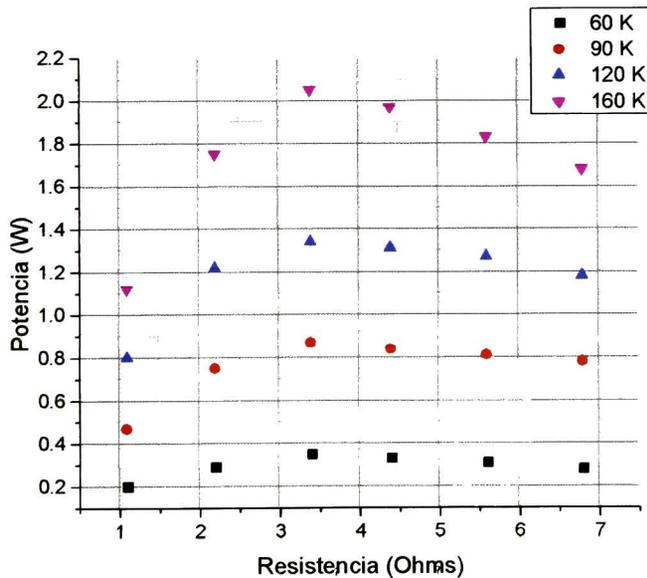


Figura 20 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura.

Pasta conductora Manhattan

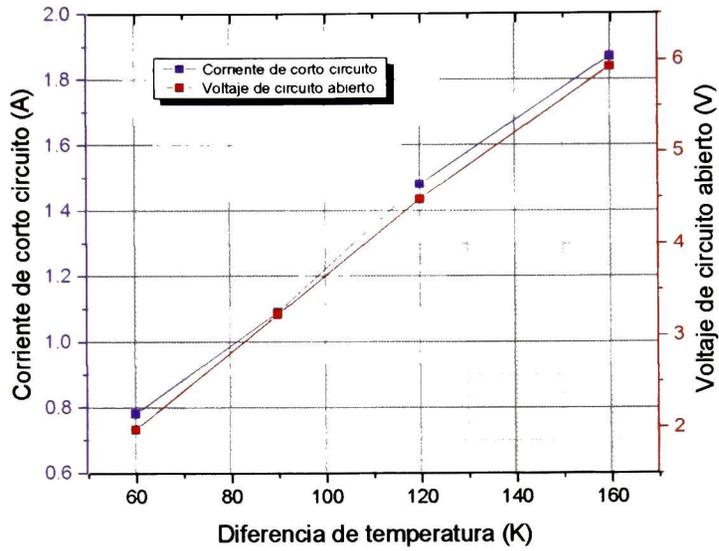


Figura 21 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura (Manhattan)

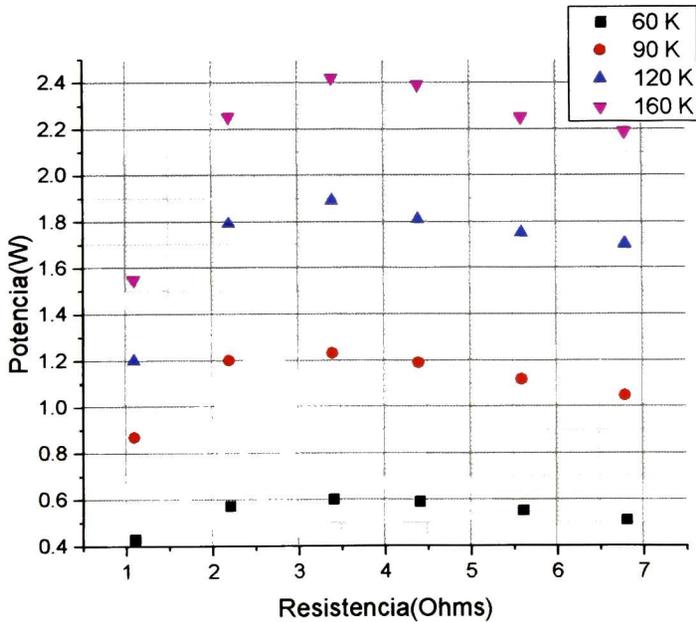


Figura 22 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura (Manhattan)

Pasta térmica Cooler Master IceFusion

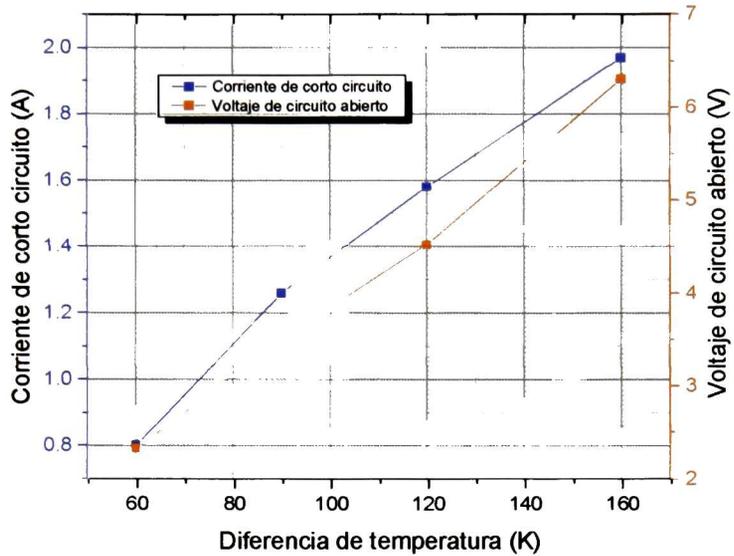


Figura 23 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura (Cooler Master IceFusion)

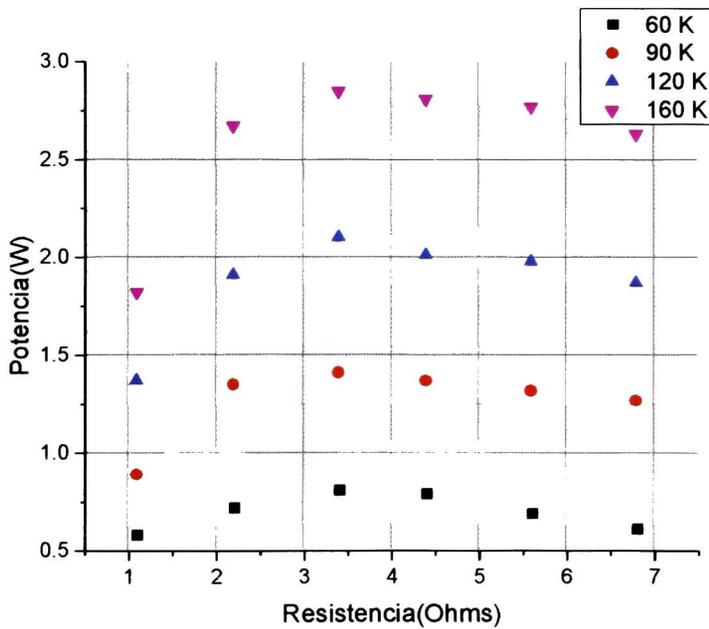


Figura 24 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura (Cooler Master IceFusion)

Mediciones sobre TEG2

Pasta térmica comercial marca Steren

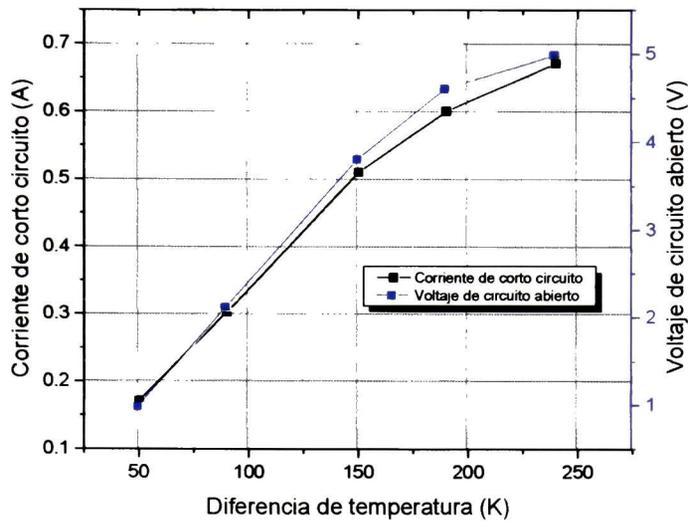


Figura 25 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Steren.

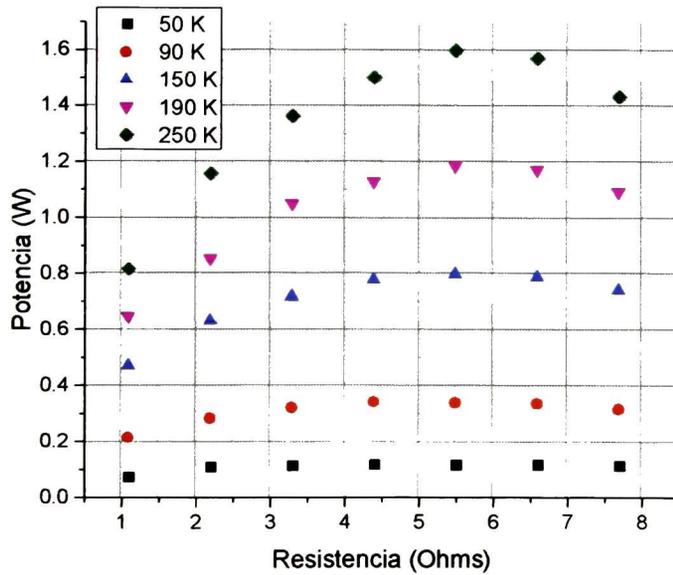


Figura 26 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Steren.

Pasta conductora Manhattan

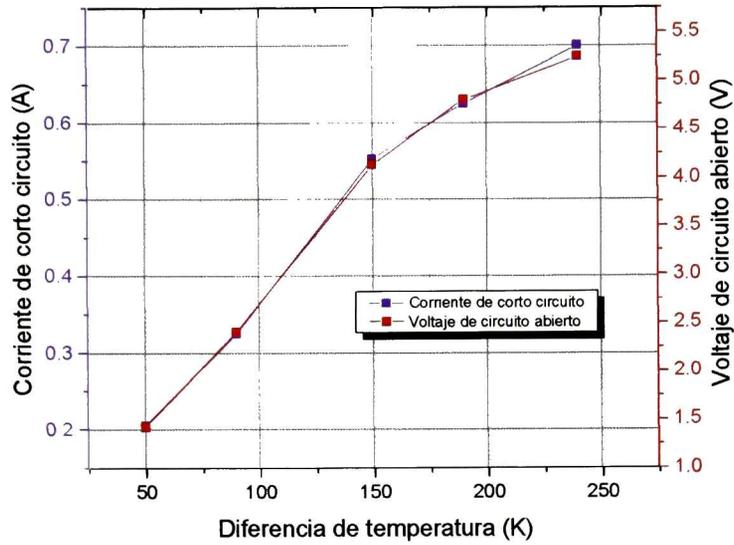


Figura 27 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura aplicado al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Manhattan

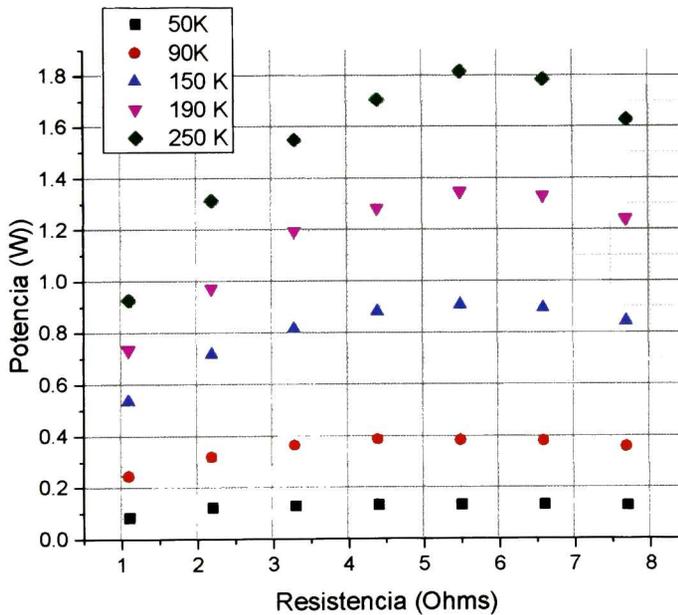


Figura 28 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Manhattan.

Pasta térmica Cooler Master IceFusion

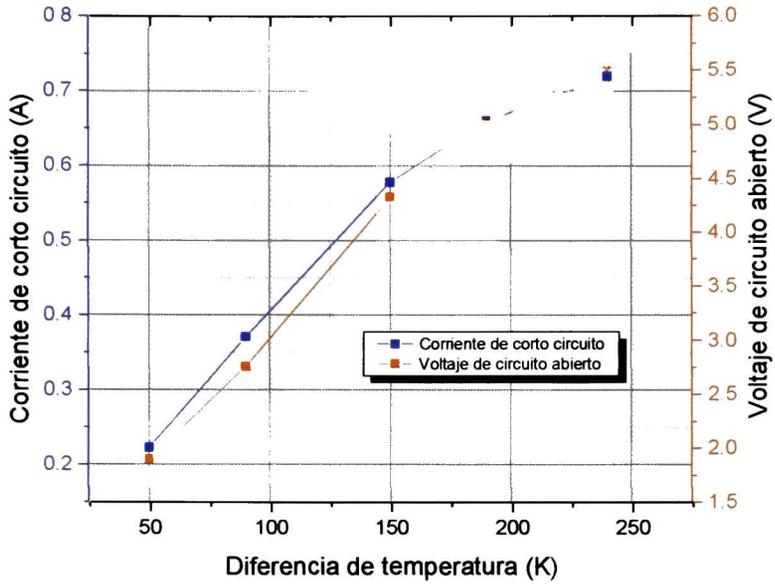


Figura 29 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto contra diferencia de temperatura aplicado al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.

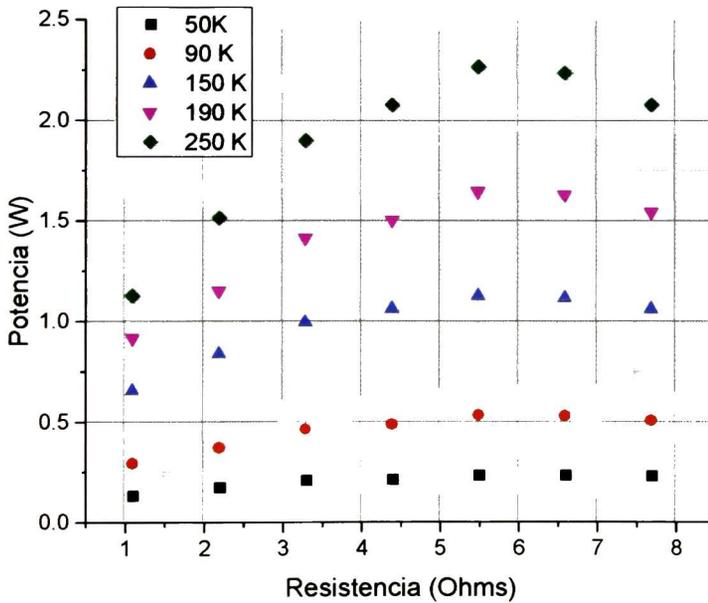


Figura 30 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 30-3013 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.

Mediciones sobre TEG3

Pasta térmica comercial marca Steren

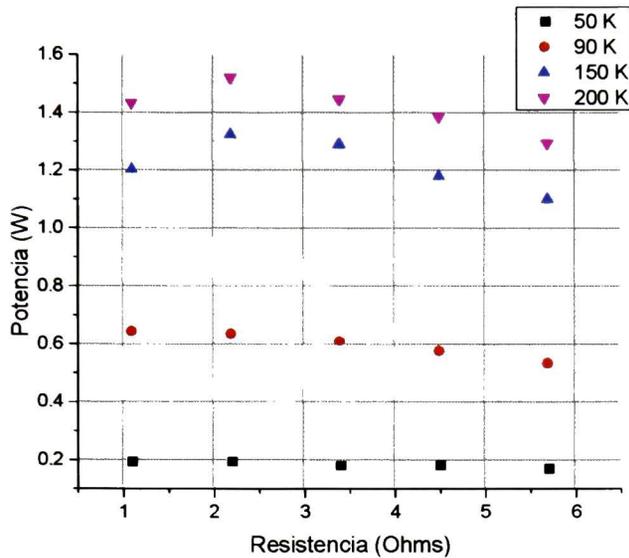


Figura 31 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG 3

Pasta conductora Manhattan

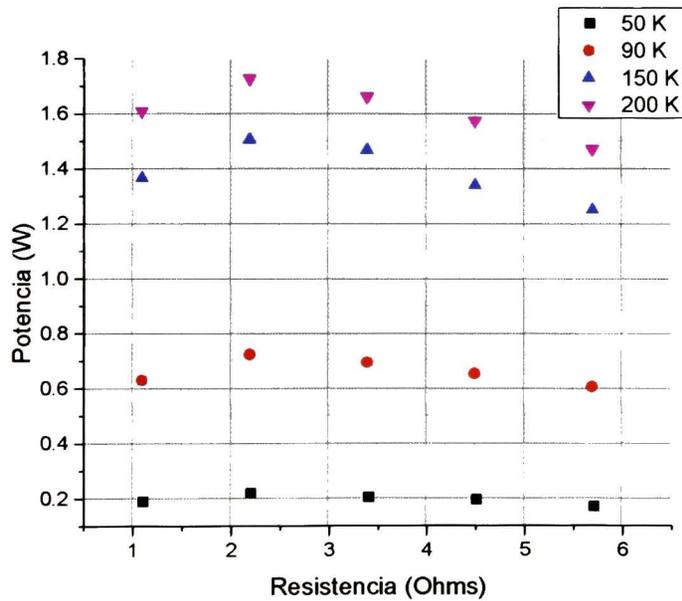


Figura 32 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 56-3075 con pasta térmica Manhattan.

Pasta térmica Cooler Master IceFusion

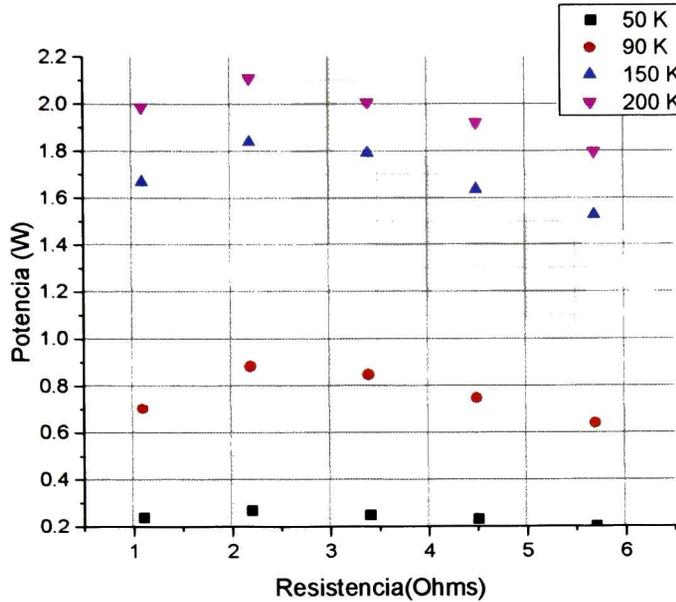


Figura 33 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 56-3075 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.

Método de elemento finito (FEM)

Simulación mediante el método de elemento finito del fenómeno termoeléctrico

El método de elemento finito es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas específicas. El FEM se usa en el diseño y mejora de productos, así como la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos.

La interface multifísica del efecto termoeléctrico combina la corriente eléctrica y la transferencia de calor para modelar los efectos Peltier-Seebeck-Thomson.

