



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN  
SISTEMA HÍBRIDO SOLAR, TÉRMICO-  
FOTOVOLTAICO AVANZADO.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
CON OPCIÓN TERMINAL EN TECNOLOGÍA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:**

**MC. SANDRO GUADALUPE PÉREZ GRAJALES**

**ASESOR DE TESIS: DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN**

**CO-ASESOR DE TESIS: DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ**

**SINODALES: JAVIER SIQUEIROS ALATORRE (CCyTEM)**

**ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ**

**ÁLVARO ZAMUDIO LARA**

**LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ**

**ÁNGEL HORACIO HERNÁNDEZ SORIA (CENIDET)**

CUERNAVACA, MOR

DIC. 2018

---

**DEDICATORIAS:**

*Primero a los Dioses que me han permitido seguir preparándome, a mi familia que siempre han estado alentándome hacia adelante y sobre todo mi Esposa M.C Tete y mis pequeñas Saltamontes Aylén Ittahi Esther Isabel y Alexa que me han dado ánimos a lograr superarme. A mis suegros, Sr. Felipe y Sra. Febita así, como mi cuñada M.C Magda.*

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Al CONACYT por el apoyo económico y por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

Al DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN por aceptarme en su equipo de trabajo, por toda su paciencia y darme la oportunidad de alcanzar esta formación profesional.

A los miembros del jurado DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN, DR. JAVIER SIQUEIROS A LA TORRE, DR. DIEGO SEURET JIMENEZ, DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ, DR. ALVARO ZAMUDIO LARA, DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ, DR. ÁNGEL HORACIO HERNÁNDEZ SORIA, por su atención, enseñanzas, tiempo y disposición para mejorar el presente trabajo.

A los compañeros DR. ÁNGEL HORACIO HERNÁNDEZ SORIA, DR. OLIVER ISRAEL FLORES FRIAS, DRA. ELVA LILIA REYNOSO JARDON, DR. TABAI TORRES DÍAZ por su valioso apoyo en la realización de este proyecto

Al CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS por permitirme realizar los estudios de Doctorado en sus instalaciones y al personal por las facilidades brindadas.

---

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

$C_p$	Calor específico (kJ/kg°C)
$h$	Coefficiente de transferencia de calor [ $W/m^2K$ ]
$m$	Flujo volumétrico (l/min)
$M$	Flujo másico (kg/s)
$Q$	Flujo de calor o Potencia (kW)
$T$	Temperatura (°C)
$\alpha$	Absorbancia de receptor [ <i>adimensional</i> ]
$\varepsilon$	Emitancia del receptor [ <i>adimensional</i> ]
$A_c$	Superficie del receptor [ $m^2$ ]
$A_s$	Área de apertura del Intercambiador [ $m^2$ ]
$C_p$	Calor específico a presión constante [ $J/kg K$ ]
$Fr$	Factor de remoción de calor [ <i>adimensional</i> ]
$I_s$	Irradiación total útil [ $kW/m^2$ ]
$\eta_T$	Eficiencia Térmica
$\eta_E$	Eficiencia Eléctrica
$\eta_G$	Eficiencia Global
$L$	Longitud del receptor [ $m$ ]
$Nu$	Número de Nusselt ( $Nu = h D / \nu$ )
$Pr$	Número de Prandtl [ <i>adimensional</i> ].
$Qu$	Cantidad de energía útil extraída por unidad de tiempo [ $kW/m^2$ ]
$Ra$	Número de Raleigh [ <i>adimensional</i> ]
$Re$	Número de Reynolds para líquido [ <i>adimensional</i> ]
$S_r$	Radiación solar incidente absorbida por unidad de área $W / m^2$
$T_a$	Temperatura ambiente [ $K$ ]
$T_i$	Temperatura media en la superficie de la placa colectora [ $K$ ]

---

$U_1$	Coeficiente global de pérdidas del colector [ $W/(m^2K)$ ]
$V$	Velocidad [ $m/s$ ]
$V$	Velocidad. [ $m/s$ ]
$W$	Ancho del colector [ $m$ ]
$d_1$	Diámetro interno del receptor [ $m$ ]
$d_2$	Diámetro externo del receptor [ $m$ ]
$q$	Flujo de calor por unidad de área [ $W/m^2$ ]
$q_u$	Energía Útil ganada por el Captador [ $W/m^2$ ]
$t$	Tiempo [ $seg$ ]
$\gamma$	Factor de Forma [ <i>adimensional</i> ]
$\delta$	Proporción de convergencia
$\theta$	Ángulo de inclinación [ <i>adimensional</i> ]
$\mu$	Viscosidad dinámica [ $Pa\ s$ ]
$\rho$	Densidad [ $kg/m^3$ ]
$\rho_o$	Superficie reflectiva [ <i>adimensional</i> ]
$\tau$	Transmitancia de la cubierta de vidrio [ <i>adimensional</i> ]

### **Subfijos**

$amb$	Ambiente
$atm$	Atmósfera
$c_1$	Cubierta de vidrio
$w, e, n, s.$	Puntos Cardinales ( <i>este, oeste, norte, sur</i> )

---

# RESUMEN

En este trabajo se presenta una simulación y una comparación experimental de un intercambiador de calor. En el cual, se ha desarrollado un intercambiador, con un diseño novedoso, que cuenta con celdas solares adheridas a él. Por lo cual el fluido está en contacto con el intercambiador de calor y con las celdas solares. Este diseño novedoso es uno de los valores de este trabajo. Todo este sistema se encuentra instalado a la Latitud de Cuernavaca, Morelos. Para la adquisición de datos se almacenó la información en un sistema, utilizándose el software Agilent que fue Operado en Matlab, lo mismo se hizo con los valores de temperatura donde también, se utilizó termopares tipo T. Para la simulación con Ansys Fluent se tomó el mallado que hace el software por defecto. Al programa de simulación se le suministró la temperatura experimental máxima obtenida a la salida del intercambiador de calor de 71.7°C correspondiente en el mes de Mayo 2017. Según datos obtenidos por Conagua este es el mes de mayor irradiación solar en el año en Cuernavaca. Para finalizar se obtuvieron los siguientes resultados: Eficiencia Térmica ( $\eta_T$ ), Eficiencia Eléctrica de la Celdas ( $\eta_E$ ), Eficiencia Global ( $\eta_G$ ) y los valores obtenidos;  $\eta_T = 78 \%$ ,  $\eta_E = 9.4 \%$ ,  $\eta_G = 87.4 \%$ .

---

# ABSTRACT

In this work, a simulation and an experimental comparison of a heat exchanger are presented. In which, an exchanger has been developed, with a novel design, which has solar cells attached to it. Therefore, the fluid is in contact with the heat exchanger and with the solar cells. This novel design is one of the values of this work.

All this system is installed at the Latitude of Cuernavaca, Morelos. For the acquisition of data, the information was stored in a system, using the Agilent software that was operated in matlab, the same was done with the temperature values where T-type thermocouples were also used. For the simulation with Ansys Fluent, the mesh that makes the software by default. The simulation program was supplied with the maximum experimental temperature obtained at the outlet of the corresponding 71.7°C heat exchanger in the month of May 2017. According to data obtained by Conagua, this is the month with the highest solar irradiation in the year in Cuernavaca. Finally, the following results were obtained: Thermal Efficiency ( $\eta_T$ ), Electrical Efficiency of the Cells ( $\eta_E$ ), Global Efficiency ( $\eta_G$ ) and the values obtained;  $\eta_T = 78\%$ ,  $\eta_E = 9.4\%$ ,  $\eta_G = 87.4\%$ .