Las ecuaciones que rigen el análisis de los efectos Peltier-Seebeck-Thomson son:

Balance de corriente eléctrica:

$$-\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla V) = 0 \quad (46)$$

Balance de la energía térmica:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q &= Q \\ q &= -k_t \nabla T + \Pi J \end{aligned} \quad (36)$$

Donde σ es la conductividad eléctrica [S/m], V potencia electrico [V], P densidad [Kg/m²], Cp: Calor especifico [J/(kg·K)], T temperatura [K], q flujo de calor [W/m²], k_t conductividad térmica [W/(m·K)], Π coeficiente de Peltier [V], J densidad de corriente [A/m³] y Q es el calor por efecto Joule [W/m³].

Para transformar el balance de energía se multiplica cada término con una función prueba T_{test} y se integra sobre el dominio [48].

$$\int_{\Omega} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \cdot q) T_{test} d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega \quad (48)$$

Utilizando el vector identidad:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (T_{test} q) &= q \cdot \nabla T_{test} + T_{test} \nabla \cdot q \\ \int_{\Omega} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\Omega} [\nabla \cdot (T_{test} q) - q \cdot \nabla T_{test}] d\Omega &= \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega \end{aligned} \quad (49)$$

El software utilizado para realizar la simulación FEM fue COMSOL Multiphysics® 4.4, la simulación conjuga el modelo de transferencia de calor y el modelo de corriente eléctrica, para así modelar el efecto termoeléctrico.

El software resuelve las siguientes ecuaciones:

Transferencia de calor en solidos:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (50)$$

Corriente eléctrica:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot J &= Q_j \\ J &= \sigma E + J_e \\ E &= -\nabla V \end{aligned} \quad (51)$$

Efecto termoeléctrico:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T - P \cdot J) + Q \quad (37)$$

Las ecuaciones 50-52 coinciden con la ecuación 47, que describe la ecuación del efecto termoeléctrico.

Resultados

En las figuras 34 y 35 se observa un crecimiento de la salida de potencia debido primeramente a la diferencia de temperatura existente entre la placa fría y la placa caliente. Esto evidencia que es importante tener un acoplamiento térmico adecuado. La potencia máxima del sistema se encuentra

en función de la resistencia interna del generador termoelectrico como se observa en las imágenes 34 y 35, valores que corresponden a las resistencias internas proporcionadas por el fabricante Anexo 1.

Se observa que los mejores resultados para los generadores termoelectricos se tienen en las mediciones TEG1 y TEG2 para la pasta conductora Cooler Master IceFusion la cual tiene una conductividad térmica de 1.2 [W/mK], resultados que se muestran en las figuras 34 y 35 respectivamente.

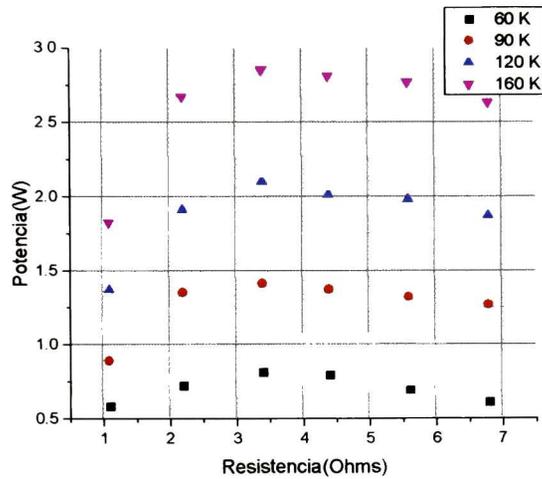


Figura 34 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG TMG 127-1.4-2.5 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.

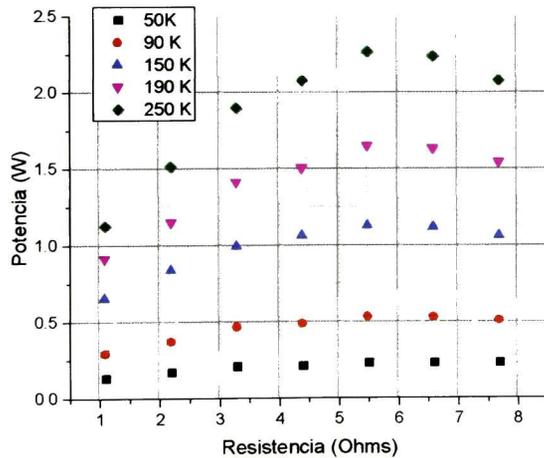


Figura 35 Potencia de salida según la resistencia aplicada en diferentes gradientes de temperatura aplicada al TEG Tellurex G2 56-3075 con pasta térmica Cooler Master IceFusion.

Con esta pasta térmica se alcanzan valores de potencia de salida de 2.8 W para una diferencia de temperatura de 160 K para el caso del TEG TGM-127-1.4-2.5 y 2.2 W para una diferencia de temperatura de 250 K para el TEG Tellurex G2-30-3013.

Existen muchos materiales termoeléctricos y cada uno presenta su eficiencia máxima a diferente temperatura. En este trabajo se tiene la máxima eficiencia a una temperatura aproximada de 380 K, lo cual coincide con las propiedades del Bi_2Te_3 que se muestran en las figuras 36, 37, 38 y 39.

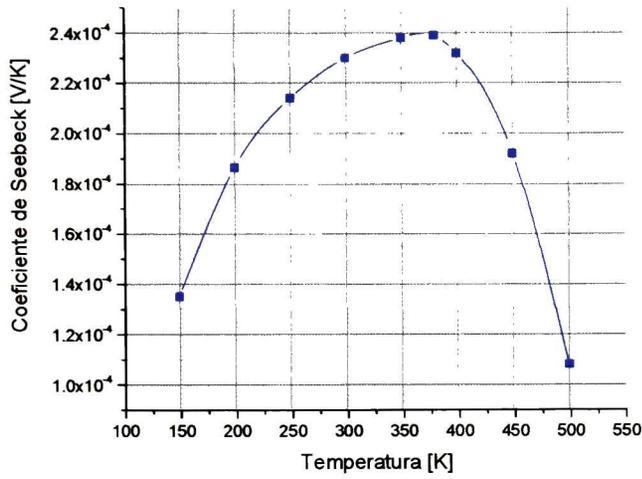


Figura 36 Gráfica de coeficiente de Seebeck contra temperatura.

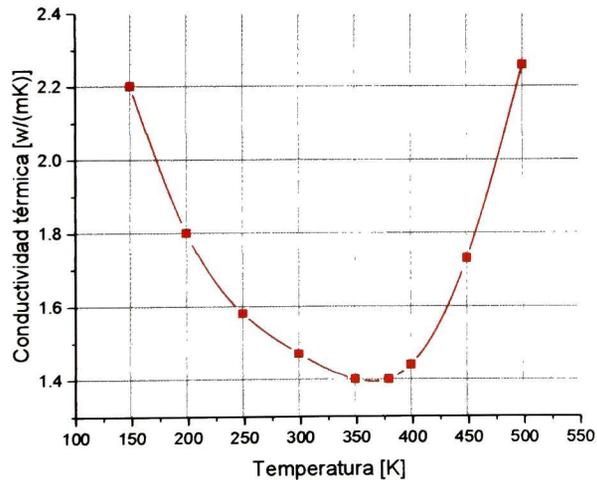


Figura 37 Gráfica de conductividad térmica contra temperatura.

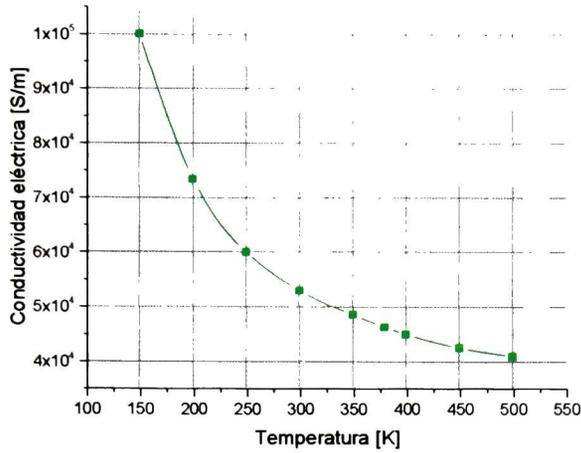


Figura 38 Gráfica de conductividad eléctrica contra temperatura.

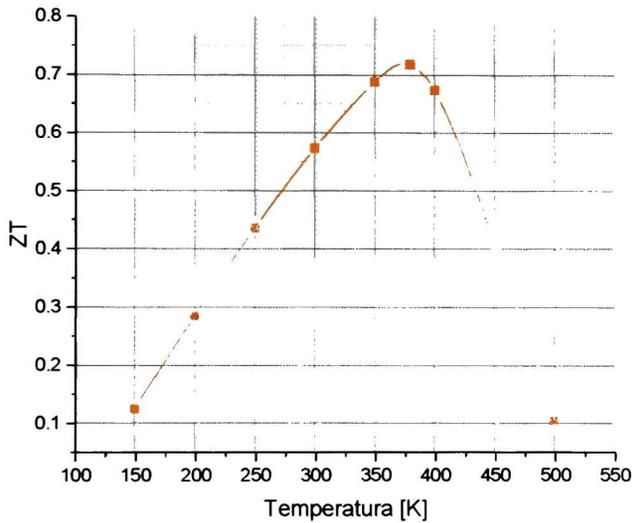


Figura 39 Gráfica del número adimensional ZT contra la temperatura.

La eficiencia en un dispositivo termoeléctrico depende de diferentes factores uno de los principales es el numero adimensional ZT y la temperatura de trabajo de los generadores termoeléctricos. Retomando la ecuación 44 se tiene:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (38)$$

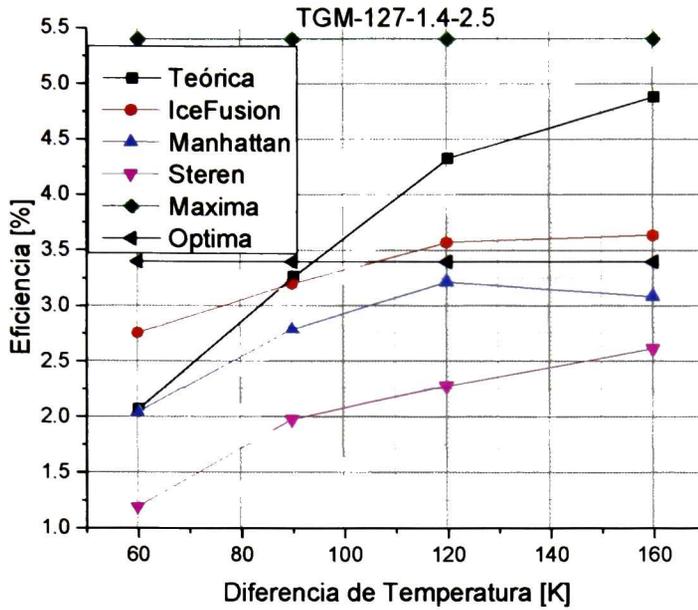


Figura 40 Gráfica de la eficiencia del TEG contra la temperatura, en donde se grafican la eficiencia teórica, la eficiencia óptima, la máxima eficiencia y la eficiencia debida a las diferentes pastas térmicas.

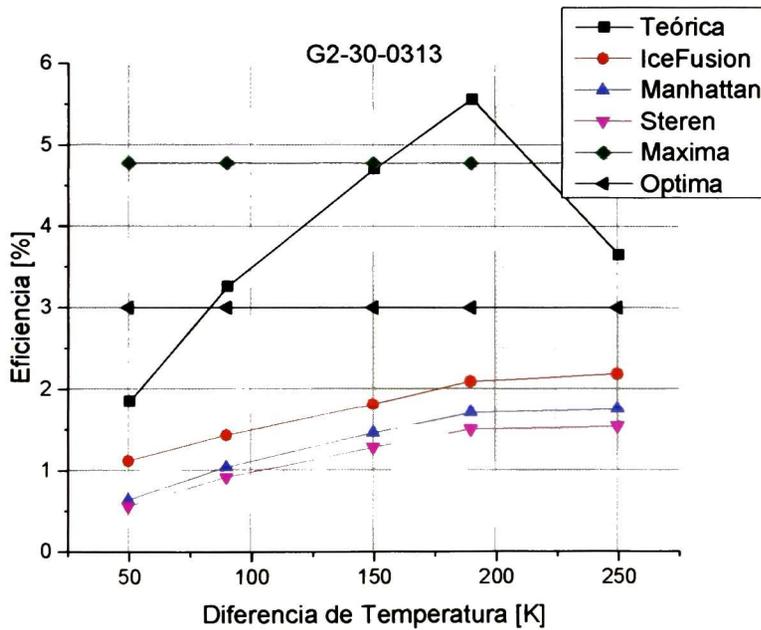


Figura 41 Gráfica de eficiencia del generador termoelectrico contra el gradiente térmico generado.

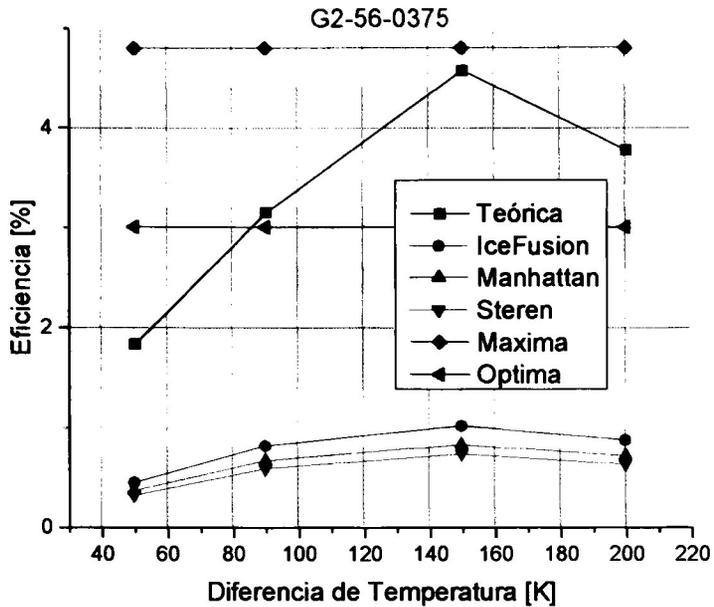


Figura 42 Gráfica de eficiencia contra gradiente térmico.

En las figuras 40, 41 y 42 se observa la eficiencia de cada uno de los generadores termoeléctricos probados así como las eficiencias máximas y óptimas de los 3 sistemas.

Se observa que el mejor rendimiento lo aporta el generador termoeléctrico etiquetado TEG1 con una eficiencia superior al 3.5% con una diferencia de temperatura de 120 K

Resultados del método de elemento finito

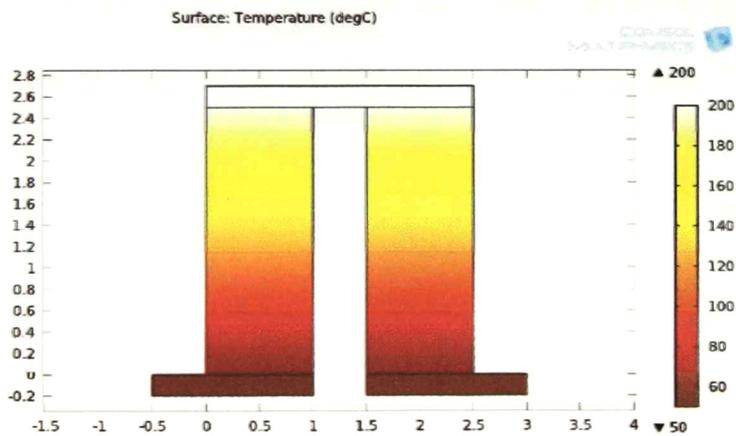


Figura 43 Elemento termoeléctrico sometido a una diferencia de temperatura de 150°C evaluado en "COMSOL Multiphysics 4.4".

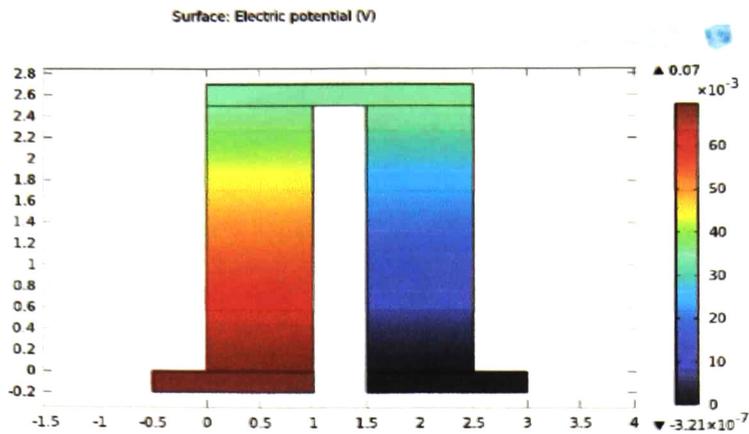


Figura 44 Potencial eléctrico que arroja el "COMSOL Multiphysics 4.4".

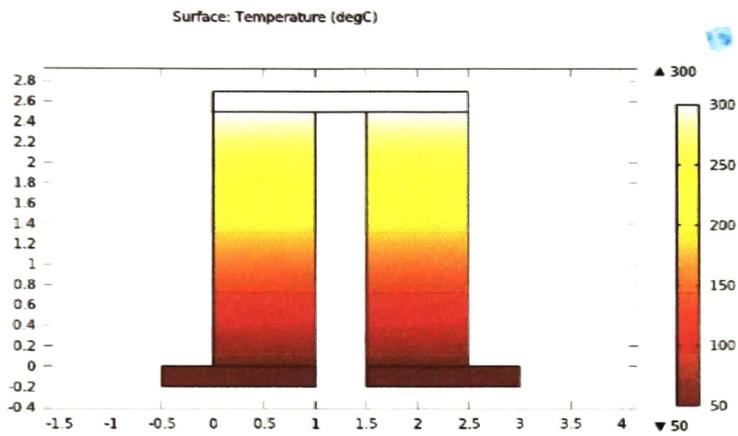


Figura 45 Elemento termoelectrico sometido a una diferencia de temperatura de 250°C.

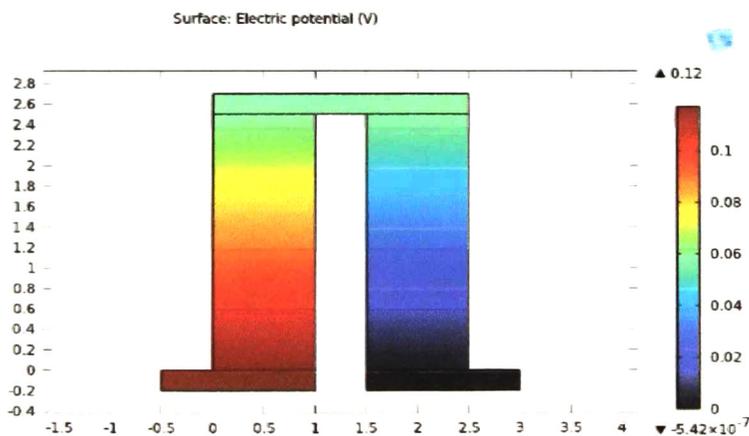


Figura 46 Potencial eléctrico de salida de un elemento termoelectrico.

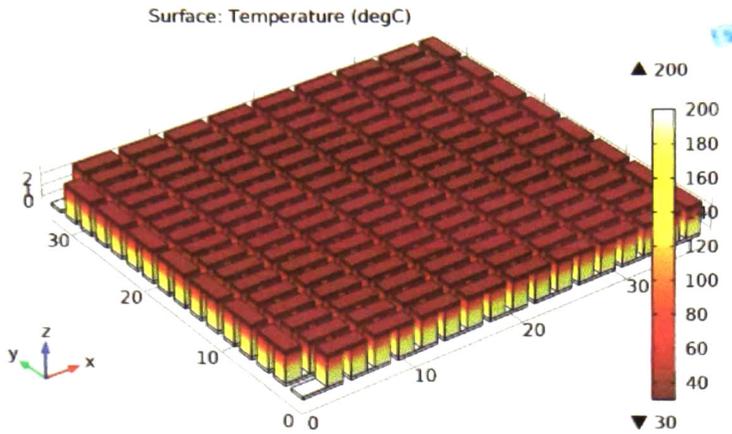


Figura 47 Representación 3D de diversos elementos termoelectricos acoplados en serie evaluados con una diferencia térmica de 170°C, evaluado en "COMSOL Multiphysics 4.4"

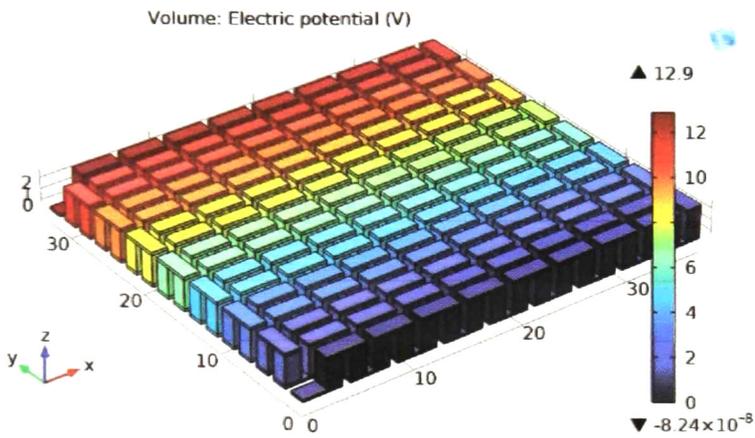


Figura 48 Potencial eléctrico de salida de un dispositivo termoelectrico de base Bi_2Te_3 .

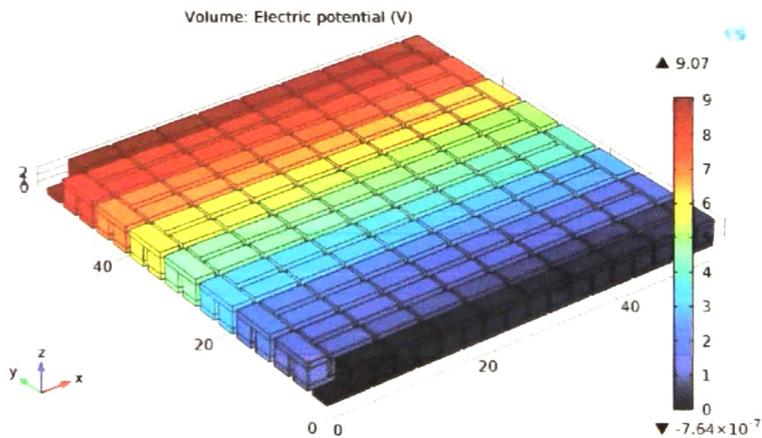


Figura 49 Potencial eléctrico de salida de un dispositivo termoelectrico de base PdTe.

El modelo de elemento finito (MEF), es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería empleado hoy en día para la resolución de problemas que involucran un grado de complejidad, de matemáticas aplicadas así como las fisicomatemáticas, ya que la mayoría de los problemas presentados en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, condiciones de frontera no uniformes, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente.

En otras palabras el MEF es ocupado para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas, el FEM nos ayuda a la visualización de la solución de un problema específico.

Se realizó el estudio de 2 geometrías (figuras 43 y 47) de un sistema termoeléctrico evaluado mediante el software "COMSOL Multiphysics 4.4". Adicionalmente se evaluó el desempeño de 2 materiales termoeléctricos.

En las figuras 43 y 44 se evaluó un elemento termoeléctrico de Bi_2Te_3 tipo n y tipo p, al cual se le aplicó una diferencia de temperatura de $100\text{ }^\circ\text{C}$ arrojando una diferencia de potencial de 0.05 V , el mismo sistema es probado en las figuras 45 y 46 pero con una diferencia térmica de $250\text{ }^\circ\text{C}$, bajo estas condiciones el potencial eléctrico es de 0.12 volts .

En las figuras 47 y 48 se presenta un sistema con 143 elementos termoeléctricos de Bi_2Te_3 acoplados en serie mediante juntas de cobre, el sistema está sometido a una diferencia de temperatura de $170\text{ }^\circ\text{C}$ y arroja una diferencia de potencial de 11.3 V . Finalmente en la figura 49 se presenta el mismo sistema y las mismas condiciones de frontera que las mostradas en la figura 47 intercambiando al Bi_2Te_3 por PbTe arrojando una diferencia de voltaje de 9.07 volts .

El software en todos los casos anteriores resuelve la ecuación 52 la cual solo tiene dependencia con la diferencia de temperatura y las propiedades de los materiales termoeléctricos, es debido a esto y tomando que el Bi_2Te_3 tiene su valor óptimo en 380 K que presenta un mejor resultado que el PbTe que necesita un gradiente de temperatura mayor, ya que sus valores óptimos están aproximadamente en los 500 K .

Utilizando la información recabada por el "COMSOL Multiphysics 4.4" y considerando que el sistema opera en un rango de temperatura bajo la opción más adecuada es el empleo de Bi_2Te_3 como material termoeléctrico adecuado.

Capítulo 5

Celdas solares

En este capítulo se muestran los resultados de la caracterización del panel solar empleado en nuestro sistema híbrido.

La primer opción fue una celda de silicio con una área aproximada de 0.08895 m^2 , la cual después de hacer su caracterización alcanzó una eficiencia de 4.9% eficiencia que se debe al tiempo de la celda y a las conexiones.

La segunda opción consistió en celdas solares pertenecientes a la empresa Solartec S.A. de C.V. las cuales fueron cortadas con las siguientes dimensiones (10.5 x 2.14) cm, la caracterización se realizó bajo una irradiación solar de 920 W/m^2 y apoyados de una resistencia variable de precisión de 0.5 W y 200Ω , se obtiene la información mostrada en la figura 50.

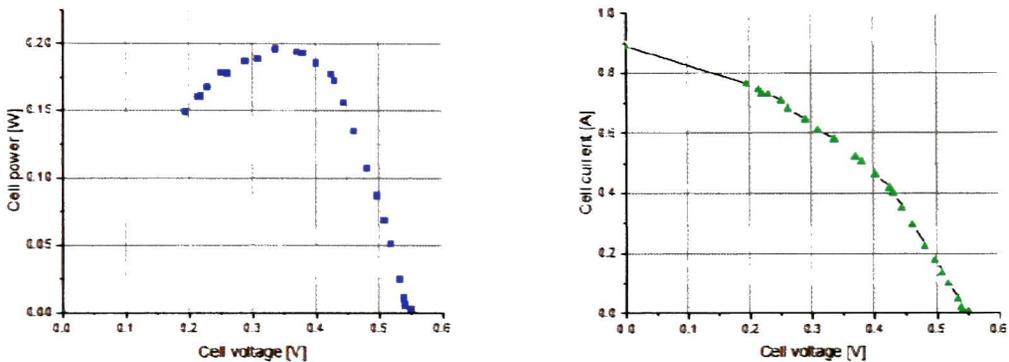


Figura 50 Gráficas de la potencia de salida de una celda solar contra el voltaje de la celda y la corriente de salida contra el voltaje generado por la celda solar.

Acoplando en serie 24 celdas solares de la empresa Solartec S.A de C.V. se obtuvo un arreglo fotovoltaico el cual arrojó una potencia de salida de 4.89 Watts y una eficiencia de 9.856 %, la caracterización se realizó con una irradiación de 920 W/m^2 y la información se observa en la figura 51.

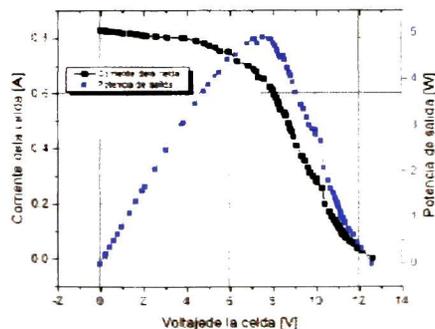


Figura 51 Corriente de la celda solar y la potencia de salida.

Mediante el uso del Software "COMSOL Multiphysics 4.4" y considerando que la velocidad promedio del aire en la locación del CINVESTAV unidad Querétaro es de aproximadamente 6 km/h se recurrió a modelar este proceso en diferentes geometrías, para obtener así una temperatura más uniforme a lo largo del día y que la eficiencia arrojada de la celda solar fuese lo más constante posible.

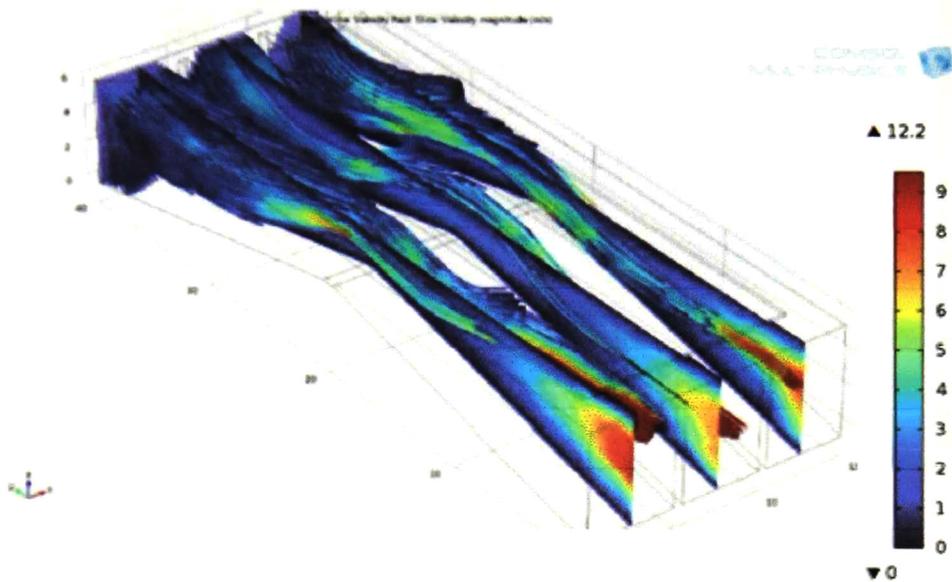


Figura 52 Representación de la velocidad del aire a través de las celdas solares generado en "COMSOL 4.4".

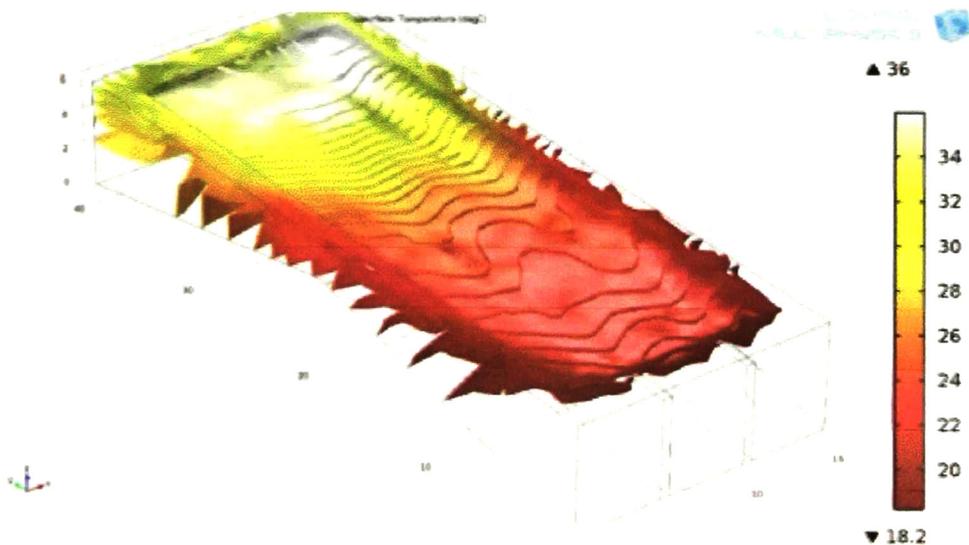


Figura 53 Distribución térmica a lo largo de las celdas solares.

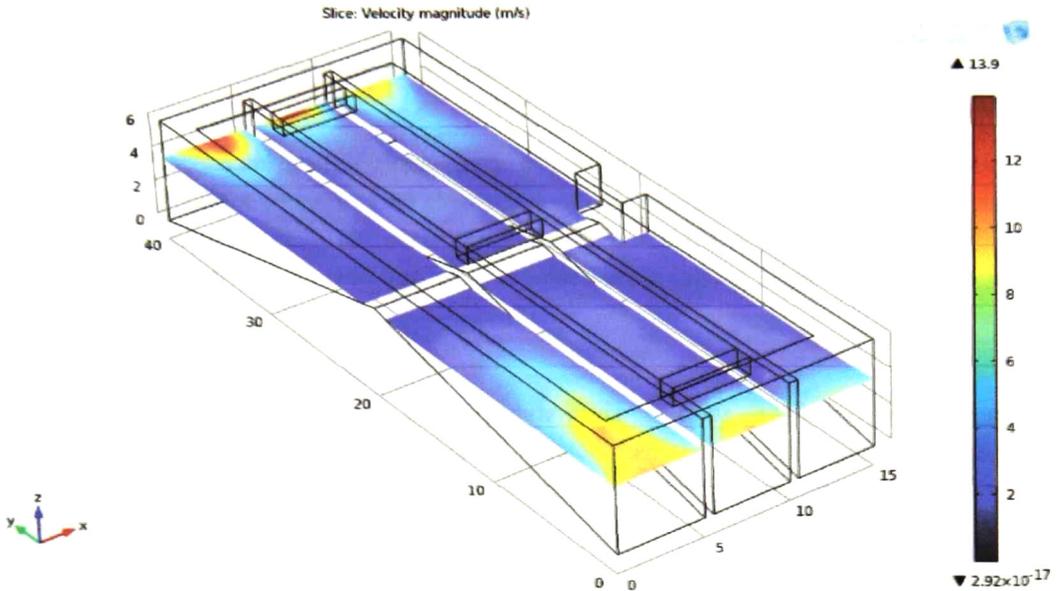


Figura 54 Distribución del viento a través de las celdas solares.

Finalmente la geometría que se empleó fue la propuesta en las figuras 52, 53 y 54 con lo cual se observa un flujo adecuado a lo largo de la geometría y un aumento de velocidad en la zona central disipando calor mediante convección.

Adicionalmente si se incorpora un ventilador a este sistema la tasa de pérdida de calor de las celdas solares sería mayor debido al fenómeno de convección forzada que se generaría dentro de la geometría, permitiendo con esto mantener la estabilidad y la eficiencia del sistema inclusive en lugares donde las condiciones de velocidad de viento sean bajas o nulas.

Capítulo 6

Teoría para el diseño de calentador de agua

En este capítulo se presentará de manera breve la formulación acerca de la teoría del calentador solar.

El contenido principal del capítulo gira en torno al análisis de tres puntos i) balance de energía en el calentador, ii) pérdidas de calor, y iii) circulación natural del líquido en el calentador solar. En el análisis se tienen en cuenta los parámetros más importantes que influyen en el diseño del calentador solar, tales como: radiación solar, temperatura ambiente, materiales empleados, entre otros.

Balance de energía en el calentador solar

El balance de energía tiene como objetivo determinar el calor útil transmitido al agua para establecer con esto la eficiencia del calentador. El calor útil q_{util} , empleado para calentar el agua del depósito, es una parte de la radiación incidente sobre el colector solar, otra parte es disipada al ambiente.

El balance de energía es expresado de manera analítica como:

$$H_T A_c = \dot{Q}_\mu + \dot{Q}_L + \dot{Q}_S \quad (54)$$

El calor útil introducido en la ecuación 54 está representado por el flujo de agua m en el calentador y las temperaturas de entrada y salida del depósito de almacenamiento

$$\dot{Q}_\mu = \dot{m} C_p \Delta T \quad (55)$$

Dónde: H_T es la radiación solar total [W/m^2], A_c área del colector [m^2], \dot{Q}_μ calor útil entregado al agua en el calentador solar [W], \dot{Q}_L calor disipado al ambiente por radiación, convección y conducción [W], \dot{Q}_S calor disipado al ambiente por el depósito de almacenamiento [W], C_p es la capacidad calorífica del agua [$J/(kg \cdot K)$] y \dot{m} flujo másico [kg/s].

La eficiencia del calentador se define, entonces como el porcentaje de la radiación global incidente sobre la superficie efectiva del colector y que se aprovecha como calor útil.

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_\mu}{H_T A_c} \quad (56)$$

En la práctica la eficiencia se determina experimentalmente en un intervalo finito de tiempo; para fines de diseño el periodo de evaluación t puede ser de un día, de un mes o un tiempo mayor. Así, los valores puntuales obtenidos durante el periodo de evaluación son integrados mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_c = \frac{\int_0^t \dot{Q}_\mu dt}{\int_0^t H_T A_c dt} \quad (57)$$

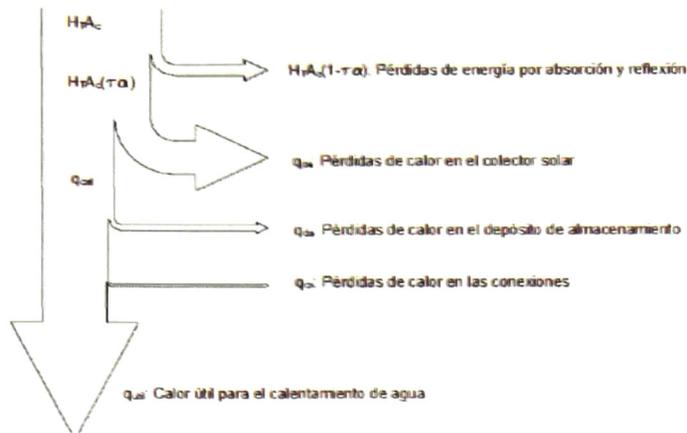


Figura 55 Pérdidas térmicas debido a diversos factores.

Circulación natural del agua en el calentador solar

La circulación natural o circulación por efecto termosifón es un fenómeno que se fundamenta en la variación de la densidad de agua, que es inversamente proporcional al incremento de la temperatura. Si se colocan en un tubo en U dos volúmenes iguales de agua a temperaturas distintas, el nivel de la columna de agua más caliente es mayor respecto a la del agua más fría, esto se explica porque la columna de agua más fría tiene mayor masa que la columna con mayor temperatura.

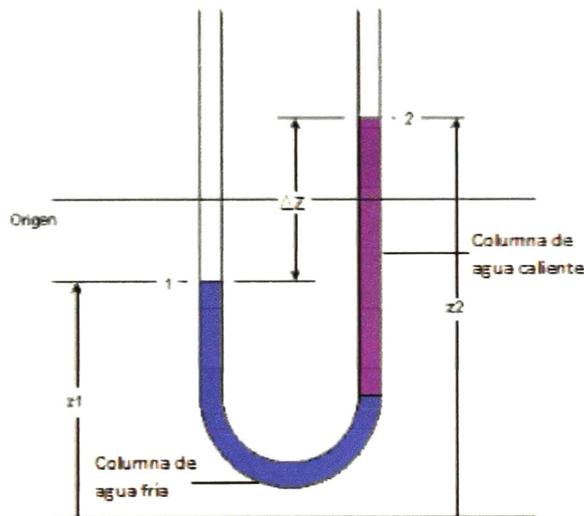


Figura 56 Diagrama esquemático del sistema de termosifón.

Si un fluido está en equilibrio, cada porción del fluido está en equilibrio. Es decir, tanto la fuerza neta como el torque sobre cada elemento del fluido debe de ser cero. Consideremos un pequeño elemento de volumen del fluido sumergido dentro del cuerpo del fluido. Consideremos que este elemento tenga la forma de un disco delgado y esté a una distancia de algún nivel de referencia. El espesor del disco es dy y cada cara tiene un área A .