---

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
<b>CAPITULO 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Problemática	2
1.2 Tipos de Energía	3
1.3 Energías Renovables	4
1.4 Estado del Arte	6
1.4.1 Estudios de sistemas de almacenamiento por separado en términos y fotovoltaicos	7
1.4.2 Influencia de la temperatura en el funcionamiento de paneles Fotovoltaicos.	13
1.5 Justificación	19
1.6 Objetivo General	19
1.6.1 Objetivos Específicos	19
1.7 Alcance	19
CONCLUSIONES DEL CAPITULO 1	20
<b>CAPITULO 2. Marco teórico</b>	<b>21</b>
2.1 Principios de la Energía Solar	22
2.2 Movimiento solar	22
2.3 La energía solar en el Mundo y México	24
2.4 Fundamentos de conversión de energía	27
2.5 Captadores Solares Planos	29
2.6 Intercambiadores de Calor	31
2.6.1 Tipos de Intercambiadores de Calor	32
2.6.2 Coeficiente Global de Transferencia de Calor ( U )	33
2.6.3 Coeficiente Convectivo	34
2.6.4 Balance Termodinámico	34
2.6.5 Método de Wilson Plot	34

---

2.6.6	Transferencia de Calor	35
2.6.6.1	Conducción	35
2.6.6.2	Convección	36
2.6.6.3	Número de Reynolds	37
2.6.6.4	Número de Prandtl	38
2.6.6.5	Número de Nusselt	38
2.6.6.6	Número de Nusselt, Placas Horizontales (F. Laminar)	39
2.6.7	Radiación	39
2.6.8	Resistencia Térmica	40
2.7	Celdas Solares	41
2.7.1	Tecnología de las Celdas Solares	42
2.7.2	Tipos de Celdas Fotovoltaicas	43
2.7.3	Modelo Eléctrico de una Celda Fotovoltaica	43
2.7.4	Influencia de la Temperatura	45
2.8	Generalidades del Software ANSYS	46
2.8.1	Antecedentes Software ANSYS	46
2.8.2	Perspectiva Teórica	48
2.8.3	Ecuaciones Gobernantes	48
2.8.4	Ecuación De Masa	49
2.8.5	Ecuación De Momentum	49
2.8.6	Ecuación De Energía	50
2.9	Estructura de un Código CFD	51
2.9.1	El Pre-Procesador	51
2.9.2	El Solucionador	52
2.9.3	Solución de problemas con CFD	52
2.9.4	El Post-Procesador	53
	CONCLUSIONES DEL CAPITULO 2	53

---

<b>CAPÍTULO 3. Desarrollo Experimental</b>	54
3.1 Características del Sistema Híbrido Solar, Térmico-Fotovoltaico Avanzado	55
3.2 Calibración de Termopares Tipo “ T “	59
3.3 Procedimientos para la operación Del Sistema Híbrido Avanzado	61
3.4 Preparación del Equipo	61
3.5 Arranque del Equipo	61
CONCLUSIONES DEL CAPITULO 3	62
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.</b>	63
4.1 Resultados experimentales del Intercambiador de Aluminio en invierno	65
4.2 Resultados experimentales del Intercambiador de Aluminio en primavera	66
4.3 Resultados simulados del Intercambiador Acoplado sin circular agua	67
4.4 Resultados Experimentales del Intercambiador Acoplado con Agua, en abril	67
4.5 Resultados Experimentales del Intercambiador Acoplado con Agua, en mayo	68
4.6 Resultados Experimentales del Intercambiador Acoplado con Agua, en noviembre	69
4.7 Resultados Experimentales del Intercambiador Acoplado con Agua, el 29 de enero	70
4.8 Resultados simulados del Intercambiador Acoplado con agua	72
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	77
5.1 Conclusiones	78

---

<b>5.2 Recomendaciones</b>	78
----------------------------	----

<b>REFERENCIAS</b>	79
--------------------	----

### **LISTA DE FIGURAS**

1. Sistema de calentamiento solar acoplado al intercambiador de calor	6
2.1 Radiación Solar que llega a la Tierra	22
2.2 La Tierra Orbitando al Sol	23
2.3 Inclinación del Eje Terrestre	24
2.4 Inclinación del Eje de la Tierra	24
2.5 Consumo de Energía en el Mundo	25
2.6 Radiación Solar Anual del Mundo	26
2.7 Radiación Solar Anual del México	27
2.8 Tecnologías Activas: paneles fotovoltaicos y colectores térmicos	28
2.9 Tecnologías Pasivas	28
2.10 Partes de un Captador Solar Plano	29
2.11 Transferencia de Calor en un Colector Solar	31
2.12 Conducción y Convección para un modelo unidimensional	37
2.13 Flujo paralelo en una placa horizontal (Convección Forzada)	39
2.14 Modelo eléctrico de un Panel Fotovoltaico	44
2.15 Curva V-I Característica de un panel fotovoltaico y el efecto de la temperatura	44
2.16 ANSYS	46
2.17 ANSYS Áreas	47
3.0 Diagrama Esquemático del Sistema Híbrido Solar Térmico-FV Avanzado, ubicado en el LITA 2-CIICAP	55
3.1 Fotografía Satelital de Ubicación CONAGUA-CIICAP	56
3.2 Bomba Grundfos 1/3 HP	57
3.3 Flujometro Marca Cole Parmer	57

---

3.4 (A) Termopares tipo “ T “	58
3.4 (B) Termo Pozo	58
3.5 Baño Termostático	59
3.6 Sistema de Adquisición de Datos Agilent	60
4.1 Temperatura del intercambiador de Calor en Invierno (Enero/2016)	65
4.2 Temperatura del intercambiador de Calor en Primavera (Abril/2016)	66
4.3 Simulación del intercambiador de Calor con celdas (Junio/2016)	67
4.4 Temperatura del Sistema Híbrido Solar-Térmico Avanzado en (Abril/2017)	68
4.5 Temperatura del Sistema Híbrido Solar-Térmico Avanzado en (Mayo/2017)	69
4.6 Temperatura del Sistema Híbrido Solar-Térmico Avanzado en (Noviembre/2017)	70
4.7 Temperatura del Sistema Híbrido Solar-Térmico Avanzado en (29 Enero/ 2018)	71
4.8 Temperatura de simulación (Primavera, Abril/2017)	73
4.9 Temperatura de simulación (Primavera, Mayo/2017)	74
4.10 Temperatura de simulación (Otoño, Noviembre/2017)	75
4.11 Temperatura de simulación (Invierno, Enero/2018)	76
5.1 Porcentaje de bibliografía consultada por año.	85
<b>APÉNDICE 1</b>	86
A. Trabajo enviado a Congreso	86
B. Artículo publicado	86
C. Artículo enviado a publicar	86
D. Calibración de Termopares	87

---

## **Estructura de la Tesis**

Está integrada por 5 Capítulos.

Capítulo 1. Introducción. En este capítulo se describe la problemática de utilizar energías que contaminan, se mencionan los paneles fotovoltaicos como solución a estos problemas, además de presentar diferentes tipos de energías que existen, se incluye una reseña de los sistemas híbridos solares.

Capítulo 2. Marco Teórico. En este capítulo se describen los principios de la energía solar a conversión térmica y fotovoltaica, el movimiento solar, los principales conceptos involucrados en los sistemas solares y Reseña de Software ANSYS ICEM y ANSYS FLUENT.

Capítulo 3. Descripción del Desarrollo Experimental del Sistema Híbrido Solar. En este capítulo se describen, los componentes principales del equipo experimental así como sus características, preparación y arranque del Sistema híbrido Solar.

Capítulo 4. Resultados experimentales del sistema híbrido térmico-solar. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del sistema híbrido solar en el cual se analiza el comportamiento del sistema híbrido a diferentes condiciones ambientales, así como su eficiencia.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones. Este capítulo presenta las conclusiones del trabajo de tesis y las recomendaciones para estudios futuros.

---

# **SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR, TÉRMICO- FOTOVOLTAICO AVANZADO.**

---

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

---

En este capítulo se describe la problemática existente al utilizar energías que contaminan, se mencionan los paneles fotovoltaicos como solución a estos problemas, además de presentar diferentes tipos de energías alternativas, se incluye una reseña de los sistemas híbridos solares.

---

## 1.1 PROBLEMÁTICA

Cada día en México la protección ambiental es uno de los aspectos principales a considerar en el desarrollo de tecnologías innovadoras, uno de los problemas más importantes que existen, el cual estamos enfrentando desde mucho tiempo atrás es la escasez de agua potable, por mencionar. Esto se debe principalmente a la contaminación que se genera al mezclarse con efluentes contaminados provenientes de zonas industriales y al desemboque de los drenajes de las casas a ríos, lagos, barrancas, lagunas, etc., provocando que exista un riesgo de salud muy grande para varios sectores de la población. Debido a esto las fuentes energéticas nuevas deben ser menos contaminantes y económicamente competitivas frente a aquellas basadas en los combustibles fósiles.

Para hacer frente a este problema se han estudiado muchas tecnologías entre las cuales destacan por su eficiencia energética, bajo costo y nulo impacto al ambiente, las tecnologías que utilizan la energía solar. Para hacer uso ella los dispositivos que destacan son las celdas fotovoltaicas porque, son fáciles de adquirir y además de que nos proporcionan fuente eléctrica y térmica a la vez.

Para la generación de calor se emplean dos tipos de colectores, en función del fluido de trabajo: Colectores Solares de Agua y Colectores Solares de Aire. En el primer caso, se consiguen altos flujos de calor debido al uso de agua como fluido calo portador, el cual presenta mayor inercia térmica que el aire, consiguiendo así un mayor rendimiento en la transferencia y almacenamiento térmico más efectivo. En el segundo se necesita de un ventilador adecuado al trabajo o por convección natural.