La masa de este elemento es $dm = \rho dV = \rho A \cdot dy$, y su peso es $(dm)g = \rho g A \cdot dy$. Las fuerzas ejercidas sobre el elemento por el fluido que lo rodea son perpendiculares a su superficie en cada punto.

La fuerza horizontal resultante es cero porque el elemento no tiene aceleración horizontal. Las fuerzas horizontales se deben únicamente a la presión del fluido, y por simetría la presión debe de ser la misma en todos los puntos comprendidos en un plano horizontal en y .

Si tomamos a p como la presión en su cara superior, la fuerza hacia arriba es pA , y las fuerzas hacia abajo son $(p + dp)A$ y el peso del elemento $(dm)g = \rho g A dy$. De aquí que, para el equilibrio vertical:

$$\sum F_y = pA - (p + dp)A - \rho g A dy = 0$$

$$dp = -\rho g dy \quad (58)$$

Integrando la ecuación 58 entre los límites de presión A y B y una diferencia de altura y_A y y_B :

$$\int_{p_A}^{p_B} dp = \int_{y_A}^{y_B} -\rho g dy \quad (59)$$

$$p_B - p_A = \rho g y_A - \rho g y_B$$

Donde F_y son las fuerzas que se ejercen sobre el eje y [N], p es la presión hidráulica [Pa], A es un área determinada [m^2], g es gravedad [m/s^2], dp diferencial de presión, y dy - diferencial de posición.

Partiendo del equilibrio estático entre las dos columnas de fluido se puede escribir

$$Z_f \rho_f = Z_c \rho_c \quad (60)$$

Tomando en consideración que la altura de la columna es unitaria se tiene:

$$h_f = 1 - h_c$$

$$dh = h_c - h_f \quad (61)$$

Para una diferencia de temperatura de 16 °C se obtiene una diferencia de altura de 2.2891 mm de columna de agua, bajo la diferencia de temperatura mostrada anteriormente.

Cálculo de pérdidas y el coeficiente de convección

Para el cálculo de las pérdidas hidráulicas y el coeficiente de convección del sistema es necesario calcular la velocidad del fluido ya que esta variable está relacionada con parámetros antes mencionados.

Para poder determinar la velocidad del flujo, es necesario realizar un balance de energía, mediante la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (39)$$

Donde p_1 y p_2 son las presiones expresadas en [Pa], v_1 y v_2 - las velocidades de entrada y salida del fluido [m/s], g - la aceleración de la gravedad [m/s^2], z_1 y z_2 - alturas del fluido [m], γ - peso específico del fluido [kg/m^3], h_A - energía adicionada al fluido [m], h_R - energía removida del fluido y h_L - las pérdidas de energía debido las pérdidas menores.

Para calcular las pérdidas de carga debido a la fricción dentro de una tubería se recurre a la ecuación de Darcy-Weisbach.

La forma general de la ecuación de Darcy-Weisbach es:

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (63)$$

Donde f es el factor de fricción, L - la longitud de la tubería [m] y D - el diámetro de la tubería [m].

Considerando que se tiene un régimen de flujo laminar, el factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach puede escribirse como:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (64)$$

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensiones típicas de un flujo en una expresión adimensional. Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{v\rho D}{\mu} \quad (65)$$

Donde Re es el número de Reynolds, ρ es la densidad del fluido [kg/m^3], v es la velocidad característica del fluido [m/s] y μ - viscosidad dinámica del fluido [$kg/(m \cdot s)$].

De [49] en los sistemas de termosifón, la cabeza de presión es igualada a la pérdida de energía debida a la fricción del sistema y se puede expresar como:

$$dh = h_L \quad (66)$$

Es necesario tomar en cuenta las pérdidas de energía debido a la fricción de los accesorios existentes en el sistema. Dichas pérdidas son mostradas en la tabla 3.

	Longitud equivalente L_e/D	Cantidad	Subtotal L_e/D
Pérdida a la entrada	0.5	1	0.5

Pérdida a la salida	1	1	1
Cambio de sección	20	2	40
Codo a 90 grados	30	3	90
Codo a 45 grados	16	2	32
Bridas y reducción de sección	50	2	150
Tubo	2.05/.03175	1	64.567
			378.067

Tabla 3 Pérdidas hidráulicas menores debido a accesorios.

La cabeza de presión entonces puede ser expresada en este caso en término del factor de fricción y de la velocidad de flujo [47].

$$h_L = \frac{v^2}{2g} \left(\frac{64\mu L}{v\rho D^2} + L_e \right) \quad (67)$$

Resolviendo para v , se tiene $v = 0.010756 \text{ m/s}$.

Alternativamente utilizando la ecuación de Morrison [50] para determinar pérdidas por fricción en circuito de termosifón:

$$f = \frac{64}{Re} \left[1 + \frac{0.038}{\left(\frac{L}{DRe} \right)^{0.96}} \right] \quad (68)$$

Sustituyendo en la ecuación 69 se tiene la siguiente expresión:

$$0.002289 = \frac{v^2}{2g} \left(378.067 + \frac{64\mu}{D\rho v} \left[1 + \frac{0.038}{\left(\frac{L}{DRe} \right)^{0.96}} \right] \right) \quad (69)$$

Resolviendo la ecuación 69 se obtiene que la velocidad del fluido es $v = 0.010896 \text{ m/s}$, además se comprueba que el tipo de flujo es laminar ya que el número de Reynolds es $Re = 413.771$.

Estimación del coeficiente de convección

El procedimiento para determinar el coeficiente de convección se basa en el desarrollo de los números adimensionales de Nusselt y Reynolds.

Dependiendo de la forma del canal, se tiene que utilizar una relación determinada, para el caso de canales cilíndricos donde el flujo es laminar se puede ocupar [51].

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065 \cdot \left(\frac{D}{L}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.04 \cdot \left(\left(\frac{D}{L}\right) \cdot Re \cdot Pr\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (70)$$

Donde Nu es el número de Nusselt, y Pr es el numero adimensional de Prandtl.

Definiendo ahora al número de Prandtl (Pr)

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = 6.00191 \quad (71)$$

Podemos calcular la expresión 70, la cual es esencial para el cálculo del coeficiente de convección.

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065 * 0.015488 * 413.771 * 6.0019}{1 + (0.015488 * 413.771 * 6.0019)^{\frac{2}{3}}} = 5.37735$$

Es posible determinar el coeficiente de convección para una tubería circular con la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{Nu k}{D} = 97.5012 \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \quad (40)$$

Calculando ahora el flujo másico se tiene

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot \pi \cdot r^2 = 0.008484 \frac{kg}{s} \quad (73)$$

La temperatura promedio del agua está dada por:

$$\bar{T} = T_s - (T_s - T_i) e^{\left(-\frac{h_c A_s}{\dot{m} C_p}\right)} = 23.4409 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (74)$$

Con estos datos se puede calcular la potencia térmica del dispositivo.

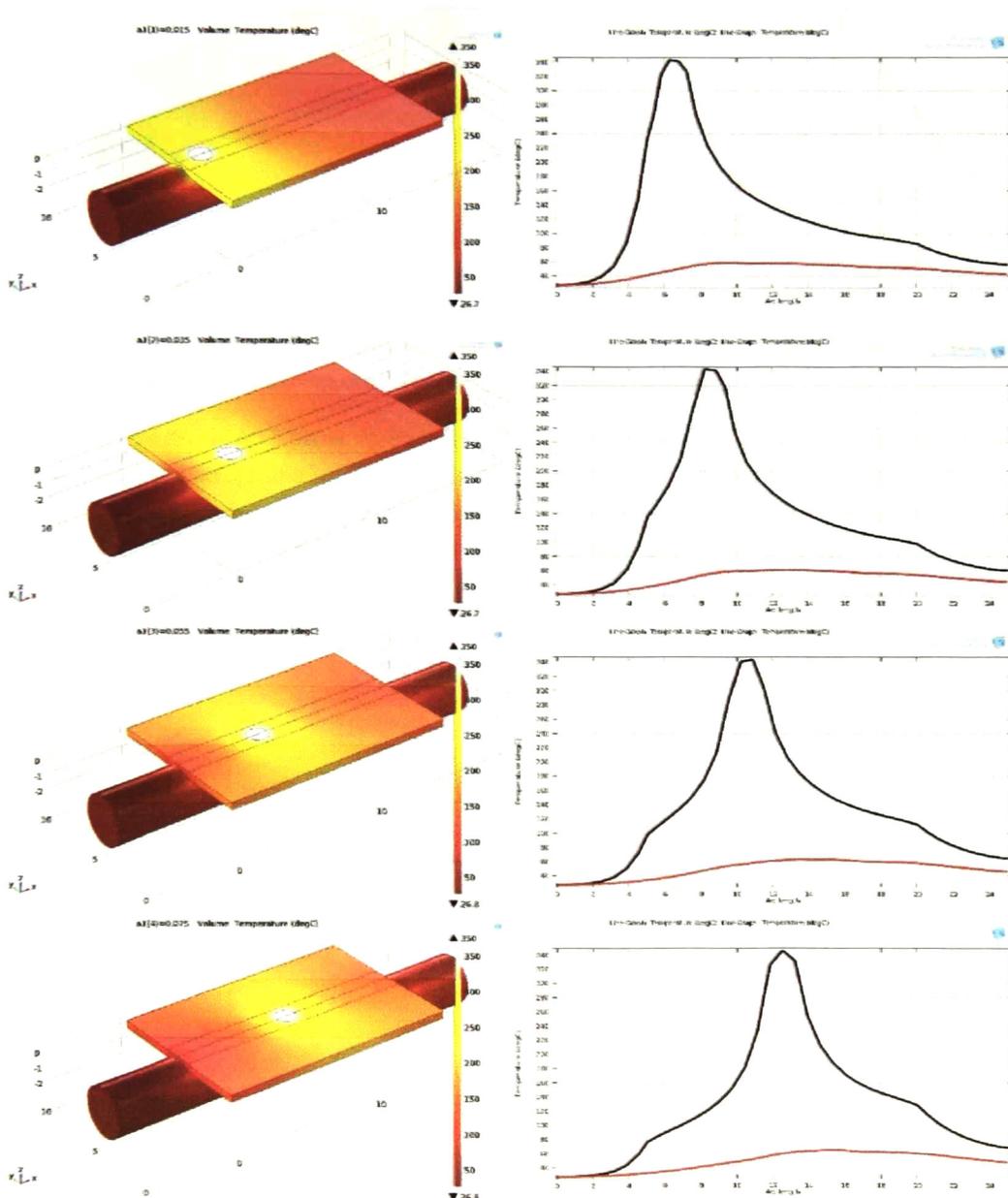
$$\dot{Q} = C_p \dot{m} \Delta T = 121.996 \text{ W} \quad (41)$$

Con la información obtenida en los capítulos anteriores realizar un proceso de optimización es conveniente, para esta tarea recurrimos al método de elemento finito (FEM) con el paquete computacional COMSOL Multiphysics 4.4 para poder determinar así las condiciones óptimas de diseño.

Se realizó un estudio tridimensional de la transferencia de calor en un sistema conjugado (sistema que involucra transferencia de calor en fluidos y en sólidos), en un régimen de estudio estacionario. Se evaluó el desempeño térmico del sistema variando la posición de la carga térmica mediante el barrido del parámetro el cual definía la posición de la carga térmica. Para todos los casos fueron empleados las mismas variables físicas.

En la figura 57 se observa el desempeño térmico en diferentes coordenadas además de la eficiencia que varía casi 50% dependiendo de la posición

Estos son los resultados obtenidos:



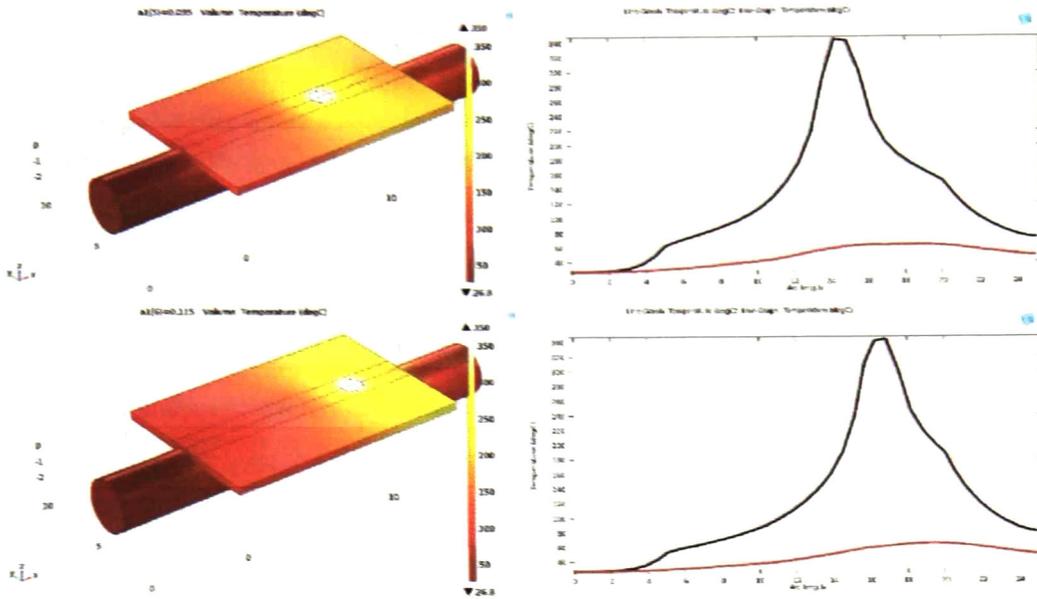


Figura 57 Modelo MEF del intercambiador de calor, en diferentes configuraciones.

El método de elemento finito ayudo a definir la posición idónea para la concentración térmica, y la distancia optima que es 2.5 cm desde la entrada del fluido de trabajo.

La figura 57 se divide en 5 pares de imágenes las cuales definen la capacidad del sistema, el primer par de imágenes arroja una eficiencia del 89.99%, la siguiente secuencia arroja una eficiencia del 100% capacidad térmica que funciona como referencia, la tercer secuencia 89.17%, la cuarta secuencia arroja una eficiencia del 80.3% y la ultima una eficiencia del 49.58%.

Capítulo 7

Sistema híbrido Fotovoltaico-TEG-Térmico

El trabajo previo visto en este documento ha servido para el desarrollo, construcción y estudio de un sistema híbrido de generación de energía electro-térmica.

El sistema consta de un grupo de celdas fotovoltaicas acopladas a un sistema de concentración solar (lente de Fresnel). En el plano focal de concentración se ubica un termo electrogenerador (TEG) comercial de la marca Kryotherm modelo TGM-127-1.4-2.5, el cual está acoplado a un sistema de refrigeración. Variables como el contacto térmico, diseño del sistema, así como los materiales empleados para su construcción fueron escogidas en base al estudio realizado para determinar el desempeño óptimo en diferentes condiciones de operación.

La eficiencia eléctrica del sistema se divide en 2: la eficiencia arrojada por los paneles fotovoltaicos y la concerniente al termo-electrogenerador.

La eficiencia eléctrica del TEG es de alrededor del 3%, la eficiencia fotovoltaica es de alrededor del 9.5% y la eficiencia térmica de alrededor de 42%.

La eficiencia total del sistema es aproximadamente del 50%, y produce 7 W de energía eléctrica y 120 W de energía térmica almacenada en agua caliente.

En la figura 58 se observa el dispositivo híbrido armado.



Figura 58 Diferentes vistas del prototipo híbrido solar

La temperatura de la placa caliente en el sistema es aproximadamente 230 °C y de 70 °C para la placa fría, lo cual arroja la eficiencia del TEG antes mencionada.

Con la información recabada de los capítulos anteriores se analizó la geometría propuesta con las siguientes variables: velocidad del fluido de 0.01 m/s y la carga térmica de 350 °C a una distancia de 2.5 cm de la entrada del fluido de trabajo.

Esta geometría fue analizada mediante el paquete computacional de método de elemento finito "COMSOL Multiphysics 4.4" para obtener su desempeño.

Los resultados fueron los siguientes:

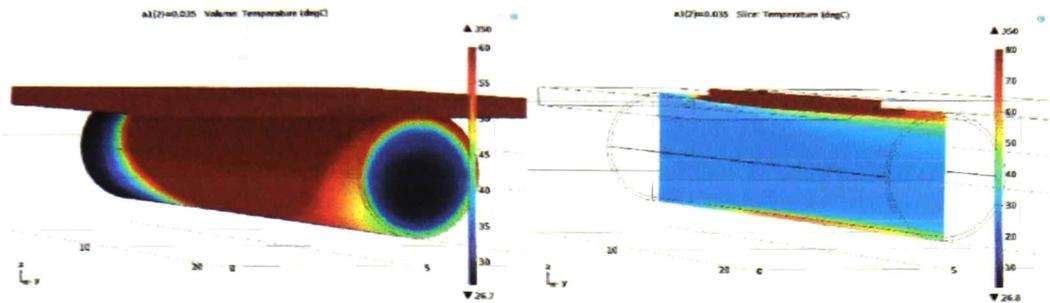


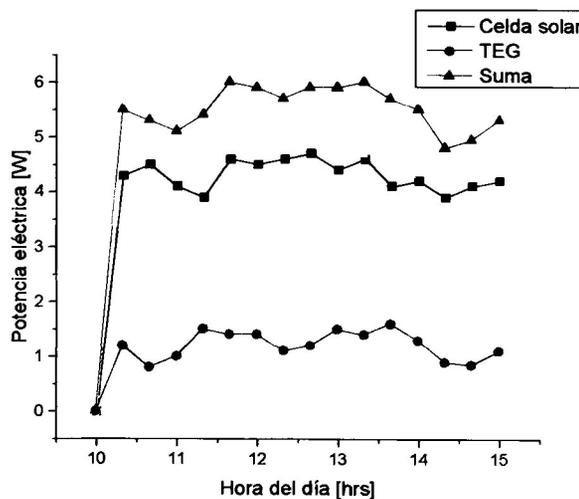
Figura 59 Modelo MEF a detalle de la tubería del intercambiador de calor.

La figura 59 muestra los resultados arrojados por el programa "COMSOL Multiphysics 4.4" donde se puede destacar que la temperatura del fluido de trabajo es aproximadamente 35 °C que es la temperatura que se obtiene en los procesos experimentales, con lo que el sistema queda validado desde el modelo de elemento finito y el método experimental.

Resultados experimentales

Con la intención de analizar el desempeño experimental del sistema, diferentes parámetros fueron medidos. Los parámetros que se midieron fueron los siguientes: temperatura ambiente, temperatura de entrada y salida del agua, flujo másico y potencia generada. Los experimentos se realizaron en la ciudad de Querétaro (coordenadas: 20.589059, -100.418966) [52] durante los meses de julio del año 2014 y enero del año 2015.

Nuestro dispositivo híbrido produce energía eléctrica y térmica, la potencia eléctrica generada por el sistema durante el día en sus diferentes configuraciones se muestra en las figuras 60 y 61



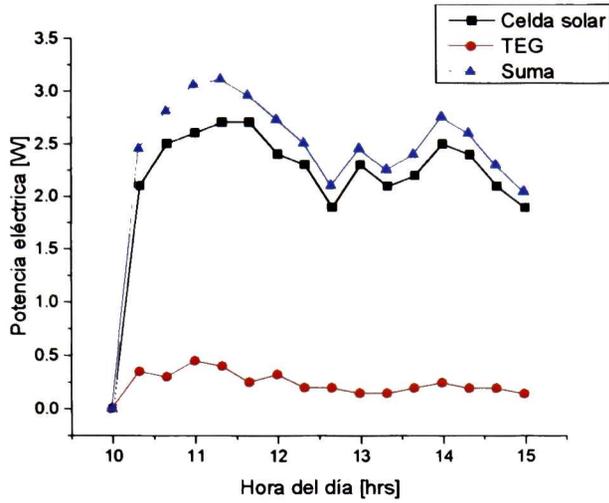


Figura 60 Gráfico de la potencia eléctrica generada contra el tiempo de los elementos del sistema híbrido solar.