Los requerimientos de energía no siempre coinciden, con el tiempo de captación de energía solar, por lo que es absolutamente imprescindible disponer de un sistema de almacenamiento térmico y eléctrico que haga frente a la demanda en momentos de poca o nula insolación. Una manera eficaz de almacenar agua caliente, energía eléctrica y mantenerla a un nivel útil con la colocación de un termo-tanque además de una batería, los materiales que se usan normalmente son: el acero, acero inoxidable, cobre, aluminio y fibra de vidrio reforzada, el más adecuado es sin duda, el acero inoxidable porque evita que exista corrosión aunque

---

su precio es el más elevado. Se elige la energía solar como energía alternativa más indicada debido a que, en realidad, todos los tipos de energía utilizables provienen directa o indirectamente del Sol, así que la forma más asequible de obtener su energía es captar la radiación que incide en la Tierra. De hecho, muchas de las energías conocidas hoy, como la biomasa, los combustibles fósiles, la hidráulica y la eólica, vienen en parte derivadas de la energía radiante del Sol.

## **1.2 TIPOS DE ENERGÍA**

La energía proveniente de combustibles fósiles, es la que más se utiliza. Se obtiene de la combustión de ciertas sustancias (carbón, petróleo y gas natural) que se produjeron en el subsuelo el cual se generó por la acumulación de grandes cantidades de residuos orgánicos desde hace millones de años [1].

Se mencionan algunos tipos de energía que se define inmediatamente, las cuales son:

- ❖ Energía Nuclear
- ❖ Energía Geotérmica
- ❖ Energía de Biomasa
- ❖ Energía Hidráulica
- ❖ Energía Eólica
- ❖ Energía Undimotriz
- ❖ Energía Mareomotriz

La energía nuclear se obtiene de la modificación de los núcleos de algunos átomos, transformando su masa en energía. Por lo tanto, no involucra combustión, pero sí produce otros subproductos agresivos para el ambiente como la basura nuclear (residuos radiactivos).

La energía geotérmica consiste en extraer calor del magma incandescente de la tierra por medio de vapor. Mediante procesos térmicos es posible generar electricidad, en las plantas llamadas geotérmicas, el aprovechamiento de la energía geotérmica no implica combustión alguna.

---

La energía de la biomasa es la forma más antigua de aprovechamiento de la energía solar, y proviene de la captación (bastante ineficiente) de la radiación solar para llevarse a cabo. Principalmente, consiste en cultivar especies vegetales que pueden servir como combustible, aunque también podemos aprovechar como biomasa algunos residuos, tanto urbanos como ganaderos. Asimismo, mediante procesos biológicos, se pueden producir fermentaciones para obtener biocombustibles.

La energía hidráulica es una energía renovable de alto rendimiento energético, es una energía limpia por que no produce emisiones tóxicas, se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua o los saltos de agua naturales. En el proceso, la energía potencial (durante la caída del agua) se convierte en cinética la cual se utiliza para movilizar las turbinas que producen electricidad.

La energía eólica viene derivada de la solar debido a que los movimientos de la atmósfera se deben al efecto de rotación, atracción lunar y al calentamiento causado por la radiación solar. La utilización de este tipo energía se lleva a cabo con aerogeneradores o molinos de viento.

Existen otras energías que intentan aprovechar la energía proveniente de los mares y océanos; estas son, la energía Undimotriz (energía de las olas), la Mareomotriz (energía las mareas), OTEC (diferencia temperatura oceánica) y la Energía Azul (diferencia de concentración salina en desembocaduras).

### **1.3 ENERGÍA RENOVABLES Y SUSTENTABLES**

Se denomina energía renovable, a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, a diferencia de la tradicional (de alto costo, contaminante y agotable), Energía Sustentable es aquella que no es agresiva al medio ambiente. Ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables / sustentables y que de cierta manera dependen del Sol están la eólica, térmica, fotovoltaica, por mencionar algunas.

---

En varios países del mundo, el desarrollo de tecnologías para generar electricidad a partir de fuentes de energía renovable ha sido notorio. Tanto en Europa como en Norteamérica se vienen implementando proyectos importantes a partir de la energía eólica, solar, biomasa, geotermia, etc. Respecto a la experiencia con dichas fuentes de energía renovable, en actualmente México dispone de un contado número de proyectos eólicos, de biocombustibles y solares fotovoltaicos. Sin embargo, salvo el caso de la Hidro-Electricidad a gran escala, el país no ha planteado un aprovechamiento más agresivo del potencial energético renovable con el que cuenta.

En este sentido, vale destacar que México tiene una gran biodiversidad climática, su ubicación geográfica permite contar con diversas fuentes de energía renovable, particularmente la solar, impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de energía eléctrica de forma segura y menos contaminante respecto a las alternativas convencionales.

Debido al uso indiscriminado de energía proveniente de los combustibles fósiles, se genera un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, el uso de combustibles fósiles provoca debilitamiento de capa de ozono y desaparición de grandes masas boscosas que favorecen el aumento de temperatura en la tierra, provocando un futuro incierto para las generaciones venideras. Para mitigar este problema, una alternativa son las energías renovables. Entre las energías renovables se encuentra la energía solar ya que de ella se obtiene una radiación total emitida por el sol, a la atmosfera terrestre que solo llega una pequeña parte es de  $1,394 \text{ kW/m}^2$  y se conoce como la constante solar, de esta última solo un 30% es reflejada hacia el exterior y el 70% restante atraviesa la atmosfera [2].

Con estos valores de radiación, la superficie de la tierra cuenta con un valor máximo de  $1000 \text{ W/m}^2$  (Insolación) [3]. La tierra recibe una energía solar que sobrepasa la demanda anual de energía de toda la población, por lo cual si se analiza, la energía solar incidente en  $1\text{m}^2$  se podría ahorrar aproximadamente 100 litros de petróleo [4]. Para ello se realizó el presente trabajo basado en la simulación (Ansys Fluent 2014) y caracterización de un sistema híbrido solar-térmico avanzado, armado y puesto a pruebas experimentales. Es híbrido porque es térmico y está acoplado a celdas fotovoltaicas con la finalidad de poder describir el

comportamiento térmico, eléctrico y la eficiencia energética de este sistema híbrido propuesto de acuerdo a sus dimensiones, cabe decir que no fue comercial si no que se armó en el Laboratorio de Térmica Aplicada 2 y se subió a la parte del techo del mismo.

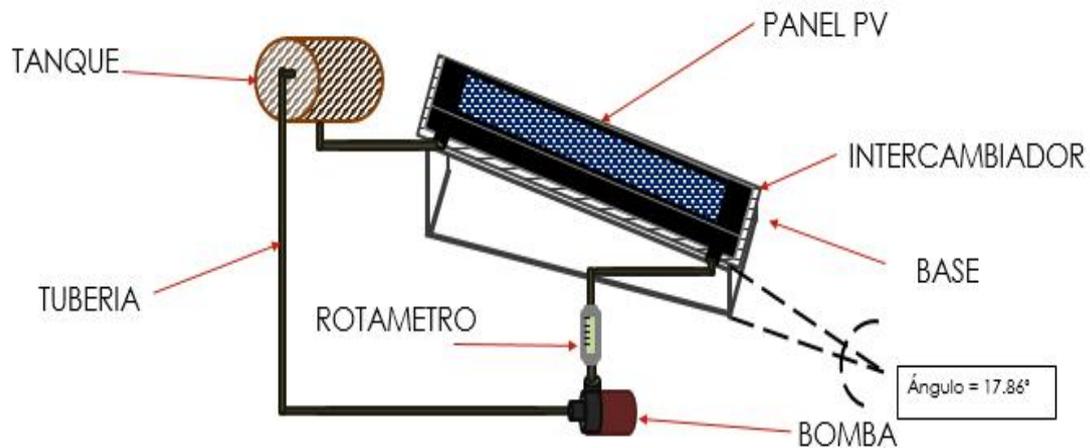


Fig. 1. Sistema de calentamiento solar acoplado al intercambiador de calor

#### 1.4 ESTADO DEL ARTE

En México, es necesario desarrollar respuestas basadas en investigaciones que pueden ofrecer el máximo rendimiento energético. Cuando pensamos en la energía solar, dos manifestaciones están presentes, luz y calor. Ambas juegan un papel vital en la vida de nuestro planeta. La luz solar hace posible el proceso de fotosíntesis, sin el cual el reino vegetal y animal desaparecerían. El calor hace posible el clima y evapora las aguas del mar liberándolas del contenido salino, son devueltas al planeta en forma de lluvia. Seres humanos, animales y plantas deben su existencia a este simple mecanismo de purificación.

A continuación se menciona una reseña de trabajos por separados en térmicos y fotovoltaicos.

##### 1.4.1 ESTUDIOS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO, TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.

**Close (1962).** Desarrolló un modelo matemático unidimensional en el programa SCADES, para obtener la temperatura promedio en el tanque de

---

almacenamiento de un sistema de calentamiento de agua. El modelo matemático lo formuló haciendo un balance de energía en el sistema y lo resolvió analíticamente para obtener el flujo másico. [5].