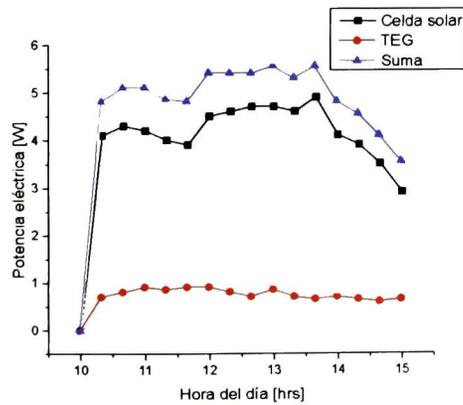
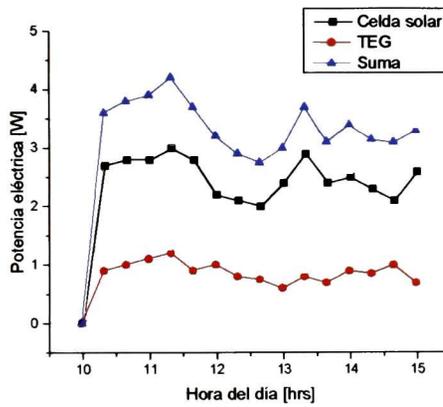


Figura 61 Gráfico de la potencia eléctrica generada contra el tiempo de los elementos del sistema híbrido solar.

Las figuras 62 y 63 presentan la temperatura de operación del SH así, como la temperatura ambiente del día que se realizó la medición.

Los resultados fueron los siguientes:

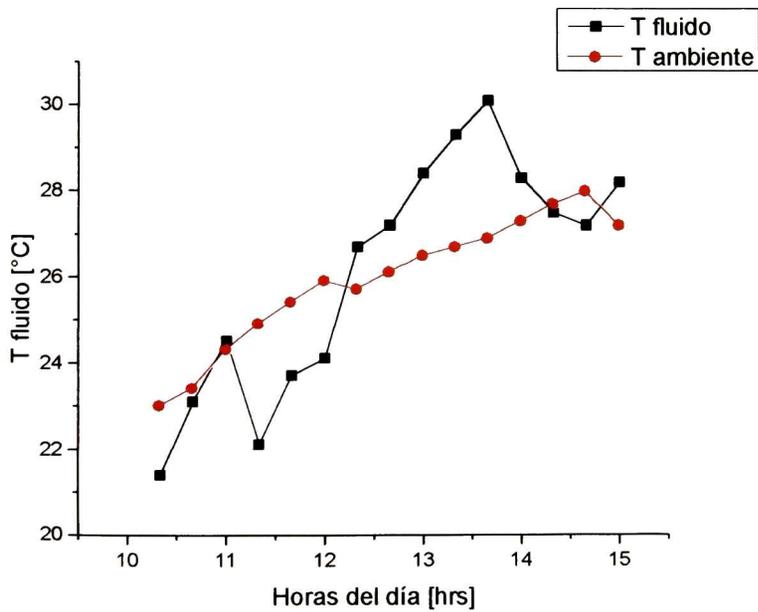
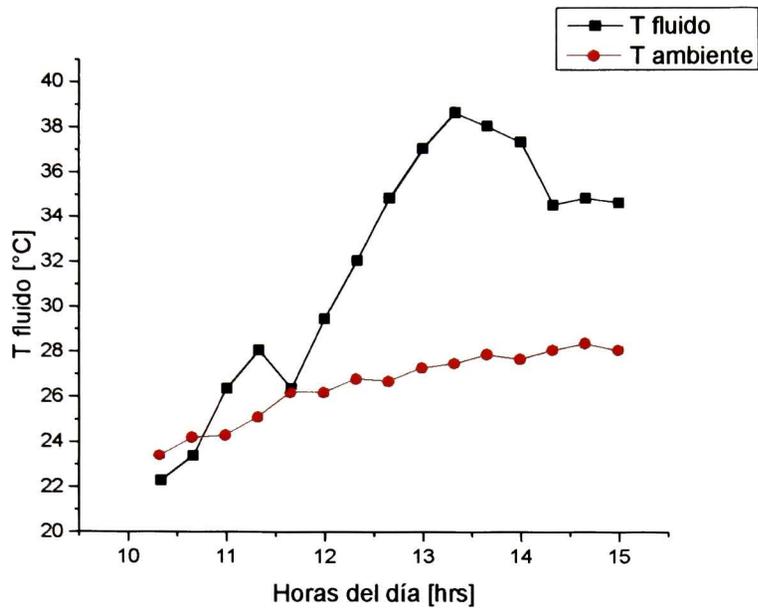


Figura 62 Temperatura del agua y del ambiente a lo largo del día.

Se observa que la configuración que aporta mayor cantidad de energía térmica es aquella en donde el foco térmico incide directamente en la placa de absorción térmica, la diferencia de temperatura que se registra de una configuración a otra es de aproximadamente 8 °C perdiendo eficiencia térmica en el proceso pero ganándola en eficiencia eléctrica.

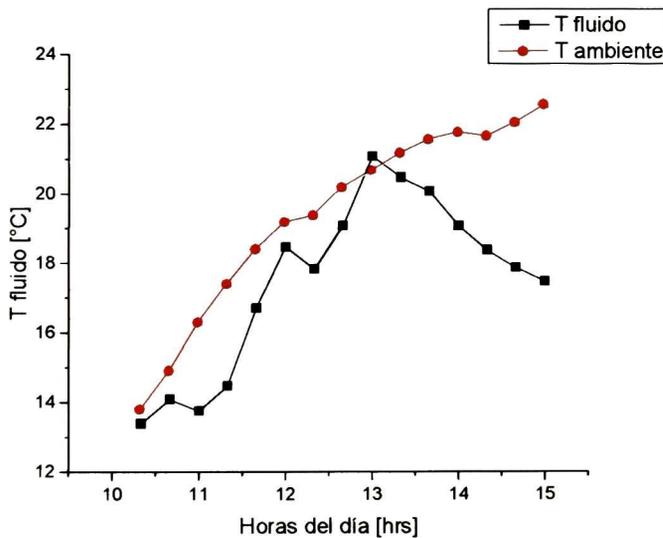
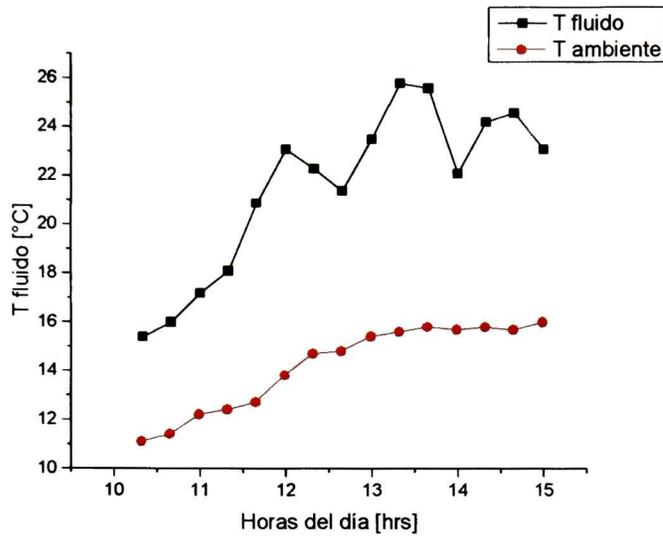


Figura 63 Temperatura del agua y del ambiente a lo largo del día.

Comparando las figuras 62 y 63 podemos darnos cuenta que la capacidad térmica del equipo está en función de las condiciones climáticas y la irradiación que se presente a lo largo del día, otro factor muy importante a considerar es que el cielo se encuentre nublado, parcialmente nublado o totalmente despejado factor que influye en la captación de energía proveniente del sol.

En la tabla siguiente se muestra una serie de valores calculados que sirven para dimensionar la viabilidad de nuestro prototipo.

Nombre	Variable	21 julio 2014	22 julio 2014	8 enero 2015	9 enero 2015	Unidades
Temperatura máxima	T_{max}	38.7	29.3	25.8	20.5	[°C]
Temperatura mínima	T_{min}	22.3	21.4	15.4	13.4	[°C]
Concentración	C	120	120	120	120	
Velocidad de flujo	v	8.93×10^{-3}	1.447×10^{-3}	6.53×10^{-3}	1.227×10^{-3}	[m/s]
Flujo másico	\dot{m}	7.038×10^{-3}	1.1424×10^{-3}	5.166×10^{-3}	9.701×10^{-4}	[kg/s]
Eficiencia térmica	η_t	~38.35	~32.461	~31.91	~25.47	[%]
Número de Reynolds	Re	361.36	52.5809	181.87	36.2993	n/a
Eficiencia eléctrica	η_e	~9.5	~9.5	~8	~8.5	[%]
Número de Nusselt	Nu	5.123	3.9569	4.795	3.9154	n/a
Número de Prandtl	Pr	5.625	6.275	8.220	7.7332	n/a
Coefficiente de convección	h_c	93.587	72.284	87.611	71.5254	[W/m ² °C]
Eficiencia total	η_T	~48	~42	~40	~34	[%]

Tabla 4 Valores experimentales de diferentes variables medidas.

Discusión de resultados

En este trabajo se muestran los resultados más importantes realizados a un prototipo de sistema híbrido fotovoltaico-termo-eléctrico (PVTe), obtenidos mediante análisis teórico, experimental y por simulación. El diseño y la simulación del prototipo juegan un papel muy importante en la manufactura de un nuevo modelo. Gracias al diseño y la simulación mediante el método de elemento finito es posible construir un prototipo optimizado.

La construcción de este SH PVTe debió estar basada en el diseño conceptual y la simulación previa de varios escenarios. El proceso de fabricación, del cual no se detalla nada en este trabajo, fue un proceso complicado debido a los materiales utilizados y a los procesos de manufactura de los mismos donde la parte más complicada fue el maquinado y proceso de soldadura del colector térmico, también hay que tomar en cuenta dentro del proceso de manufactura la exactitud para fijar las dimensiones más críticas.

Debido a que la idea original del sistema fotovoltaico-termo-eléctrico pasó por una serie de modificaciones, de manera que pudiera ser lo más económico, sacrificamos la eficiencia. El factor de seguimiento solar es muy importante, sin embargo en este trabajo no se consideró la construcción de algún tipo de acoplamiento de seguimiento solar (suntracker) puesto que se quería

conservar el costo más bajo posible, además del tiempo que se disponía no era el suficiente para realizarlo.

La eficiencia térmica puede ser incrementada modificando nuestro sistema de concentración, cuyo área de concentración es baja.

Se observó que la eficiencia térmica se incrementa cuando el valor del flujo másico es mayor, con lo que se obtiene una mayor potencia térmica, que es uno de los principales objetivos de este trabajo la generación de energía por medios no tradicionales (alternativos a combustibles fósiles).

En general se observa una buena correlación entre las pruebas experimentales y el análisis teórico, de esta manera se validan las variables más importantes que afectan al sistema. Esta experiencia puede servir para el diseño y desarrollo de un sistema híbrido de mayor capacidad térmica y con esto poder escalar un prototipo. Como parte del desarrollo de este proyecto, se sugiere poner especial atención al método de construcción del colector. La estructura y otros aspectos como la construcción del panel solar son críticos debido a la fragilidad de las celdas solares individuales.

Nuestro sistema híbrido solar para generación de energía eléctrica es capaz de producir energía eléctrica y agua caliente, fue diseñado y construido partiendo de la unidad de concentración solar (lente de Fresnel). Nuestro sistema de concentración es capaz de alcanzar una temperatura de 350°C en su plano focal que tiene un área aproximada de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, la cual puede servir en dos configuraciones la configuración con mayor aprovechamiento térmico, la cual está en contacto directo con la placa de concentración térmica y la configuración para aprovechar el máximo potencial eléctrico, en la cual el punto focal es enfocado en el disipador térmico el cual está en contacto directo con el TEG y este es enfriado por el fluido de trabajo que en nuestro caso es agua.

El estudio del desempeño arrojó que nuestro sistema puede alcanzar una eficiencia cercana al 50% y producir más de 100 W de energía, la cual puede ser aprovechada en aplicaciones domésticas por el momento.

Tomando en cuenta el desarrollo de materiales alternativos para la generación de energía eléctrica, se puede esperar que en el futuro cercano el desempeño de sistemas híbridos pueda sobrepasar a los sistemas tradicionales de generación eléctrica, en particular en países como el nuestro donde la insolación térmica es alta.

Conclusiones

Fue realizado el estudio de simulación y experimental de un sistema híbrido fotovoltaico térmico eléctrico bajo concentración solar, utilizando generadores termoeléctricos TEG y elementos fotovoltaicos PV. El modelo presento un coeficiente de convección mayor a los 90 $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$, el cual es mayor que algunos coeficientes de convección reportados en la literatura.

Se realizó el estudio, diseño y construcción de un sistema híbrido fotovoltaico-termo-eléctrico con un factor de concentración de 120. El sistema muestra una eficiencia total superior a los 50% en condiciones óptimas (mediciones de verano).

El sistema muestra eficiencias más bajas que las presentadas en la literatura, sin embargo el trabajo arrojó las herramientas necesarias para el diseño e implementación de un prototipo que cuente con mayor eficiencia. Una de esas herramientas es el uso de la simulación por método de elemento finito (MEF).

Capítulo 8

Películas selectivas delgadas cerámicas /poliméricas

Resumen

Se prepararon diferentes películas cerámicas poliméricas como películas selectivas solares, a partir de la técnica sol-gel. Las películas fueron fabricadas con los siguientes materiales: tetraetil ortosilicato (TEOS), acetato de polivinilo (PVA) y colorantes para obtener una película selectiva solar híbrida mediante la técnica de recubrimiento por inmersión o “dip-coating”. Adicionalmente se prepararon recubrimientos con sílice coloidal, con la técnica “dip-coating”. Los recubrimientos híbridos resultan ser útiles en rangos de temperatura de 80-120°C, ya que muestran una absorción del 70%, adicionalmente los recubrimientos coloidales presentan una buena protección como barrera térmica, además de presentar una absorción mayor al 80%.

Introducción

El uso de las energías renovables desde las últimas décadas se ha incrementado debido al incremento de las necesidades energéticas, esto debido a la escases y al incremento de la demanda de los combustibles fósiles [2], [53]. El uso de películas selectivas para la conversión de la energía solar en potencia térmica es una de las formas más redituables de usar la energía solar [54]. Las películas selectivas solares han sido utilizadas desde hace décadas en sistemas solares térmicos, destacando técnicas y materiales que se emplean para estos dispositivos.

Los materiales más utilizados en el mercado para rango medio de temperatura (100°C-350°C) son: TiNO_x, níquel negro [55], cromo negro [56], cobre negro [7],[57], películas gráficas entre otras, que son utilizados en diferentes sustratos (aluminio, aceros inoxidable, aceros al bajo carbono, cobre) para el incremento de la eficiencia térmica de los equipos.

Recubrimientos SOL-GEL

La aplicación de los novedosos métodos para la síntesis de materiales, se modificó con el surgimiento de tecnología “sol-gel”.

Los orígenes de la técnica del sol-gel datan de 1846 [58] cuando químico francés Jaques Ebelmen obtuvo el primer alcóxido metálico de la reacción de SiCl₄ y alcohol, al obtener un sólido transparente vítreo al estar expuesto al ambiente. El proceso de obtención de vidrios mediante esta técnica comenzó a desarrollarse en los años 70, por un grupo de científicos entre los que destacan S. Sakka [59] y M. Yamane en Japón, H. Schimdt y H. Scholze [60] en Alemania entre otros a lo largo del mundo.

La importante innovación que aporta el procedimiento sol-gel es la de poder preparar, a temperaturas bajas, materiales muy puros, con alto grado de homogeneidad que no siempre se pueden conseguir por otro método.

Las ventajas del procedimiento sol-gel frente a otros métodos son:

- La posibilidad de obtener compuestos de elevada pureza.
- Diversidad de compuestos químicos.
- Homogeneidad estructural.
- Preparación de materiales vítreos y transparentes sin fundir.

Sin embargo, el proceso de sol-gel conlleva lagunas desventajas, entre las que destacan:

- Los reactivos de partida suelen ser caros.
- La dificultad de obtener piezas masivas e incluso capas con espesor grueso como consecuencia de la elevada contracción que sufre el material durante el secado.
- Dificultad de preparar capas con espesores mayores a 2 μm .

Proceso sol-gel

Un *sol* es una suspensión coloidal de partículas en un líquido y puede ser utilizado para generar polímeros inorgánicos de los cuales se pueden obtener materiales cerámicos. En la técnica sol-gel se parte de un precursor o compuesto inicial para formar la suspensión coloidal (sol). Posteriormente las condiciones de la suspensión se alteran de tal forma que las partículas tienden a polimerizarse entre sí hasta formar un gel [61].

Rutas de síntesis del proceso sol-gel

Dentro del proceso sol-gel existen dos variantes que esencialmente difieren en sus productos de partida y en sus reacciones [62].

Primer método: formación de un partir de una suspensión coloidal o de un hidrosol de sílice.

Segundo método: formación de un gel a partir de la hidrólisis y policondensación de compuestos metalorgánicos en un medio acuoso-alcohólico.

Preparación de geles a partir de sílice coloidal

El procedimiento de preparación (fig. 64) la solución de sílice es incorporada en forma de suspensión coloidal acuosa o, a veces, como silicato en estado coloidal. La mezcla resulta ser una suspensión muy homogénea con micelas de sílice de un tamaño nanométrico. La transformación de la suspensión en gel se lleva a cabo por un proceso de gelificación que transcurre con un aumento gradual de la viscosidad hasta que se produce su coagulación formándose un material rígido altamente poroso.

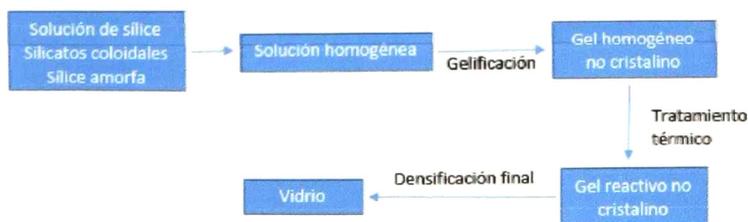


Figura 64 Proceso sol-gel para la preparación de vidrios a partir de soluciones coloidales

Preparación de geles a partir de alcóxidos

Éste es el método más utilizado y consiste en la preparación de soles sometidos a hidrólisis y condensación de derivados metalorgánicos en soluciones alcohólicas.

Las reacciones que se tienen lugar en esta vía de preparación son las siguientes (fig 65):

- Reacción de los alcóxidos metálicos y no metálicos. Se producen enlaces entre los componentes.
- Reacción de hidrólisis. Los grupos OR se sustituyen parcial o totalmente por grupos OH.
- Reacción de condensación. Se eliminan los grupos OR y OH y se produce una transición al estado de óxidos.

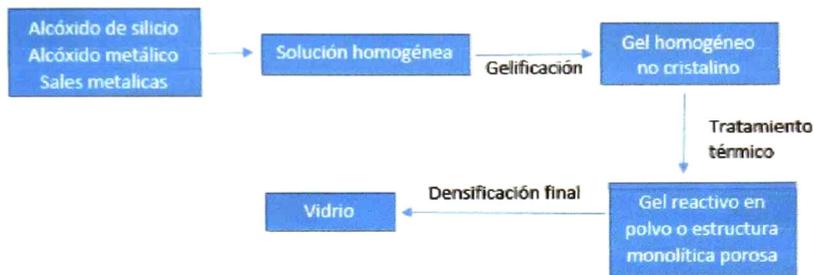


Figura 65 Proceso sol-gel para preparación de vidrios a partir de compuestos metalorgánicos

Desarrollo experimental

Los recubrimientos híbridos con estructura vítrea son ampliamente utilizados para proteger y recubrir a metales y aleaciones. Incrementando las propiedades de la superficie metálica relativas a la absorción térmica y a la corrosión, sin atentar las propiedades originales del sustrato (térmicas, dureza).