**Ong (1974).** Presentó una modificación al modelo teórico de Close (1962) del funcionamiento unidimensional del sistema de calentamiento de agua bajo condiciones de flujo termosifónico propuesto por Close (1962), Gupta y Garg (1968) y fue resuelto utilizando diferencias finitas. El modelo propuesto de Ong (1974) supone que las temperaturas medias en la unidad absorbentes, el tanque de almacenamiento y en las conexiones de la tubería son uniformes. Las pruebas experimentales fueron realizadas en un calentador, el cual incorpora el diseño de un captador solar de placa plana. Con base en los resultados obtenidos, Ong (1974) concluyó que la distribución de temperaturas en el tanque no es lineal. Otra de las conclusiones es que encontró que la temperatura media de placa, la temperatura del volumen de agua en el tanque de almacenamiento y la temperatura en los tubos del colector no son iguales. En conclusión los resultados obtenidos entre el modelo teórico y del experimento muestran igualdad durante periodos de insolación (irradiación de todo el día), [6].

**Smith et al. (1976).** Presentaron un método para conocer experimentalmente los tres factores que determinan la eficiencia del colector en la ecuación de Hottel-Whillier-Bliss, estos tres factores son: factor de remoción del calor del captador, el producto efectivo transmitancia-absortancia y el coeficiente global de pérdidas de calor. El colector que construyeron está compuesto de tubos unidos a una placa absorbente de aluminio, la cubierta formada por dos vidrios de alta resistencia con un espesor de 3.17 mm, el aislante es de bajo coeficiente conductividad térmica y está contenido en una caja de aluminio y el fluido utilizado es una mezcla de etilenglicol. Los autores realizaron mediciones de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente y del fluido a la entrada y salida del colector. De las comparaciones de los datos experimentales con los teóricos, se obtuvieron los siguientes resultados: El valor del producto transmitancia-absortancia teórico fue de 0.729 y el experimental de 0.704, el factor de remoción teórico fue de 0.882 y el coeficiente de pérdidas globales teórico de 3.7 y el experimental de 3.6 los autores concluyeron que los resultados fueron satisfactorios, [7].

---

**Bérriz y Álvarez, (1982).** Presentaron un modelo teórico y experimental de la inclinación de equipos solares; mostraron la radiación solar sobre un plano inclinado a diferentes meses del año a distintos ángulos de inclinación y el valor medio mensual de la radiación incidente sobre un plano inclinado. El objetivo del trabajo fue el estudio de la influencia del ángulo de inclinación en una superficie captadora solar. Los resultados que los autores encontraron fueron que el ángulo óptimo del captador solar tomando en cuenta la radiación directa y difusa se debe colocar a la latitud del lugar. Los autores concluyen que la colocación más favorable del captador solar será aquella para la aplicación a que se destine el sistema y además, el ángulo que se seleccione dependerá de la forma en que se utilice la instalación; esto es que funcione principalmente en invierno, verano o durante todo el año, [8].

**Ong (1995).** Desarrolló un modelo matemático para determinar el rendimiento térmico de cuatro tipos de captadores solares de aire de placa plana. Se analizó el circuito de resistencias térmicas; usando balances globales de calor y las resolvió a través de una inversión de matrices, evitando así una compleja manipulación algebraica. Se obtuvieron las predicciones teóricas de la temperatura de la placa absorbidora, del fondo y la temperatura del aire para cuatro tipos de captadores, [9].

**Hussein et al. (1999).** Realizaron una investigación teórica y experimental para un captador solar de placa plana bajo condiciones en estado transitorio. El objetivo del trabajo fue obtener el comportamiento del captador solar de placa en estado transitorio. Los resultados que obtuvieron fueron para comparar la eficiencia instantánea del captador solar respecto de los resultados teóricos a los experimentales; la diferencia resultó de -5.3 a +8.9% de las 9:00 am a las 5:30 pm. Los autores concluyen que los resultados experimentales muestran un acuerdo considerable con respecto a los teóricos; el modelo empleado para la simulación demostró ser una herramienta efectiva para la predicción de resultados de un captador solar de placa plana en estado transitorio, [10].

**Diseño de Kurklu et al. (2002).** Se desarrolló un nuevo captador para el calentamiento de agua y se investigó su rendimiento térmico. El captador solar

---

consta de dos secciones contiguas, una llena de agua y otra con un material de cambio de fase. Este material funciona tanto como acumulador de energía para la estabilización de la temperatura del agua, como un material aislante debido a su bajo valor de conductividad térmica. Los resultados de este estudio indican que la temperatura del agua excede los 55°C durante el día con alta radiación y se mantiene sobre los 30°C durante la noche. La eficiencia térmica instantánea se mantiene entre los 22 y 80%, [11].

**Zhai et al. (2005).** Evaluaron los efectos de dos captadores solares de techo por medio de la implementación de un modelo matemático para simular el desarrollo térmico y predecir las temperaturas del vidrio, pared, canal 1 y canal 2, así como eficiencias de cada uno de los captadores solares de techo. Los resultados que encontraron al realizar comparaciones entre un captador de un solo y dos canales fue la eficiencia instantánea ya que la diferencia entre ella fue de un 10% a una radiación de 500 W/m<sup>2</sup>, el único inconveniente fue que al aumentar la cantidad de flujo másico en el captador de doble canal, la eficiencia tendía a tener pérdidas, [12].

**Hamdy et al. (2006).** Presentaron un modelo matemático para la inclinación óptima de un captador solar por medio de la radiación solar recibida en la superficie inclinada. El estudio que fue comparar varios modelos de diferentes autores (Tamps-Coulson 1977, Pérez 1987 y Burgler 1977), a diferentes inclinaciones para poder determinar el ángulo óptimo de inclinación, el cual se obtuvo mediante la comparación de valores totales de la radiación máxima que recibía el captador solar en un periodo específico del día. El modelo con el cual trabajaron los autores y obtuvieron mejores resultados fue el de Pérez (1987), para una orientación hacia el sur. Los resultados que se encontraron fueron que el ángulo óptimo de inclinación en la época de invierno fue de 43.33° y que en verano la máxima radiación solar se recibe en un plano horizontal. Por lo que los autores concluyen que de acuerdo a los resultados obtenidos, el ángulo óptimo para recibir una máxima radiación en un captador solar es alrededor de ±15° [13].

**Bassiouny y Korah (2009).** Presentaron el desarrollo de un código numérico para determinar las diferentes temperaturas del vidrio, pared absorbidora, aire dentro del canal a diferentes inclinaciones (15°, 30°,45°,60° y

---

75°). Los resultados obtenidos muestran que el ángulo óptimo en el que puede trabajar mejor el captador solar es de 45° a 75°, obteniendo un mejor calentamiento del aire a diferencia de 15° y 30°; ya que a estas inclinaciones el paso del aire tiene una mayor resistencia a pasar por el canal. Los resultados que se obtuvieron fueron validados con el trabajo de Mathur et al. (2006), siendo estos satisfactorios. Los autores concluyen que el intervalo de inclinación para el captador solar debe de ser de 45° a 75° en latitudes de 28.4° [14].

**Chen et al. (2011).** Estudios experimentales en una bomba de calor acoplada en una planta con captadores térmicos solares se conectaron en serie para calentar el espacio. Este trabajo se presentó en una planta solar-Asistido por un sistema de bomba de calor (SAGCHP) acoplado para, la calefacción en China. Lo cual se recomienda el uso de la energía solar térmica captada como una fuente alternativa para la bomba de calor en lugar de pozos de recarga para el almacenamiento de calor a causa de la enorme capacidad de calor [15].

**Fernández y Dieste (2013).** Realizaron un estudio con captadores solares térmicos a temperaturas bajas y medias basándose en materiales innovadores que dan un rendimiento mejorado con intercambio de calor. Un colector de energía solar térmica de baja y media temperatura para el suministro económico de calor entre el 40 y el 90° C ha sido desarrollado. Este captador pretende que sea más eficiente y más barato que los colectores comerciales por lo general, son de modo que el acceso a una energía limpia y renovable sería más rápidamente amortizable y la sustitución de materiales tradicionales por superficie de aluminio tratado con Tinox para el absorbedor y termo formado para el reflector simplificando el proceso de producción y montaje. El prototipo definitivo tiene un área de apertura de 0.225m<sup>2</sup>. Fue probado en Zaragoza (España) y la eficiencia acumulada fue de entre 41% y 57%, y la eficiencia instantánea alcanzó el 98% dependiendo de las condiciones climáticas, [16].

**Ayompe y Duffy (2013).** Utilizando captadores solares planos analizaron el comportamiento térmico de un sistema de calentamiento solar de agua.. El sistema se puso a prueba durante un año y la temperatura máxima del fluido de salida del colector registrada fue de 70.4°C mientras que la temperatura máxima del agua en la parte inferior del depósito de agua caliente era 59.9°C. La energía diaria promedio anual recaudada fue de 19.6 mJ/d, la energía suministrada por la bobina

---

solar fue de 16.2 mJ/d, la fracción solar fue de 32.2%, la eficiencia del captador fue de 45.6% y la eficiencia del sistema fue de 37.8%. Las pérdidas de tubo de suministro representados fue de 16.4% de la energía recolectada, [17].

**Javadi et al. (2013).** Investigaron la mejora en el rendimiento de captadores solares mediante el uso de nano fluidos. Concluyeron que utilizando nano fluidos en lugar de fluido convencional, mejora la transferencia de calor, así como sus propiedades térmicas, la eficiencia, la transmitancia y coeficiente de extinción de captador solar. Reportaron que las propiedades térmicas de nano fluidos como la conductividad térmica tiene un efecto significativo en la mejora de la eficiencia de los captadores solares, [18].

**Majdi Hazami et al. (2014).** En un sistema solar analizaron el rendimiento energético y exergético de un PV/T experimentalmente y simulado, las eficiencias máximas fueron 50 y 15% y las máximas exergéticas fueron de 50 y 14,8% respectivamente, [19].

**Guenounou, et al. (2016).** Compararon el desempeño de paneles fotovoltaicos de diferentes tecnologías con más de un año de exposición. Micro amorfo silicio (I-Si), Silicio mono cristalino (M-Si), Silicio amorfo (a-Si) y el Silicio poli cristalino (Poli-Si). Los mejores resultados obtenidos de rendimiento en verano son para I-Si y a-Si debido a la alta temperatura del espectro, mientras que los paneles M-Si y Pol-Si obtienen mejor rendimiento en invierno, [20].

**Manuel Lammle, et al. (2016).** Desarrollaron colectores híbridos con revestimientos de baja emisividad por medio de experimentación y simulación. Con plata específicamente, para la aplicación en PV/T. Térmicamente la eficiencia fue de  $T = 50\text{ K}$ , mientras que la eficiencia eléctrica se redujo en sólo 3%, [21].

**T. Hernández et al. (2016).** Realizaron una predicción de transferencia de calor en un colector solar para el sistema de purificación de agua integrado a un transformador de calor por absorción utilizando Redes Neuronales en el cual presentaron resultados numéricos para las simulaciones de la potencia calorífica ganada, para cada una de las 38 pruebas en cada configuración tienen un  $R_{\text{acoplado}}$  0.994,  $R_{\text{paralelo}}$  0.998 y  $R_{\text{serie}}$  0.994 con respecto a los resultados experimentales, [22].

---

**Alejandro del Amo et al. (2017).** El caso de estudio presentado en este documento es un innovador sistema energético urbano montado en el techo constituido por un sistema solar híbrido para uso doméstico. Utilizar esta energía sin explotar es el valor clave para las energías renovables hogareñas. El panel fotovoltaico / térmico (PVT) considerado presenta la particularidad de la adición de una cubierta aislante para reducir las pérdidas de calor en su lado frontal. Ha sido desarrollado por el fabricante Endef Engineering en colaboración con la Universidad de Zaragoza. El trabajo, se diseñó para un sistema PVT que alimentara los requisitos de agua caliente doméstica para uso sanitario. La producción de electricidad también se consideró, de acuerdo con la Regulación española para el autoconsumo. El trabajo desarrollado comenzó con el rediseño de un captador híbrido solar de una planta, que suministra individualmente agua caliente a cada vivienda y energía para el consumo del edificio, Entonces, el panel PVT desarrollado y fabricado por Endef Engineering y el sistema térmico y eléctrico completo se simularon en Transys. El monitoreo de una instalación real de trabajo se usó en este documento para validar el modelo propuesto. El caso de estudio presentado se encuentra en Zaragoza (España), en un bloque de apartamentos residenciales, con una instalación eléctrica potencia instalada de 4.14 kWp y 20.5 kW de capacidad térmica. El modelo propuesto permite el cálculo de la producción de calor, electricidad y la eficiencia de todo el sistema con un error inferior al 6.5%, [23].

**Salwa El Gindi et al. (2017).** Estos investigadores hicieron una Construcción Integrada de Rehabilitación Fotovoltaica en Edificios de Oficinas, (BIPV). El objetivo principal de la investigación fue optimizar la utilización de soluciones innovadoras de energía renovable centradas en el uso de BIPV como alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y, en consecuencia, reducir las emisiones de carbono de los edificios. . Se lleva a cabo un análisis de viabilidad de un reacondicionamiento de un sistema fotovoltaico a escala para un edificio de oficinas. Sé evaluaron en términos de los costos y producción de energía proyectada de varios sistemas FV a través del software de modelado de simulaciones de energía renovable, PVSOL Premium. La evaluación de diferentes configuraciones resaltó el efecto de factores de instalación como la orientación y el ángulo de inclinación en la producción de energía eléctrica. En la elevación Sur

---

mostró mejores niveles de producción de energía. Sombreado de un dispositivo instalado en la elevación Oeste con un ángulo de inclinación de 30°C, fueron las mínimas. Concluyeron que los PVC pueden contribuir a reducir el consumo de energía eléctrica en los edificios de oficinas al elegir la orientación adecuada, los ángulos de inclinación y tipos de módulos. [24].

#### **1.4.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL FUNCIONAMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS.**

**Maycock y Stirewalt (1985).** Concluyen que la eficiencia en la conversión de energía por parte de las células fotovoltaicas disminuye cuando la temperatura de la célula es elevada. Este fenómeno es más pronunciado en células de silicio que en células de arseniuro de galio, [25].

**Brinkworth *et al.* (1997).** Altos valores de temperatura en los paneles fotovoltaicos se traducen en un efecto negativo en su rendimiento ( ). Por lo tanto, la temperatura juega un papel importante en el proceso de conversión de la radiación solar en energía eléctrica. Tanto el rendimiento como la potencia generada dependen de la temperatura de funcionamiento de la célula, disminuyendo ambas con el aumento de ésta. La eficiencia en la conversión de energía desciende 0.4 y 0.5% por cada grado que asciende la temperatura, [26].

**Moshfegh y Sandberg (1998).** Hace una estimación del flujo y de la transferencia de calor que tienen lugar en un conducto inclinado de módulos fotovoltaicos, llegando a describir ciertos comportamientos térmicos en el canal de ventilación del panel referentes a la distribución de temperaturas en el mismo. Se expone que el perfil de velocidad del aire en el interior del conducto presenta unos máximos en las zonas próximas a las paredes, mientras que la velocidad se reduce considerablemente en la zona central. Esto se debe a un mayor calentamiento del panel en la periferia debido a la influencia de la capa límite. Sin embargo, este efecto es representativo en convección natural o a velocidades bajas, [27].

**Brinkworth (2000).** Hace una estimación del flujo y de la transferencia de calor que tienen lugar en un conducto inclinado de módulos fotovoltaicos. Analiza el comportamiento del flujo en este conducto ante diferentes condiciones de convección natural, según la presencia de viento y en función de los valores de

---

temperatura. Relaciona las distintas variables que toman parte en el problema con la generación de regímenes laminares o turbulentos en el interior del canal, [28].

**Brogren y Karlsson (2002).** Hacen un balance de las distintas formas de como enfriar a las celdas por medio de un fluido calo portador como es el agua y sugieren que la circulación de agua mediante conductos por la parte de atrás de la célula solar es la más eficaz para enfriarla, [29].

**Sandberg y Moshfegh (2002).** Analizan el comportamiento del flujo de aire en módulos fotovoltaicos situados en fachadas de edificios, identificando el efecto que produce la geometría del canal de paso del aire, así como la situación de los paneles; dicen que dependiendo del sentido de colocación de los paneles será su eficiencia, [30].

**Krauter (2004).** Circula un flujo de agua en forma de capa delgada sobre la cara frontal del módulo fotovoltaico. El agua absorbe gran parte del calor generado por el módulo, obtiene mejoras de rendimiento de hasta el 12%. La capa de agua se generó a través del rocío mediante una serie de boquillas situadas en la parte superior, [31].

**Tiwari et al. (2006).** Llevó a cabo la evaluación del rendimiento de los módulos fotovoltaicos integrando un conducto de aire en su cara posterior, con lo que se obtenía una mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica, [32].

**Abdolzadeh y Ameri (2008).** Estudiaron el efecto de la pulverización de agua sobre paneles fotovoltaicos en una instalación de bombeo, lo que producía una disminución en la temperatura de la célula y de la reflexión, [33].