En este trabajo se investigaron las aplicaciones de 2 recubrimientos como películas selectivas solares, obtenidas mediante la técnica sol-gel.

Diagrama de bloques del desarrollo experimental

En la figuras 66 se muestran dos diagramas de bloques del desarrollo experimental llevado a cabo para la realización de este estudio.

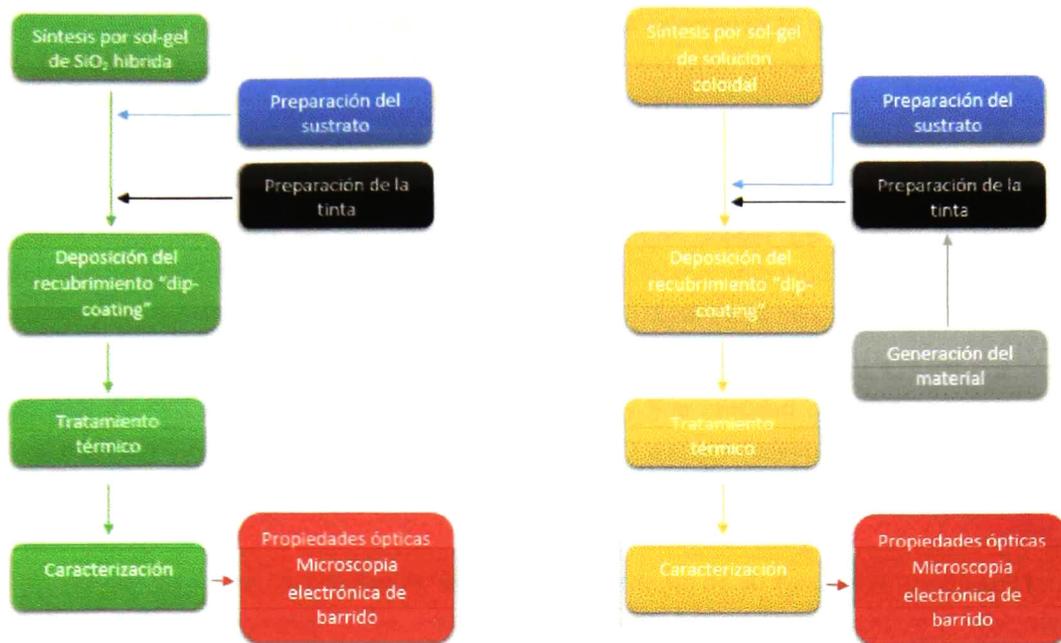


Figura 66 Diagrama de bloques del desarrollo experimental para los experimentos realizados.

A continuación se explica detalladamente la realización de cada paso de en este diagrama de bloques.

Síntesis por sol-gel de SiO₂ hibrida

Para la preparación de la síntesis de SiO₂ hibrida, se partió de reactivos de grado analítico de tetraetil ortosilicato (TEOS) Si(OC₂H₅)₄, como precursor de SiO₂, etanol, agua y ácido nítrico HNO₃ el cual funciona como catalizador.

La preparación se realizó en un vaso de precipitado, a temperatura ambiente añadiendo los reactivos de una relación TEOS/etanol = 1, agua/TEOS = 0.23333, HNO₃/TEOS = 0.13333, para obtener 4.63 g de SiO₂ por cada 35.5 ml de solución preparada. La resina de PVA utilizada tiene un contenido de sólido del 54.5% al 55%.

Se mantuvo la solución en agitación constante a temperatura ambiente por 40 min.

Preparación del sustrato

Para la preparación de los sustratos (vidrios Corning), se realizó una limpieza con etanol y acetona para la eliminación de polvo y quitar la grasa en los vidrios.

Preparación de la tinta

Como colorante, fue utilizado negro de marfil # 319. Primeramente se incorporó a la mezcla de sol-gel una cantidad medida de colorante arrojando resultados no alentadores ya que se precipitaba el colorante.

Posteriormente se preparó una “tinta”, la cual fue hecha calentando 10 ml de aceite vegetal a una temperatura de 80°C y agregando 1 y 2.5 gramos de colorante negro de marfil incorporándolo mediante una agitación constante durante 40 min. Posteriormente se deja reposar y enfriar la “tinta”.

Deposición del recubrimiento “dip-coating”

Con la tinta preparada se incorporan a nuestra solución sol-gel 1.5 gramos de las “tintas” preparadas. Con esta solución se proceden a pintar los sustratos utilizando la técnica “dip-coating”, y después se dejan secar a temperatura ambiente por un lapso de 30 min.

Los experimentos que se realizaron tienen las siguientes formas de etiquetas R25105 que indican un 25% de PVA en peso, 10% de colorante en peso y 5 la cantidad de recubrimientos que se realizaron mediante la técnica “dip-coating”, las variables que se emplearon son 25% y 50% de PVA, 10% y 25% de colorante y 5, 10 y 20 inmersiones en “dip-coating”

Tratamiento térmico

Una vez que los sustratos pintados se han secado por un lapso de 30 minutos se introducen en una mufla la cual se encuentra a una temperatura de 150°C por un lapso de 45 min para que se sintericen.

Caracterización del recubrimiento

Una vez densificado el recubrimiento, se preparó para su evaluación. Se analizaron las propiedades ópticas de reflexión y trasmisión usando un fotospectrómetro (UV-VIS QE65000 Ocean Optics).

Concluidas las pruebas ópticas se preparó la superficie para la evaluación mediante el microscopio de barrido electrónico (SEM).

Síntesis por sol-gel de solución coloidal

Para la preparación de la síntesis por el proceso sol-gel de la solución coloidal, se partió de reactivos de grado industrial de metasilicato de sodio, sílice coloidal “Optacol NX-1030 con 30% en peso de SiO₂, hidróxido de potasio (KOH al 90% de pureza) y agua (H₂O).

La preparación se realizó en un vaso de precipitado de plástico, a temperatura ambiente colocando 50 ml de sílice coloidal y 82 ml de agua con agitación mecánica a 400 RPM por 5 minutos. Se pesan 6.5 gramos de metasilicato de sodio y se agregan a la solución con agitación por 10 minutos.

Posteriormente se pesan 12.5 gramos de KOH y se disuelven en 60 mililitros de agua y se agregan a la solución que estuvo en agitación por 10 minutos.

Preparación del sustrato

Para la preparación de los sustratos (vidrios Corning), se realizó una limpieza con etanol y acetona.

Generación del material

Se preparó óxido de cobre II mediante láminas de cobre, las cuales fueron pulidas y posteriormente introducidas en la mufla a una temperatura de 650 °C por 40 minutos, se colocaron a temperatura

ambiente y se dejaron enfriar por un lapso de 1 hora. Concluido el proceso de enfriado se obtuvo CuO.

Con el óxido de cobre II obtenido se molió mediante un mortero y fue pasado por una malla #150, el material que no pasaba era molido nuevamente y tamizado para obtener un tamaño de partícula homogéneo.

Preparación de la tinta

La tinta se preparó incorporando óxido de cobre II como colorante, incorporándolo mediante agitación vigorosa por 15 minutos y posteriormente dispersada en baño ultrasónico durante ½ hora.

Deposición del recubrimiento “dip-coating”

Con la tinta preparada se incorpora a nuestra solución sol-gel 0.1, 0.25 y 0.5 gramos de CuO. Con esta solución se proceden a pintar los sustratos utilizando la técnica “dip-coating”, y después se dejan secar a temperatura ambiente por un lapso de 30 min.

Los experimentos que se realizaron tienen las siguientes formas de etiquetas R 10CuO5300 que indican un 0.1 gramos de CuO, 5 la cantidad de recubrimientos que se realizaron mediante la técnica “dip-coating” y 300 la temperatura a la que fueron sinterizados los recubrimientos. Las variables que se emplearon son: 0.1, 0.25 y 0.5 gr de CuO, 5, 10 y 20 inmersiones en “dip-coating” y 100, 200, 300 y 400°C.

Tratamiento térmico

Una vez que los sustratos pintados se han secado por un lapso de 30 minutos se introducen en una mufla la cual se encuentra a una temperatura de 100, 200, 300 y 400°C por un lapso de 45 min para que se sintericen.

Caracterización del recubrimiento

Una vez densificado el recubrimiento, se preparó para su evaluación. Se analizaron las propiedades ópticas de reflexión y trasmisión usando un fotospectrómetro (UV-VIS QE65000 Ocean Optics).

Concluidas las pruebas ópticas se preparó la superficie para la evaluación mediante el microscopio de barrido electrónico (SEM).

Resultados

En este trabajo se investigó el comportamiento de recubrimientos selectivos solares para un rango medio de temperatura (100-350°C)

Caracterización del recubrimiento sol-gel de SiO₂ híbrida

Los mejores resultados en cuanto a las propiedades ópticas se presentan a continuación en la figura 67 donde se muestra la reflexión obtenida para las películas, donde los mejores resultados se tienen en R 50105 y R501020.

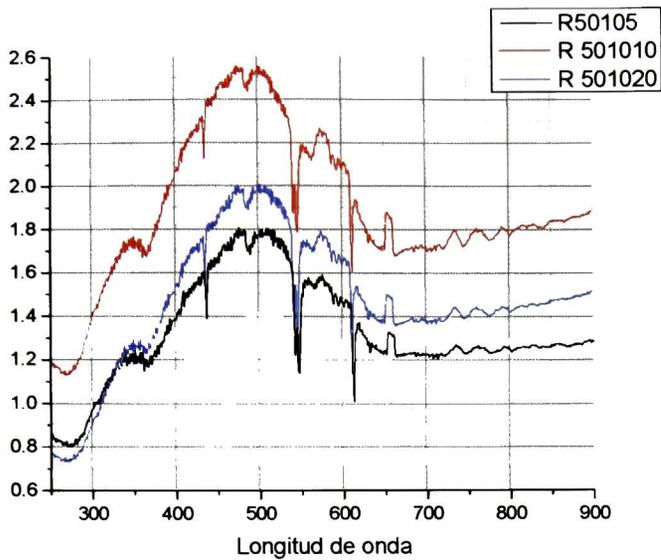


Figura 67 Reflexión de diferentes películas

En la figura 68 se muestran los resultados de transmisión para las películas de sol-gel híbridas donde las se observa que la muestra R 501020 tiene una absorción cercana al 70%.

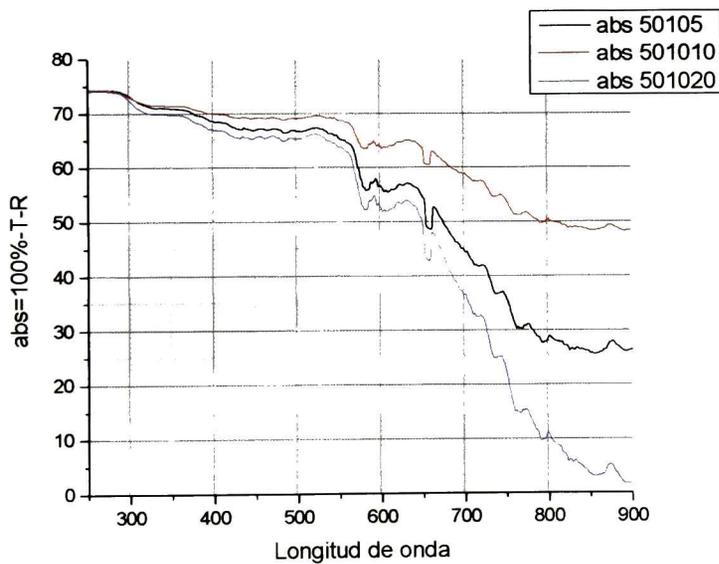


Figura 68 Transmisión de distintas configuraciones de recubrimientos.

Es de esperar que para un menor contenido de PVA, se tenga una película más cerámica y por lo tanto más dura y frágil, es por eso que las muestras con un 25% arrojaron los peores resultados en

la caracterización óptica y presentan mayor agrietamiento en comparación que las muestras con 50% de PVA.

Con esta información procedemos a mostrar los resultados obtenidos por SEM de los recubrimientos selectivos solares.

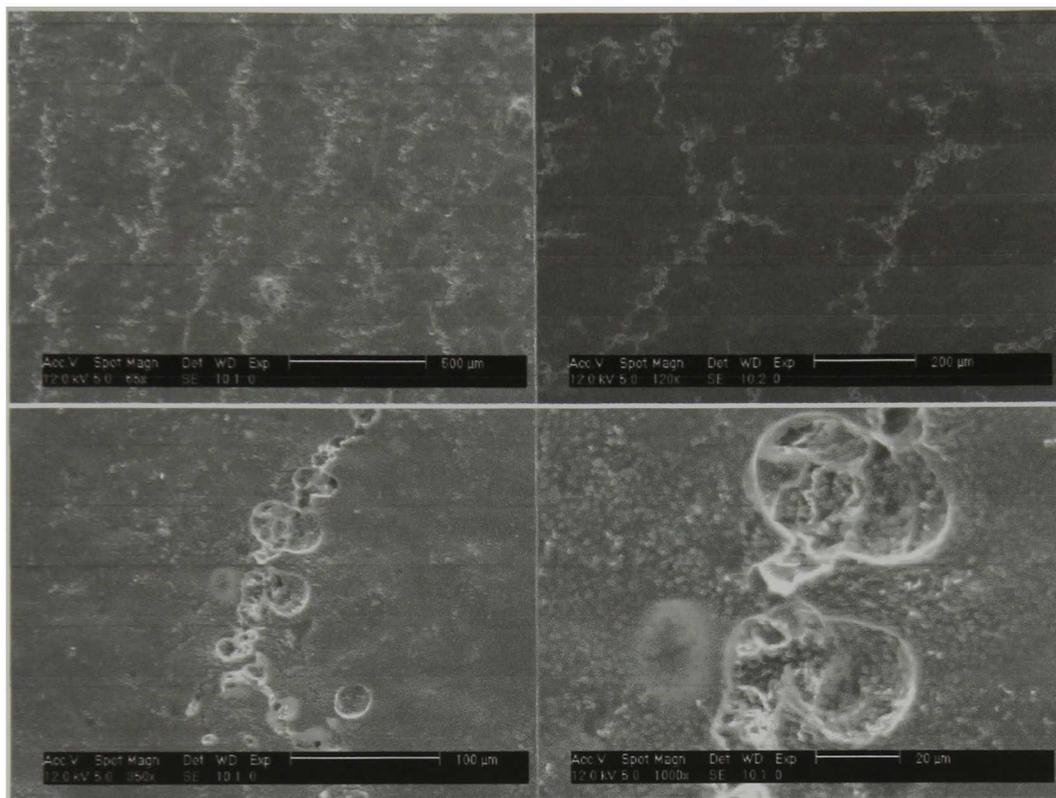
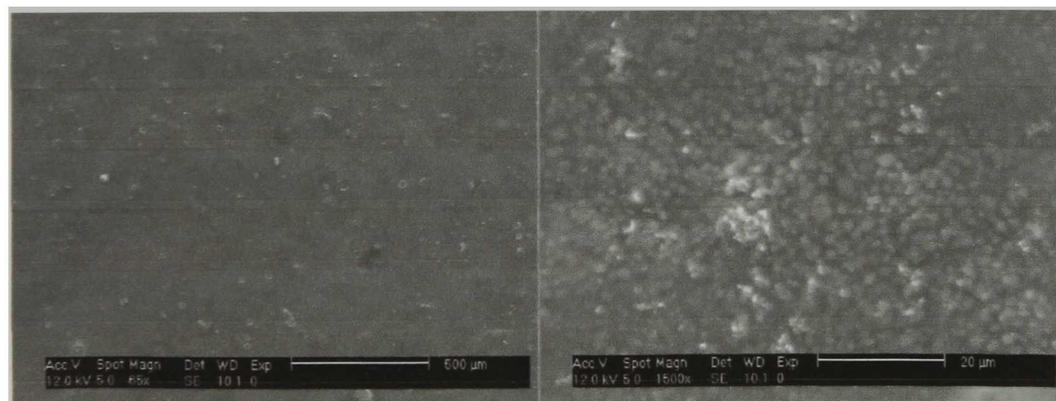


Ilustración 69 Micrografía SEM del recubrimiento híbrido con un 25% de PVA, se observan grietas dentro de la estructura del recubrimiento.



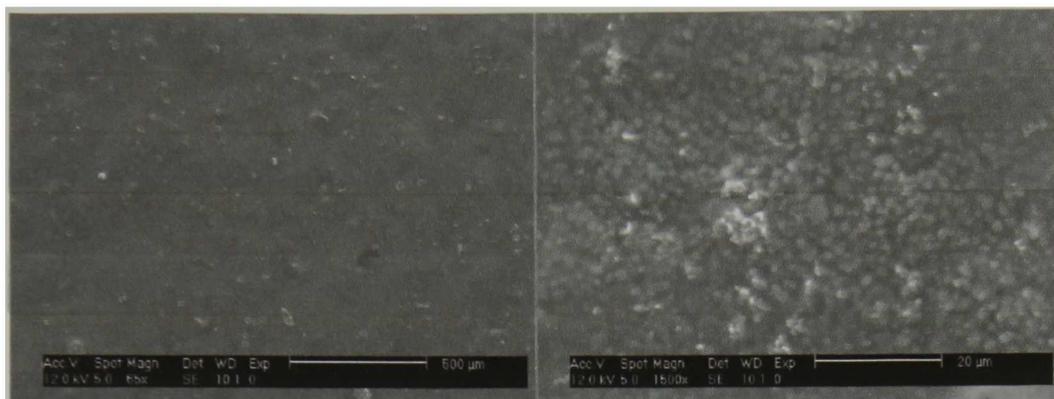


Figura 70 Micrografía SEM del recubrimiento híbrido con un 50% de PVA.

En la figura 70 se observa un recubrimiento híbrido con 50% de PVA, lo primero que se observa de las micrografías es la homogeneidad del recubrimiento, además no se observan grietas como en el caso de la (fig 69) donde las grietas aparecen.

Caracterización del sol-gel de la solución coloidal

Los mejores resultados para los recubrimientos a partir de la solución coloidal se dan para la etiqueta RCuO10400, que muestra un porcentaje de reflexión de aproximadamente 5%.

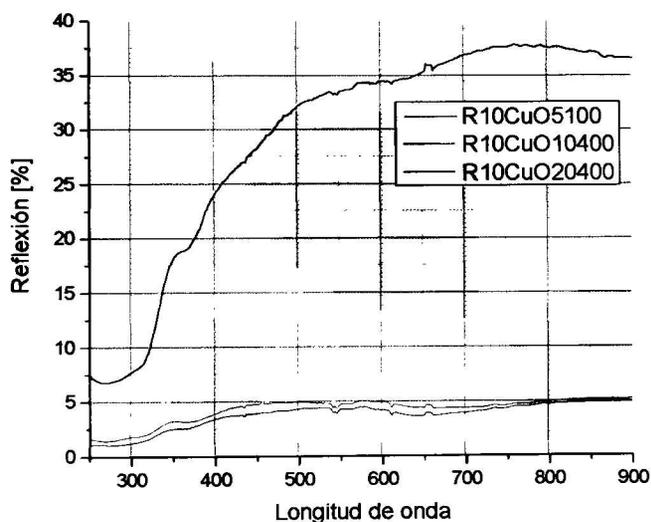


Figura 71 Reflexión de diferentes películas

En la figura 72 se muestran los resultados de absorción para las películas de sol-gel coloidales donde se observa que la muestra Abs10CuO10400 tiene una absorción cercana al 90%.