**Kozak et al. (2009).** En general, la dependencia del rendimiento de módulos fotovoltaicos con la temperatura es un problema muy estudiado y analizado. Lo cual establecen diferentes ecuaciones teóricas que permiten determinar la temperatura, eficiencia y energía producida por el panel a partir de variables características de la célula y de variables ambientales. Además, contrastan las correlaciones teóricas con valores experimentales medidos. Se puede observar cómo los valores medidos del rendimiento del panel son inferiores a los teóricos, presentando una caída brusca para temperaturas superiores a los 44°C. Para valores inferiores, la dependencia se puede considerar prácticamente lineal, [34].

---

**Marco et al. (2012).** que emplea el aire que retorna del local climatizado para la refrigeración de paneles fotovoltaicos, consiguiendo así aumentar la temperatura del aire, y aplica este flujo directamente a la regeneración de la rueda desecante. Plantea como variantes dos alternativas al sistema original, incluyendo en una un intercambiador de calor previo a los paneles fotovoltaicos, mientras que en la otra se incluye una bomba de calor para enfriar el aire de proceso en la zona del evaporador y para calentar el aire de regeneración en la zona del condensador, antes de pasar por los paneles fotovoltaicos, [35].

**Sanvicente (2013).** Estudia el potencial térmico de una instalación fotovoltaica integrada en un edificio, con la idea de dar uso a la morfología típica de módulos fotovoltaicos para favorecer la transferencia de calor al aire o a la superficie sobre la que se instala el módulo, a la vez de mejorar la eficiencia eléctrica de los mismos. En este caso, diferentes configuraciones son ensayadas, modificando las condiciones térmicas de contorno y la inclinación del panel, con el objetivo de determinar la situación que mejores prestaciones térmicas aporte, [36].

**Srinivas y Jayaraj (2013).** Finalmente, una de las tecnologías ya existentes es la de paneles solares híbridos, los cuales combinan el efecto del panel solar térmico de aire con el del panel fotovoltaico en un mismo módulo. Entre los múltiples estudios dedicados a este propósito, encontramos que el estudio ensaya un prototipo experimental que integra en un mismo módulo las células fotovoltaicas y una serie de canales de paso del aire. Evalúa el rendimiento eléctrico y térmico del sistema, implementando las condiciones de ensayo y el sistema de medición de variables, [37].

**Ge et al. (2014).** realizan una revisión de los sistemas de refrigeración por desecantes empleando distintos tipos de captador solar térmico y empleando sistemas híbridos. Se analizan distintas configuraciones empleando colectores solares térmicos de agua y de aire, obteniendo datos de numerosas ciudades del mundo, algunos de forma experimental y otros de forma simulada. Dando como resultado que tanto los de agua o aire son eficaces a lo que da lugar a una mayor sencillez y ahorro de costo, [38].

**Adham Makki et al. (2015).** Este trabajo proporciona una revisión exhaustiva de varios métodos informados en la literatura y analiza diversos

---

parámetros de diseño y funcionamiento que influyen en la capacidad de refrigeración de los sistemas fotovoltaicos, lo que conduce a un mejor rendimiento. Las células fotovoltaicas (PV) pueden absorber hasta 80% de la radiación solar incidente disponible en el espectro solar, sin embargo, solo un cierto porcentaje de la energía incidente absorbida se convierte en electricidad dependiendo de la eficiencia de conversión de la tecnología de células PV. El resto de la energía se disipa a medida que el calor se acumula en la superficie de las células y provoca temperaturas elevadas. El aumento de la temperatura de las células fotovoltaicas se considera uno de los problemas más importantes que influyen en su rendimiento, causando una grave degradación y acortando la vida útil de las células. Por lo tanto, la refrigeración de los módulos fotovoltaicos durante el funcionamiento es esencial y debe ser una parte integral de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en lugares bañados por el sol. Se han llevado a cabo muchas investigaciones que investigan una variedad de métodos que pueden emplearse para proporcionar gestión térmica para sistemas fotovoltaicos. Entre estos diseños, los sistemas utilizan aire, líquido, tubos de calor, materiales de cambio de fase (PCM) y dispositivos termoeléctricos (TE) para ayudar al enfriamiento de las células fotovoltaicas, [39].

**M. Hasanuzzaman et al. (2016).** Este trabajo es una compilación completa y revisión de la última literatura sobre trabajos de investigación prestados a lograr una mejor eficiencia a través de sistemas de enfriamiento apropiados. Los sistemas fotovoltaicos (PV) operan en una paradoja; la luz del sol es la entrada esencial para generar electricidad con PV, pero sufren una digresión en el rendimiento a medida que la temperatura de operación aumenta. La mayoría de los objetivos de investigación fueron dobles, esto es para mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos solares y para garantizar una vida más larga al mismo tiempo. Se encuentra que los sistemas de enfriamiento pasivo logran una reducción en la temperatura del módulo PV en el rango de 6-20 ° C con una mejora en la eficiencia eléctrica de hasta 15.5% como máximo. Por otro lado, activo el rendimiento de los sistemas de refrigeración es mejor, como se espera, con una reducción en la temperatura del módulo de PV tan alto como 30 ° C con una mejora en la eficiencia eléctrica de hasta 22% máximo junto con salida de energía térmica con una eficiencia que llega hasta el 60%. Con base en la amplia revisión, puede se puede

---

predecir que con el creciente crecimiento de la electricidad solar fotovoltaica en todo el mundo, el sistema de refrigeración compatible se está convirtiendo en obligatorio para garantizar una mejor cosecha y utilización de la energía, [40].

**Athina G. Gaglia et al. (2017).** Estos investigadores, presentaron datos relevantes recopilados utilizando un pequeño conjunto fotovoltaico poli cristalino en una instalación experimental al aire libre ubicada al norte de Atenas. Las mediciones se realizaron en verano e invierno. Utilizando períodos para cuantificar el rendimiento fotovoltaico y las características operativas, se proporcionaron varias correlaciones para facilitar la estimación del rendimiento fotovoltaico real con locales disponibles parámetros (por ejemplo, temperatura del aire ambiente, velocidad del viento). Se encontró que la eficiencia fotovoltaica era aproximadamente un 18% más baja que en condiciones de prueba estándar de laboratorio, en condiciones de operación similares. Teniendo en cuenta las condiciones reales de funcionamiento durante el verano y en los períodos de invierno, la eficiencia fotovoltaica osciló entre el 6,2% y el 10,4%, con un valor medio anual del 8,7%. Estos valores son mucho más bajos que la eficiencia PV según las especificaciones técnicas de STC, en conclusión; [41].

**Jin Zhang et al. (2017).** Estos investigadores realizaron un trabajo de sistema sometido a la radiación solar fluyente para mejora del rendimiento de un híbrido fotovoltaico - termoeléctrico. El sistema híbrido fotovoltaico - termoeléctrico (PV - TE) tradicional se mejora al introducir bloques de enfriamiento ajustables para reducir la fluctuación de la temperatura causada por el cambio en la radiación solar. Al controlar los ciclos de agua en los bloques de enfriamiento, el nuevo sistema de enfriamiento puede ajustar el número del generador TE enfriado por agua para disminuir la fluctuación de la temperatura. Una configuración experimental está diseñada para probar el nuevo sistema híbrido PV - TE. Debido a la reducción de la fluctuación de la temperatura, el nuevo sistema de refrigeración puede mejorar la potencia de salida. El nuevo sistema híbrido también se compara con el sistema en el que los materiales de cambio de fase (PCM) se colocan entre la célula fotovoltaica y el módulo TE. Los resultados numéricos muestran que la diferencia entre la potencia de salida del nuevo sistema híbrido PV-TE y la del sistema híbrido PV - PCM - TE es lo suficientemente baja como para ignorarla; [42].

---

**Erdem Elibol et al. (2017).** Estos investigadores realizaron un análisis de rendimiento en exteriores de diferentes tipos de paneles fotovoltaicos. La eficiencia del panel fotovoltaico (PV) se ha probado en el laboratorio en condiciones de prueba estándar STC, (25 ° C, 1000 W / m<sup>2</sup> y AM: 1.5). Sin embargo, los paneles fotovoltaicos que se utilizan en diferentes regiones son muy diferentes de STC. Debido a eso, la eficiencia del panel no se observó igual que con los datos del catálogo del fabricante. Este estudio se enfocó en pruebas de desempeño de paneles fotovoltaicos en exteriores además, se analizaron los resultados de un año de paneles fotovoltaicos Mono cristalinos (2,35 kW), poli cristalinos (2,64 kW) y silicio amorfo (2,40 kW). Estos paneles fotovoltaicos se colocaron en el techo del Centro de Investigación y Aplicación de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Düzce (DUB T) en la provincia de Düzce, en Turquía, uno de los países con el mayor potencial de energía solar en Europa y conectado a la red eléctrica. Se tomaron la cantidad de energía producida por los paneles durante un día, un mes y un año, así como la eficiencia del inversor y las relaciones de rendimiento que se calcularon, encontrándose; 73%, 81% y 91% para paneles fotovoltaicos de a-Si, poli cristalinos y mono cristalinos, respectivamente. La eficiencia del panel fue de 4.79%,11.36% y 13.26% en el mismo orden. Todos los resultados fueron comparados con estudios previos. Se realizó un análisis estadístico para establecer la relación entre la eficiencia y los índices de rendimiento de los tipos de paneles, la temperatura ambiental, la temperatura del panel y la cantidad de radiación. Concluyendo un análisis estadístico, se observó que el aumento de temperatura de 1 ° C aumentó la eficiencia de los paneles de a-Si en 0.029% y la eficiencia de los paneles poli cristalinos en 0.033%, sin embargo, disminuyó la eficiencia de los paneles mono cristalinos en 0.084%,[43].

### **1.5 JUSTIFICACIÓN**

Los procesos híbridos térmico-fotovoltaico han sido poco estudiados. Una de las vías más prometedoras de la conversión fotovoltaica es las utilizadas con intercambiador de calor las cuales presentan las siguientes ventajas:

- Incremento en la producción de electricidad.
- Menos superficie necesaria para instalar energía fotovoltaica y térmica.
- Mayor cantidad de materiales reciclables al fin de la vida útil del panel solar.

- 
- Aumento del aprovechamiento de la radiación solar reflejada.
  - Prolongación de la vida útil de los paneles.

Por ello resulta de interés científico y técnico aprovechar el calor generado en un proceso fotovoltaico, el cual puede destinarse a pequeñas y medianas empresas que utilizan ambos procesos sin realizar grandes inversiones, ni tener grandes extensiones de tierra.

## **1.6 OBJETIVO GENERAL**

Optimización de la Eficiencia del Sistema Solar Híbrido, Térmico-Fotovoltaico Avanzado de manera teórica y experimental.

### **1.6.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Aumentar el rendimiento de un panel solar fotovoltaico por medio de la reducción del factor de degradación por efectos de la temperatura sobre las células fotovoltaicas

Reducir la superficie necesaria para obtener electricidad, al utilizar el mismo captador se reducirá a la mitad la superficie necesaria.

Aprovechar al máximo la radiación solar por metro cuadrado por medio de la cogeneración de la energía en forma de electricidad y calor.

Incrementar la vida útil de las instalaciones fotovoltaico, utilizando semiconductores para operar a temperaturas más bajas y por lo tanto más idóneas.

Obtener el cálculo del comportamiento térmico del acoplamiento de un intercambiador de calor mediante el Software ANSYS Fluent, para obtener las temperaturas al interior del panel fotovoltaico.

Obtener la eficiencia térmica experimental y compararla con la eficiencia de condiciones estándar de pruebas de laboratorios.

## **1.7 ALCANCE**

Estimar y optimizar en tiempo real el proceso de la transferencia de calor del sistema híbrido solar avanzado.

1. Estudio del estado del arte de sistemas de solares híbridos.
2. Adquirir datos y procesarlos para caracterizar el sistema, esto es determinar la eficiencia del sistema solar.

---

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO 1

En este capítulo se concluye que haciendo una revisión de trabajos publicados anteriormente al nuestro sobre las metodologías realizadas, haciendo una comparación con las diferentes geometrías de los intercambiadores de calor como, híbridos en México, **comparándolo con nuestro trabajo en el cual se basa en ahorrar espacio (economizar), el área de construcción del sistema solar híbrido, mejorando la eficiencia del equipo**

---

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

---

En este capítulo se describe los principales conceptos involucrados en los sistemas solares como la energía solar y su aprovechamiento, el movimiento solar, y por ultimo una Reseña de los Software ANSYS ICEM y ANSYS FLUENT.

## 2.1 PRINCIPIOS DE LA ENERGÍA SOLAR.

El sol tiene una masa de aproximadamente 1.024 toneladas, un diámetro de 865.000 millas, e irradia energía a un ritmo de unos  $3,8 \times 1.020$  mWh. Entre el sol y la tierra existe una distancia que varía desde 92 hasta 95 millones de kilómetros [44]. La tierra recibe del sol aproximadamente  $5.4 \times 10^{24}$  J por año. Esto es equivalente a cerca de 30,000 veces la energía utilizada en el mundo en la actualidad [45]. Energía Solar, es la energía que se produce en el Sol debido a la continua reacción termonuclear que en su interior se lleva a cabo a temperaturas de millones de grados. La reacción básica en el interior del Sol, es la fusión nuclear, en la cual cuatro protones (de Hidrógeno) se combinan para formar un átomo de Helio; como consecuencia de ello, la masa “perdida” se convierte en energía en forma de radiación (energía electromagnética), de acuerdo a la bien conocida ley de Einstein. Este proceso tiene lugar en el núcleo de la esfera solar, para luego ser transferida a la superficie, a través de la radiación y convección, como lo muestra la Fig. 5, incluidos los fenómenos de emisión, absorción y “re-radiación” [46].

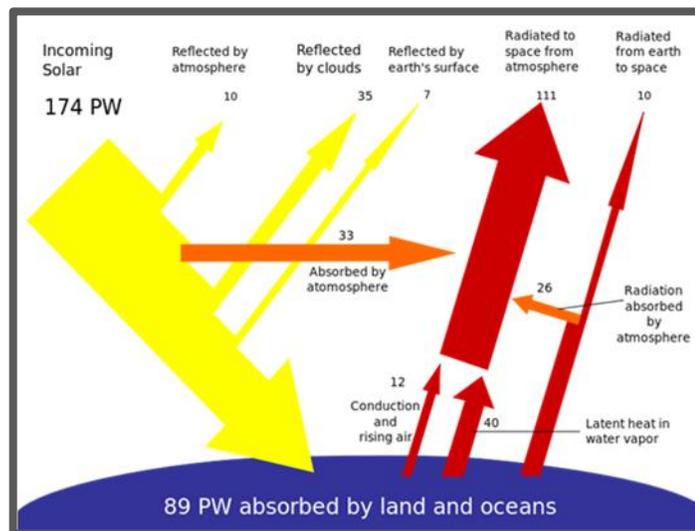


Fig. 2.1 Radiación solar que llega a la tierra (Modificada de <http://web.ing.puc.cl/>, consultada el 28 de marzo de 2017)

## 2.2 MOVIMIENTO SOLAR

Además del movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su eje, la Tierra se encuentra en el espacio orbitando alrededor del Sol, y completa cada una de sus órbitas

---

en un período de un año. La forma exacta de la trayectoria que describe la Tierra viene dictada por las leyes de la dinámica celeste, que indica que se trata de una elipse, pero que con muy buen grado de aproximación podremos suponer que se trata de una circunferencia.

La primera idea básica para comprender los movimientos del Sol en el cielo y que hay que tener siempre en cuenta, es que dicha circunferencia es completamente plana, es decir, que nosotros podríamos hacer descansar la órbita de la Tierra sobre una hoja de papel, eso sí, de dimensiones descomunales, ya que hay que tener en cuenta que el radio de la circunferencia de la órbita terrestre es de unos 150 millones de kilómetros. La figura 2.2 representa el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Al plano que contiene la órbita terrestre se le denomina plano orbital, o mucho más comúnmente eclíptica [47].

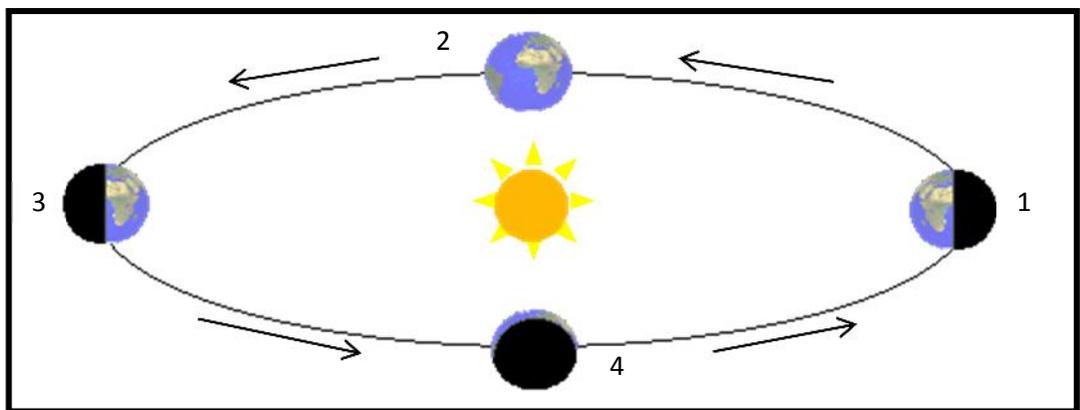


Fig. 2.2 La Tierra orbitando al Sol (Modificada de <http://astrogea.org/coordenada/ficha3.htm>, consultada el 9 de marzo de 2017)

Si la Tierra se sitúa en la punto 1 en su órbita alrededor del Sol, veremos al Sol proyectado sobre el punto 1' en el fondo de estrellas, suponiendo que pudiésemos evitar el brillo diurno del cielo. A medida que la Tierra se va desplazando alrededor del Sol y alcanza su punto 2 según la Fig. 2.3, entonces el Sol se habrá desplazado sobre el fondo de estrellas proyectado hasta la posición 2'. Es evidente que a lo largo de un año el Sol habrá recorrido todo el ecuador celeste dando una vuelta completa a la bóveda de estrellas. Nuevamente se trata de un movimiento ficticio, debido a nuestra perspectiva desde la Tierra. A esta circunferencia o Trayectoria que recorre el Sol en un año, también

se le denomina eclíptica. Si el eje de la Tierra fuese perpendicular al plano de la órbita, entonces el ecuador celeste coincide con la eclíptica.