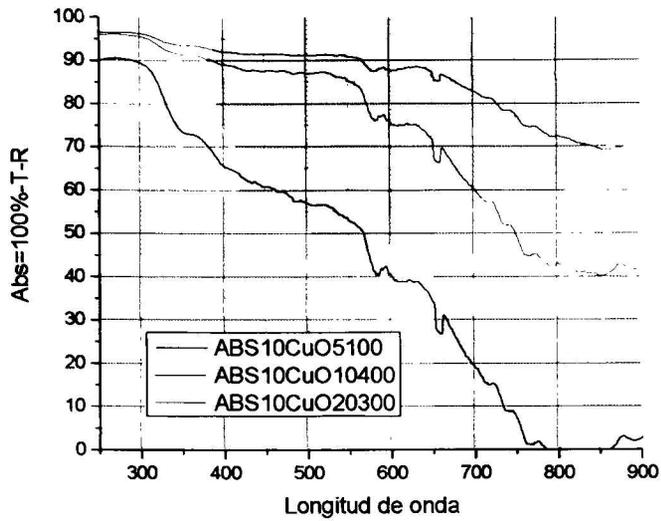


Figura 72 Transmisión de distintas configuraciones de recubrimientos.

Los resultados obtenidos mediante SEM de los recubrimientos generados a partir de sílice coloidal se muestran en la figura 73, donde se observa uniformidad en el recubrimiento, así como, las partículas de óxido de cobre II.

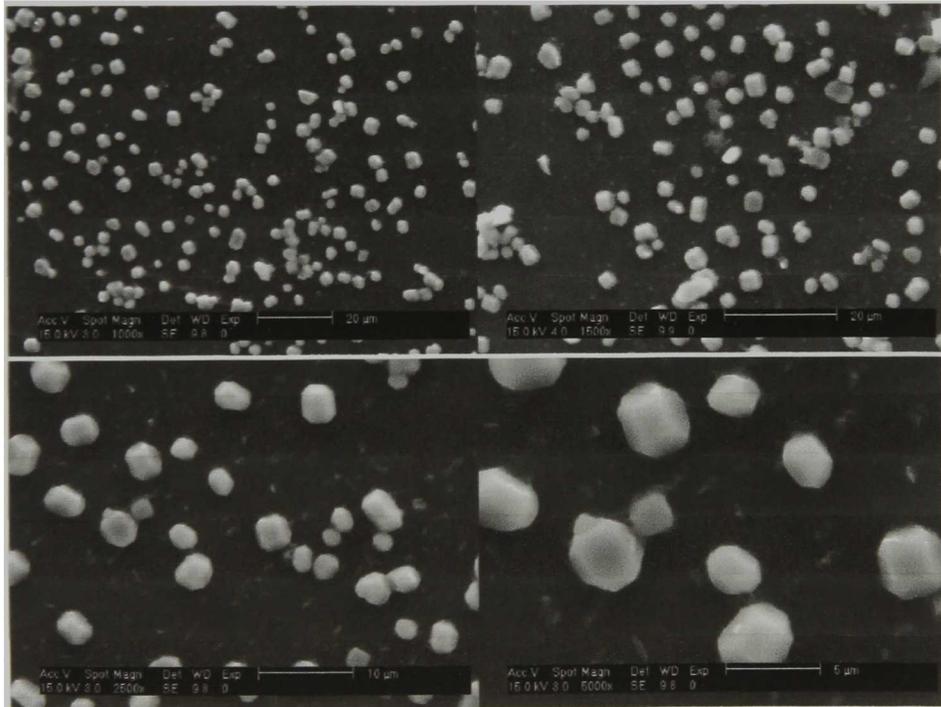


Figura 73 Micrografía SEM del recubrimiento generado con sílice coloidal.

Discusión de resultados

Al principio del capítulo se mencionaron algunos materiales de películas selectivas solares que existen, en la actualidad uno de los mejores recubrimientos es el recubrimiento solar de la marca Almeco Solar modelo TiNOX el cual consiste en una lámina de aluminio o cobre recubierta mediante la técnica de sputtering de un conjunto de capas absorbentes la cual le da propiedades ópticas muy interesantes para aplicaciones solares.

La capa TiNOX ofrece una absorción solar aproximada del 95% y una emisividad térmica aproximada al 4%, la empresa Almeco Solar ofrece varios modelos de esta capa selectiva. El costo por metro cuadrado de este recubrimiento oscilado entre 500 y 700 USD.

La empresa china Guangzhou Hopesun Solar Equipment Co. ofrece recubrimientos similares a los de Almeco Solar a un costo de entre 400-500 USD. El pedido mínimo es de 100 piezas de este recubrimiento.

El recubrimiento que se obtuvo mediante la técnica de sol-gel ofrece propiedades ópticas aceptables para colectores solares de baja temperatura, ya que el costo aproximado por litro del recubrimiento cerámico es de 100 pesos. Supongamos que por cada litro se cubre un metro cuadrado de colector solar, comparado con el precio de la marca comercial es 72 veces más barato.

En cuanto al recubrimiento generado con sílice coloidal muestra buenos resultados ópticos, ya que la absorción de las películas es mayor al 80% y baja reflexión.

Las propiedades térmicas que muestran las películas de sílice coloidal son buenas en un rango menor a los 500°C.

Conclusiones

Se desarrollaron y se evaluaron las propiedades ópticas y estructurales de 2 tipos de recubrimientos selectivos, siendo el de mejor resultado el revestimiento obtenido de compuestos coloidales con una reflexión menor al 5% y una absorción mayor al 80%, el rango de operación de este recubrimiento es para temperaturas menores a 500°C y mayores a los 200°C.

En cuanto a los recubrimientos obtenidos con compuestos metalorgánicos se tienen buenas propiedades en un rango de operación de 120°C a 30°C, con una absorción menor al 70% en el rango de color del espectro solar y una baja reflexión.

El recubrimiento preparado a partir de sílice coloidal, mostró un rango de operación mayor a los 400°C, con buenas propiedades ópticas, por lo que puede ser utilizada como película protectora térmica.

Capítulo 9

Perspectivas futuras y conclusiones

Como resultado de la investigación realizada a lo largo de este proyecto, diferentes ideas sobre futuras investigaciones surgieron, relacionando el uso de lentes de Fresnel en sistemas híbridos para producción de energía (energía termo-eléctrica), así mismo, surgieron ideas con el empleo de la simulación por elemento finito para poder escalar y diseñar nuevos equipos. Aquí se presentan algunas ideas:

El dispositivo de conversión solar que mayor eficiencia presenta en el mercado es el sistema cilindro parabólico debido a su costo-benéfico, colocando refuerzos de concentración e implementando dispositivos como celdas solares y generadores termoeléctricos la eficiencia del sistema híbrido aumentaría de forma importante y el costo de la energía producida se reduciría. Otra idea acerca del tema es implementar lentes de Fresnel de mayor tamaño para el calentamiento de un arreglo de generadores termoeléctricos ya que existen pocas publicaciones acerca del tema. En la literatura también se menciona que para que un sistema híbrido sea más eficiente el uso del área que ocupe el equipo debe ser optimizado al máximo y esto se podría hacer colocando celdas fotovoltaicas transparentes que sean capaces de absorber determinada longitud de onda del espectro solar que son invisibles para nuestros ojos.

Otra inquietud que surgió durante el proceso de investigación, fue la implementación de biomasa dentro de un sistema híbrido, ya que en países como México y en Latinoamérica el uso de esta fuente de energía sigue siendo importante en determinados sectores de la sociedad.

Conclusiones

Fue realizado el estudio de simulación y experimental de un sistema híbrido fotovoltaico térmico eléctrico bajo concentración solar, utilizando generadores termoeléctricos TEG y elementos fotovoltaicos PV. El modelo presento un coeficiente de convección mayor a los 90 [W/m^2K], el cual es mayor que algunos coeficientes de convección reportados en la literatura.

Se realizó el estudio, diseño y construcción de un sistema híbrido fotovoltaico-termo-eléctrico con un factor de concentración de 120. El sistema muestra una eficiencia total superior a los 50% en condiciones óptimas (mediciones de verano).

El sistema muestra eficiencias más bajas que las presentadas en la literatura, sin embargo el trabajo arrojó las herramientas necesarias para el diseño e implementación de un prototipo que cuente con mayor eficiencia. Una de esas herramientas es el uso de la simulación por método de elemento finito (MEF).

Se desarrollaron y se evaluaron las propiedades ópticas y estructurales de 2 tipos de recubrimientos selectivos, siendo el de mejor resultado el revestimiento obtenido de compuestos coloidales con una reflexión menor al 5% y una absorción mayor al 80%, el rango de operación de este recubrimiento es para temperaturas menores a 500°C y mayores a los 200°C.

En cuanto a los recubrimientos obtenidos con compuestos metalorgánicos se tienen buenas propiedades en un rango de operación de 120°C a 30°C, con una absorción menor al 70% en el rango de color del espectro solar y una baja reflexión.

El recubrimiento preparado a partir de sílice coloidal, mostró un rango de operación mayor a los 400°C, con buenas propiedades ópticas, por lo que puede ser utilizada como película protectora térmica.

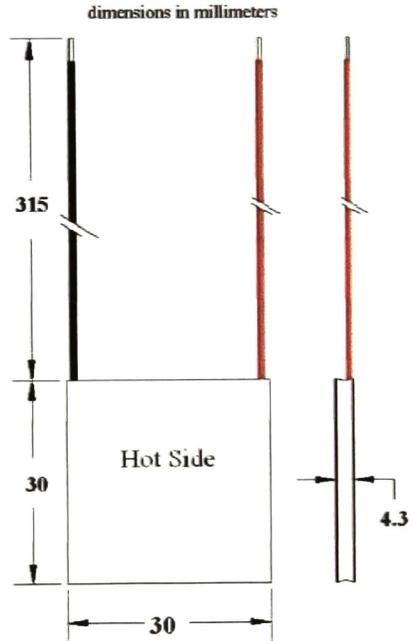
G2-30-0313 Thermoelectric Power Generation Module Specifications

The proprietary bonding technique used to assemble Tellurex power generation modules enables them to be used in unequalled temperature ranges with unequalled thermal cycling capabilities. The G2 thermoelectric power generation module alloy is tuned for optimal operation in the temperature range of 200-250°C and can withstand continuous operating temperatures of 330°C.

Standard configuration is:

- Teflon insulated leads 300 to 330 mm (12 to 13 inches) stripped ends approx. 6mm (1/4 inch)
- 30 mm by 30 mm (1.181 inches by 1.181 inches)
- Silicone perimeter seal dielectric protection
- Black graphite thermal interface material applied to hot and cold side (hot side indicated by embossed graphite)

Performance Specifications	Optimum*	Application**	
Parameter	T _{hot} 300°C T _{cold} 30°C	T _{hot} 250°C T _{cold} 80°C	(explanation of parameter)
Open circuit voltage	10.8	6.8	No load voltage measured at TEG
Matched load voltage	5.4	3.4	Voltage output when load resistance equals internal resistance
Matched load current	1.0	0.61	Current output when load resistance equals internal resistance
Matched load power	5.4	2.1	Power resultant at the load (P=I×V)
Matched load resistance	5.4	5.7	Internal resistance of TEG module at the operating temperature
Heat flow through TEG	~113	~70	Approximate watts of heat flowing through the thermoelectric generator
Heat flux density	~12.6	~7.8	Approximate watts of heat per square centimeter
AC resistance (@27°C)	3.4 ohms		Internal resistance measured at room temperature



Operation Cautions:

- T_{hot} not to exceed 400°C intermittent
- T_{cold} not to exceed 175°C
- Do not apply heat without adequate heat sink

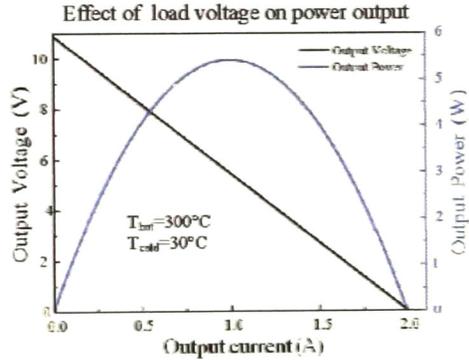
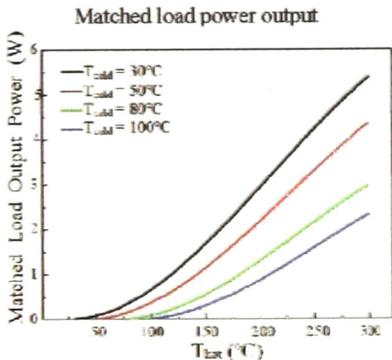
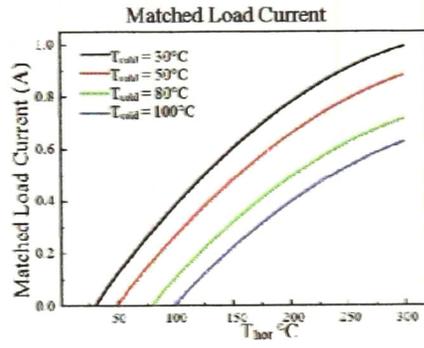
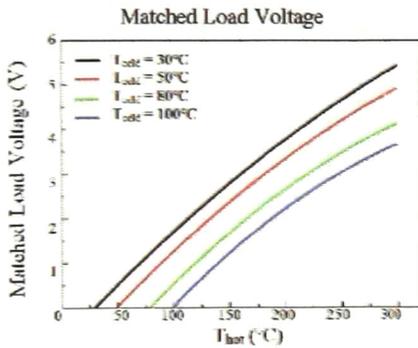
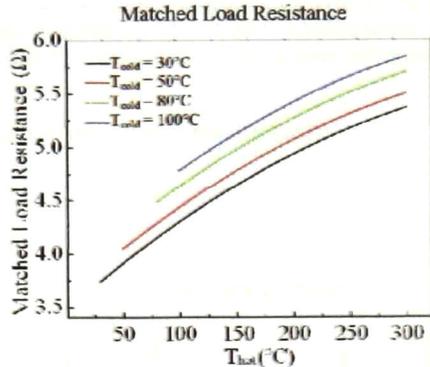
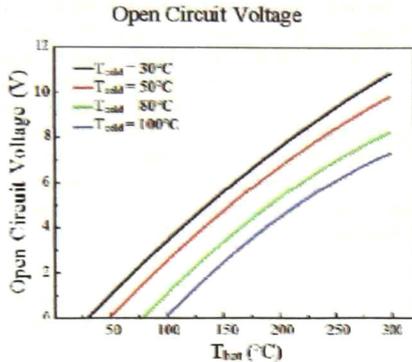
*Optimum specification is an example of material performance
 **Application specification is an example of a typical assembly performance

Contact us...we're ready to help:

Sales offices: +1 877-774-7468
 Web: www.tellurex.com
 Email: sales@tellurex.com
 Mail: 1462 International Drive
 Traverse City, Michigan



G2-30-0313 Thermoelectric Power Generation Module Specifications



Performance Graphs and specifications are based on tests and measurements in controlled laboratory conditions.
 Actual performance in applications may be influenced by conditions not present in laboratory testing.
 Specifications and materials are subject to change without notice.

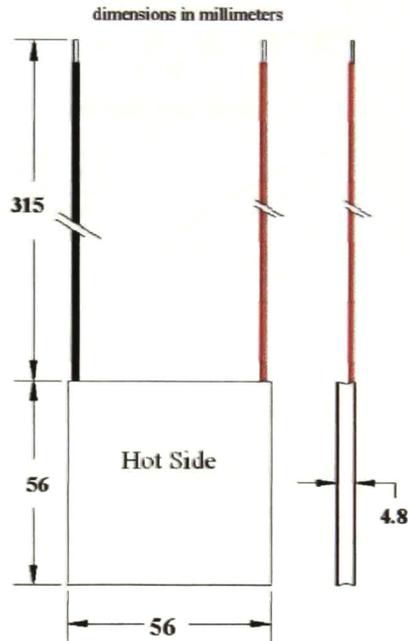
G2-56-0375 Thermoelectric Power Generation Module Specifications

The proprietary bonding technique used to assemble Tellurex power generation modules enables them to be used in unequalled temperature ranges with unequalled thermal cycling capabilities. The G2 thermoelectric power generation module alloy is tuned for optimal operation in the temperature range of 200-250°C and can withstand continuous operating temperatures of 330°C.

Standard configuration is:

- Teflon insulated leads 300 to 330 mm (12 to 13 inches) stripped ends approx. 6mm (1/4 inch)
- 56 mm by 56 mm (2.205 inches by 2.205 inches)
- Silicone perimeter seal dielectric protection
- Black graphite thermal interface material applied to hot and cold side
(hot side indicated by embossed graphite)

Performance Specifications	Optimum*	Application**	
Parameter	T_{hot} 300°C T_{cold} 30°C	T_{hot} 250°C T_{cold} 80°C	(explanation of parameter)
Open circuit voltage	8.8	5.3	No load voltage measured at TEG
Matched load voltage	4.4	2.7	Voltage output when load resistance equals internal resistance
Matched load current	3.68	2.2	Current output when load resistance equals internal resistance
Matched load power	16.2	5.9	Power resultant at the load ($P=IXV$)
Matched load resistance	1.19	1.28	Internal resistance of TEG module at the operating temperature
Heat flow through TEG	~337	~196	Approximate watts of heat flowing through the thermoelectric generator
Heat flux density	~10.8	~6.3	Approximate watts of heat per square centimeter
AC resistance (@27°C)	0.6 ohms		Internal resistance measured at room temperature



Operation Cautions:

- T_{hot} not to exceed 400°C intermittent
- T_{cold} not to exceed 175°C
- Do not apply heat without adequate heat sink

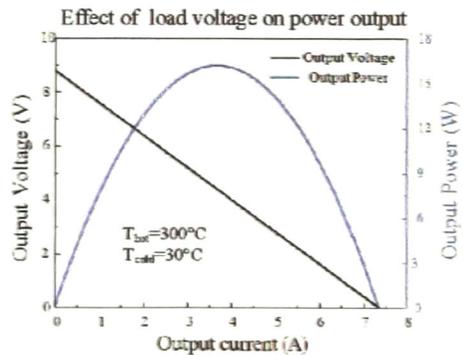
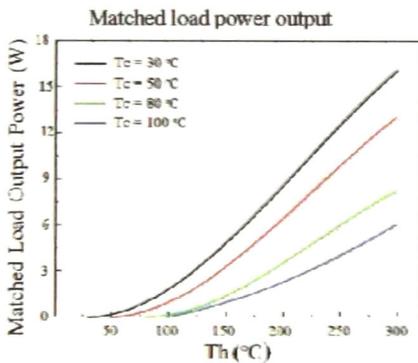
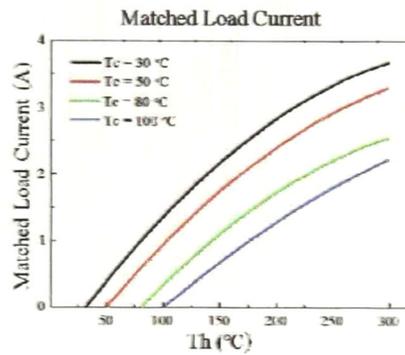
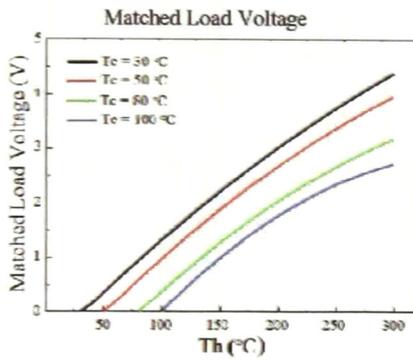
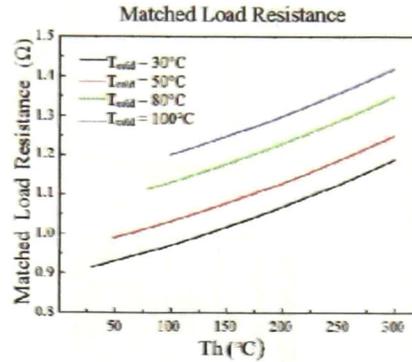
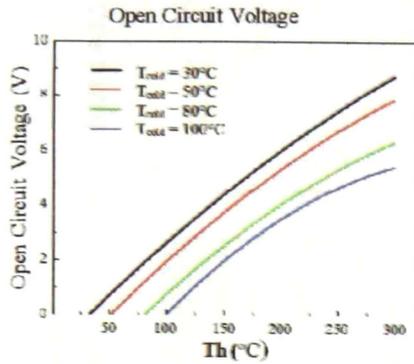
*Optimum specification is an example of material performance

**Application specification is an example of a typical assembly performance

Contact us...we're ready to help:

Sales offices: +1 877-774-7468
 Web: www.tellurex.com
 Email: sales@tellurex.com
 Mail: 1462 International Drive
 Traverse City, Michigan

G2-56-0375 Thermoelectric Power Generation Module Specifications



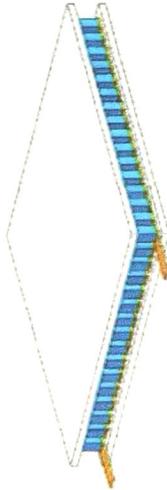
Performance Graphs and specifications are based on tests and measurements in controlled laboratory conditions. Actual performance in applications may be influenced by conditions not present in laboratory testing. Specifications and materials are subject to change without notice.



KRYOTHERM

6 Aerodromnaya street, Saint-Petersburg, 197348 Russia
 Tel: +7 812 394-13-10, fax: +7 812 394-12-67, E-mail: info@kryotherm.ru, http://www.kryothermtec.com

SPECIFICATION OF GENERATING THERMOELECTRIC MODULES TGM-127-1.4-2.5

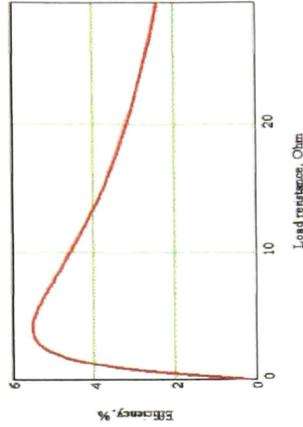
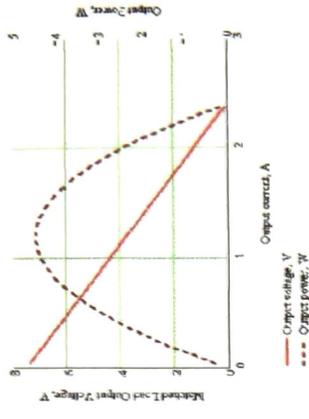
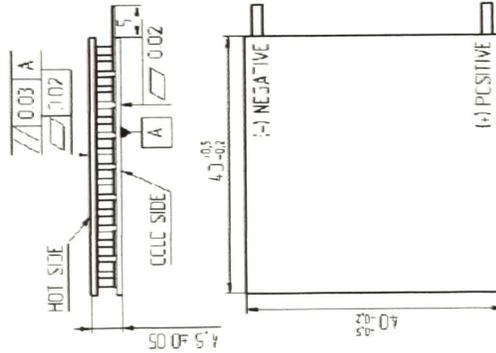


Thermoelectric parameters	Unit	Value
Output power, P ^{max} (at T _h =200°C, T _c =30°C)	Watts	5.4
I _{load} [*]	Amps	1.23
U _{load} [*]	Volts	3.6
R _{int} (at 200°C), ±10 %	Ohm	3.0

^{*} for R_{int}—R_{sc}
 R_{sc}— internal TGM resistance at working temperature;
 R_{load} — load resistance

Operation parameters	Unit	Value
Working temperature	°C	200
Max. processing temperature	°C	220

Additional options	Notations
Height tolerance up to, mm	± 0,015
Flatness up to, mm;	0,01
Parallelism up to, mm;	0,01
Sealants: epoxy, urethane	E, U
Type and length of lead wires	Up to customer's requirements
Assembling into arrays	

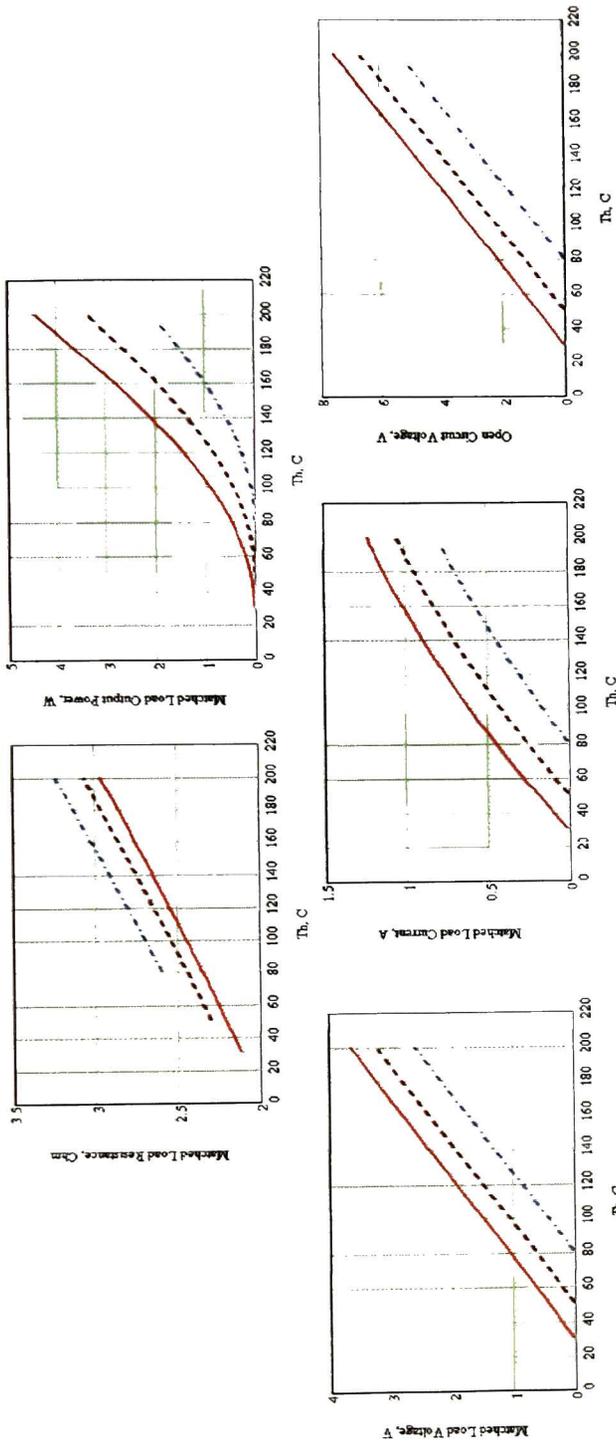


Please refer to our standard assembling recommendations at our site



6 Aerodromnaya street, Saint-Petersburg, 197348 Russia
Tel: +7 812 394-13-10, fax: +7 812 394-12-67, E-mail: info@kryotherm.ru, http://www.kryothermtec.com

SPECIFICATION OF GENERATING THERMOELECTRIC MODULES TGM-127-1.4-2.5

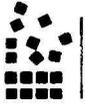


Customer

Kryotherm

Anexo 2

Trabajos presentados



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2014

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Francisco Javier Willars Rodriguez, Yuri Vorobiev Vasilievitch, Pavel Vorobiev, Edgar Arturo Chávez Urbidola* presented the contribution: **SOLAR HYBRID ELECTRIC/THERMAL SYSTEM FOR MICROPOWER APPLICATION**, in the Renewable Energy and Sustainable Development Symposium at the XXIII International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 17th to 21th, 2014.

Sincerely,

Armando Salinas Rodríguez
President

Bibliografía

- [1] C. Rühl, "BP Statistical Review of World Energy June 2013," 2013.
- [2] L. Schernikau, "HMS Bergbau AG - Energía primaria y carbón," *Economics of the International Coal Trade*, 2011. [Online]. Available: <http://hms-ag.com/es/mercado-de-carbon-y-energia/energia-primaria-y-carbon.html>.
- [3] A. McDonald, M. Jefferson, M. Amann, I. D. Lindsay, J. S. Foster, and G. Ott, *World Energy Perspectives*. Cambridge, UK, 1998, p. 299.
- [4] J. A. Valle Pereña and H. O. Ortega Navarro, "Prospectivas de Energías Renovables 2012-2026," 2012.
- [5] "Las Energías Renovables en México y el mundo," 1999.
- [6] B. A. Holm, L. Blodgett, D. Jennejohn, and K. Gawell, "Geothermal Energy : International Market Update Geothermal Energy Association," no. May, 2010.
- [7] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc, 2006, p. 936.
- [8] U. Eicker, *Solar Technologies for Buildings*, 1st ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Inc., 2003, p. 320.
- [9] J. . Spencer, "Fourier series representation of the position of the sun," *Sol. Energy*, vol. 2, no. 5, p. 172, 1971.
- [10] A. Rabl, "Comparison of solar concentrators," *Sol. Energy*, vol. 18, no. 2, pp. 93–111, Jan. 1976.
- [11] J. Paz Gutiérrez, *Colectores Solares Planos Tratamiento Teórico*, vol 1, vol. 1. 2006, pp. 1–116.
- [12] C. J. Chen, *Physics of Solar Energy*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [13] Boletín IIE, "Reseña histórica de Energías Alternas," México, 2011.
- [14] C. Estrada Gasca and C. Arancibia Bulnes, "Las Energías Renovables : la Energía Solar y sus Aplicaciones," *Rev. Digit. Univ. UNAM*, vol. 11, no. 8, pp. 1–27, 2011.
- [15] L. W. Ft, "EXTENSION OF THE HOTTEL-WHILLIER MODEL TO THE ANALYSIS OF COMBINED PHOTOVOLTAIC / THERMAL FLAT PLATE COLLECTORS," vol. 22, pp. 361–366, 1979.
- [16] N. Miljkovic and E. N. Wang, "Modeling and optimization of hybrid solar thermoelectric systems with thermosyphons," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2843–2855, Nov. 2011.

- [17] Y. V. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez, P. Gorley, P. Horley, and L. P. Bulat, "A new approach to hybrid systems of renewable energy utilization," in *Leading Edge Research in Solar Energy*, New York, USA: Nova Science Publishers, 2007, pp. 147–164.
- [18] E. a. Chávez-Urbiola, Y. V. Vorobiev, and L. P. Bulat, "Solar hybrid systems with thermoelectric generators," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 369–378, Jan. 2012.
- [19] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 380–389, Feb. 2010.
- [20] W. T. Chong, M. S. Naghavi, S. C. Poh, T. M. I. Mahlia, and K. C. Pan, "Techno-economic analysis of a wind–solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4067–4077, Nov. 2011.
- [21] W. T. Chong, a. Fazlizan, S. C. Poh, K. C. Pan, and H. W. Ping, "Early development of an innovative building integrated wind, solar and rain water harvester for urban high rise application," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 201–207, Apr. 2012.
- [22] T. Sharpe and G. Proven, "Crossflex: Concept and early development of a true building integrated wind turbine," *Energy Build.*, vol. 42, no. 12, pp. 2365–2375, Dec. 2010.
- [23] D. Kraemer, K. McEnaney, M. Chiesa, and G. Chen, "Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1338–1350, May 2012.
- [24] R. Amatya and R. J. Ram, "Solar Thermoelectric Generator for Micropower Application," *Electron. Mater.*, vol. 39, pp. 1735–1741, 2010.
- [25] D. Meneses-Rodríguez, P. P. Horley, J. González-Hernández, Y. V. Vorobiev, and P. N. Gorley, "Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures," *Sol. Energy*, vol. 78, no. 2, pp. 243–250, Feb. 2005.
- [26] J. Gonzalez-Hernández and P. Y. Vorobiev, "Optimization of the Solar Energy Collection in Tracking and Non-Tracking Photovoltaic Solar System," *IEEE*, vol. 2, pp. 310–314, 2004.
- [27] R. Zakharchenko, L. Licea-Jiménez, S. A. Pérez-García, P. Y. Vorobiev, U. Dehesa-Carrasco, J. F. Pérez-Robles, J. González-Hernández, and Y. V. Vorobiev, "Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 82, no. 1–2, pp. 253–261, May 2004.
- [28] B. Robles-Ocampo, E. Ruíz-Vasquez, H. Canseco-Sánchez, R. C. Cornejo-Meza, G. Trápaga-Martínez, F. J. García-Rodríguez, J. González-Hernández, and Y. V. Vorobiev, "Photovoltaic/thermal solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 20, pp. 1966–1971, Dec. 2007.

- [29] E. A. Chávez-urbiola and Y. V Vorobiev, "Design and Investigation of Solar Hybrid Electric / Thermal System with Sun-tracking Concentrator , Photovoltaic and Thermoelectric Generators," *Recent Researches in Environmental and Geological Sciences* pp. 336–341, 2000.
- [30] S. Tornos Tejedor and A. E. Sotelo Mieg, "Termoelectricidad, la energía del desequilibrio," 2006.
- [31] D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*. United States of America, 1995, p. 687.
- [32] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *termodinámica*, Quinta. Ciudad de México, Mexico: Mc Graw Hill, 2007, pp. 424–437.
- [33] I. Serrano Canals, "Estudio de Nuevos Materiales Termoeléctricos Basados en Óxidos de Hierro," *Proyecto de fin de carrera*, Universidad de Zaragoza, 2010.
- [34] S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, and G. J. Snyder, "Yb 14 MnSb 11 : New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation," *Chem. Mater.*, vol. 178, no. 16, pp. 9894–9898, 2006.
- [35] a. Saramat, G. Svensson, a. E. C. Palmqvist, C. Stiewe, E. Mueller, D. Platzek, S. G. K. Williams, D. M. Rowe, J. D. Bryan, and G. D. Stucky, "Large thermoelectric figure of merit at high temperature in Czochralski-grown clathrate Ba8Ga16Ge30," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 2, p. 23-32, 2006.
- [36] G. Joshi, H. Lee, Y. Lan, X. Wang, G. Zhu, D. Wang, R. W. Gould, D. C. Cuff, M. Y. Tang, M. S. Dresselhaus, G. Chen, and Z. Ren, "Enhanced thermoelectric figure-of-merit in nanostructured p-type silicon germanium bulk alloys.," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 4670–4692, Dec. 2008.
- [37] K. Kurosaki, A. Kosuga, K. Goto, H. Muta, and S. Yamanaka, "Ag 9 TlTe 5 and AgTlTe : High ZT Materials With Extremely Low Thermal Conductivity," *International Conference on Thermoelectrics.*, vol. 7905, pp. 8–11, 2005.
- [38] T. Caillat, J.-P. Fleurial, and A. Borshchevsky, "Preparation and thermoelectric properties of semiconducting Zn4Sb3," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 58, no. 7, pp. 1119–1125, 1997.
- [39] J.-P. Fleurial, A. Borshchevsky, and T. Caillat, "High Figure of Merit in Ce-Filled Skutterudites," in *15th International Conference on Thermoelectrics*, 1996, vol. 3, pp. 91–95.
- [40] M. Akasaka, T. Iida, T. Nemoto, J. Soga, J. Sato, K. Makino, M. Fukano, and Y. Takanashi, "Non-wetting crystal growth of Mg2Si by vertical Bridgman method and thermoelectric characteristics," *J. Cryst. Growth*, vol. 304, no. 1, pp. 196–201, Jun. 2007.

- [41] B. Wölfing, C. Kloc, J. Teubner, and E. Bucher, "High Performance Thermoelectric Ti_9BiTe_6 with an Extremely Low Thermal Conductivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, no. 19, pp. 4350–4353, May 2001.
- [42] T. He, J. Chen, H. D. Rosenfeld, and M. a. Subramanian, "Thermoelectric Properties of Indium-Filled Skutterudites," *ChemInform*, vol. 37, no. 15, pp. 759–762, Apr. 2006.
- [43] E. S. Toberer, P. Rauwel, S. Gariel, J. Taftø, and G. Jeffrey Snyder, "Composition and the thermoelectric performance of $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$," *J. Mater. Chem.*, vol. 20, no. 44, p. 9877-9890, 2010.
- [44] B. C. Sales, D. Mandrus, and S. G. K. Williams, "Filled Skutterudite Antimonides : A New Class of Thermoelectric Materials," *Science.*, no. 18, 1996, pp. 1325–1328.
- [45] S. Sakurada and N. Shutoh, "Effect of Ti substitution on the thermoelectric properties of (Zr,Hf)NiSn half-Heusler compounds," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 8, p. 256-268, 2005.
- [46] G. S. Nolas, J. L. Cohn, G. A. Slack, and S. B. Schujman, "Semiconducting Ge Clathrates: Promising candidates forthermoelctric applications," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 2, pp. 178–180, 1998.
- [47] E. A. Chávez-Urbiola, "Investigación y desarrollo de un sistema híbrido solar-eólico con las partes fotovoltaica, térmica y termoeléctrica," *Tesis de Doctorado.*, Cinvestav-Querétaro, 2014.
- [48] S. P. Yushanov, L. T. Gritter, and J. S. Crompton, "Multiphysics Analysis of Thermoelectric Phenomena," 2011.
- [49] E. A. Chávez-Urbiola and Y. V. Vorobiev, "Solar Hybrid Electric/Thermal System With Thermoelectric Generators," *IEESE*, 2012.
- [50] G. L. Morrison, "Simulation of the long term performance ofthermosyphon solar water heaters," *Sol. Energy*, pp. 515–526, 1983.
- [51] A. Cavignini and D. A. Staton, "Convection Heat Transfer and Flow Calculation Suitable for ElectricMachines Thermal Models," *IEEE*, vol. 55, pp. 3509–3516, 2008.
- [52] "Google Maps," 2014. [Online]. Available: <https://www.google.com.mx/maps/@20.5889438,-100.4184998,17z>.
- [53] "Word Energy Council," 2014. [Online]. Available: www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014.
- [54] S. Jaisanker, J. Ananth, S. Thulasi, S. T. Jayasuthakar, and K. N. Sheeba, "A comprehensive review on solar water heaters," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 3045–3050, 2011.

- [55] M. Álvarez González and S. Fayziev, "Recubrimiento electroquímico selectivo del tipo <<níquel negro>> para colectores solares," *Cent. Gestión la Inf. y Desarro. la Energía, Reporte institucional* 2001.
- [56] J. Álvarez González, Manuel, Bermudez Torres and Y. A. Valdés, "Obtention of black chrome selective surfaces at pilotplants for solar collectors," *Reporte institucional.*, Cuba, 2002.
- [57] A. B. Meinel and M. P. Meinel, *Aplicaciones de la Energía Solar*. Barcelona España: Editorial Reverte, S. A., 1982.
- [58] C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel processing*, Academic P. San Diego, CA, 1990.
- [59] S. Sakka and H. Kozuka, *Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing Characterization and Applications*. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers Group, 2005.
- [60] L. C. Klein, Ed., *Sol-Gel Optics: Processiong and Applications*. The Springer International Series, 1994.
- [61] M. C. Cisneros Morales, "Recubrimientos de SiO₂ híbrida obtenidos por Sol-Gel como protección frente a la corrosión ácida.," *Tesis de Doctorado.*, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2004.
- [62] M. A. Villegas Broncano and J. M. Fernandez Navarro, "Preparación de vidrios de silicatos alcalinos por el método sol-gel," *Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 2, pp. 99–108, 1987.

EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DE MAESTRÍA DEL C. FRANCISCO JAVIER WILLARS RODRÍGUEZ TITULADA: "DESARROLLO E INVESTIGACION DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE", FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A LOS TRECE DIAS DEL MES DE MARZO DEL AÑO DOS MIL QUINCE.



DR. YURII VOROBIOV



DR. JUAN FRANCISCO PÉREZ ROBLES



DR. RAFAEL RAMIREZ BON



CINVESTAV - IPN
Biblioteca Central



SSIT0012991