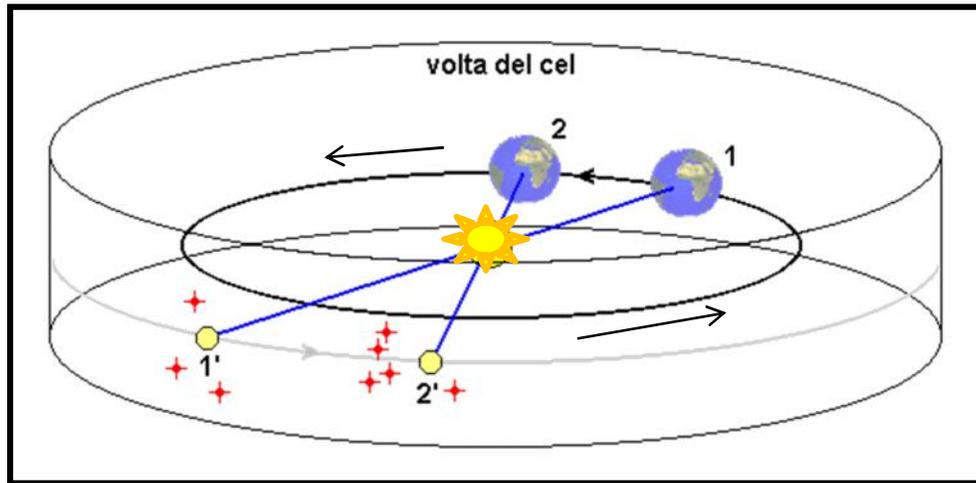


Fig. 2.3 Inclinación del eje terrestre (Modificada de <http://astrogea.org.>, consultada el 9 de marzo de 2017)

El eje de la Tierra posee una cierta inclinación, de  $23.45^\circ$  exactamente, la Fig. 2.4 muestra que la orientación del eje inclinado permanece constante respecto del plano orbital y respecto de las estrellas fijas. Esta inclinación del eje terrestre es lo que da lugar a las estaciones del año.

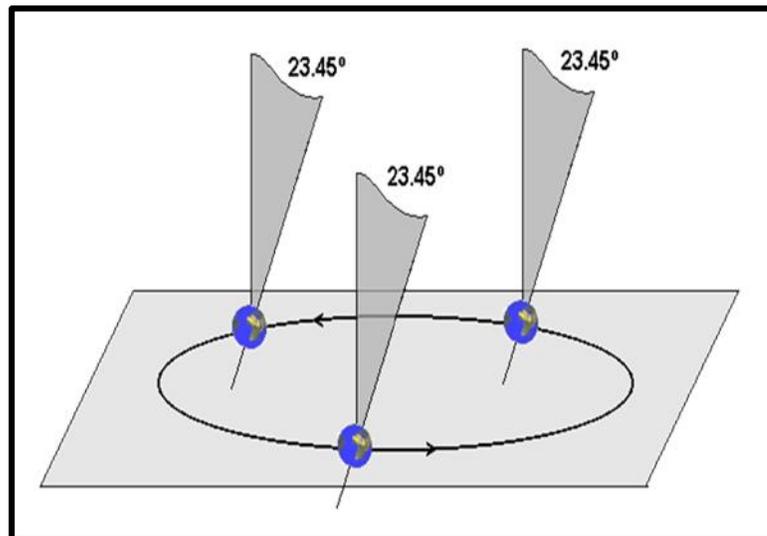


Fig. 2.4 Inclinación del eje de la tierra (Modificada de <http://astrogea.org.>, consultada el 9 de marzo de 2017)

## 2.3 LA ENERGÍA SOLAR EN EL MUNDO Y MÉXICO

La Fig. 2.5 muestra que actualmente, la conversión de energía solar se utiliza ampliamente para generar calor y producir electricidad. Un estudio comparativo sobre el consumo mundial de energía lanzado por la Agencia Internacional de Energía (IEA) muestra que en 2050, las instalaciones de paneles solares suministrarán alrededor del 45% de la demanda de energía en el mundo y se encontró que la energía solar térmica es cada vez notable popularidad en aplicaciones industriales [48].

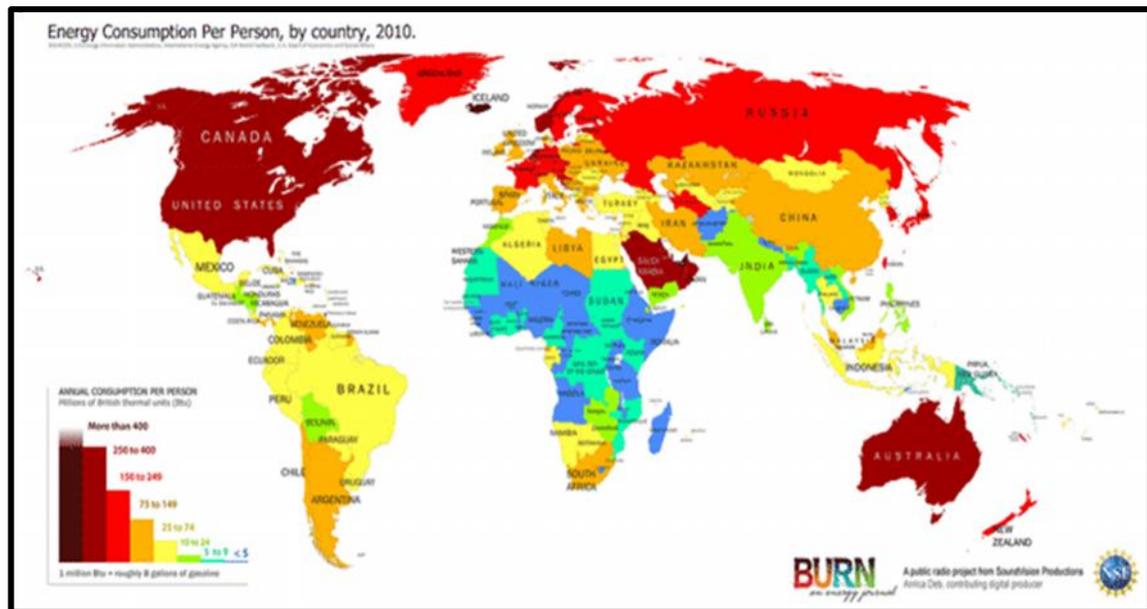


Fig. 2.5 Consumo de energía en el mundo (Modificada de <https://socialeshelp.files.wordpress.com/consumo-de-energ3ada.gif>, consultada el 12 de febrero del 2017).

Actualmente se considera que en el mercado de la Unión Americana a nivel industrial el costo por energía solar es el mismo que la que se produce por gas natural a un precio de \$0.175 kWh; para 2018 se espera que el precio baje a \$ 0.15 kWh motivado por los incentivos para el uso de energías renovables, mientras que el precio de energía originada en plantas convencionales se ubique entre \$0.22 y \$0.25 kWh, donde California y Arizona serán líderes en la Unión Americana [49].

A nivel mundial hasta octubre de 2014, las instalaciones generadoras de energía solar térmica proporcionaban solo 700 megavatios y otras centrales que estaban en construcción proporcionarían otros 400 mega watts. Se están desarrollando otros proyectos de electricidad solar de concentración por un total de 14000 MW [50].

México es muy rico en fuentes de energía renovable (solar, eólica, biomasa, energía hidroeléctrica y geotérmica). Sin embargo, el potencial de este tipo de energía no se ha explotado completamente. La energía solar tiene un gran potencial debido a la ubicación ideal del México en el llamado Cinturón Solar como lo muestra la Fig. 2.6 Considerando la capacidad energética del Sol, la cual perdurará durante millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio Nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual, la fig. 11 muestra los índices que van de los 4.4 kWh/m<sup>2</sup> por día en la zona centro, a los 7.0 kWh/m<sup>2</sup> por día en el norte del país [46]. Por lo cual resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país.

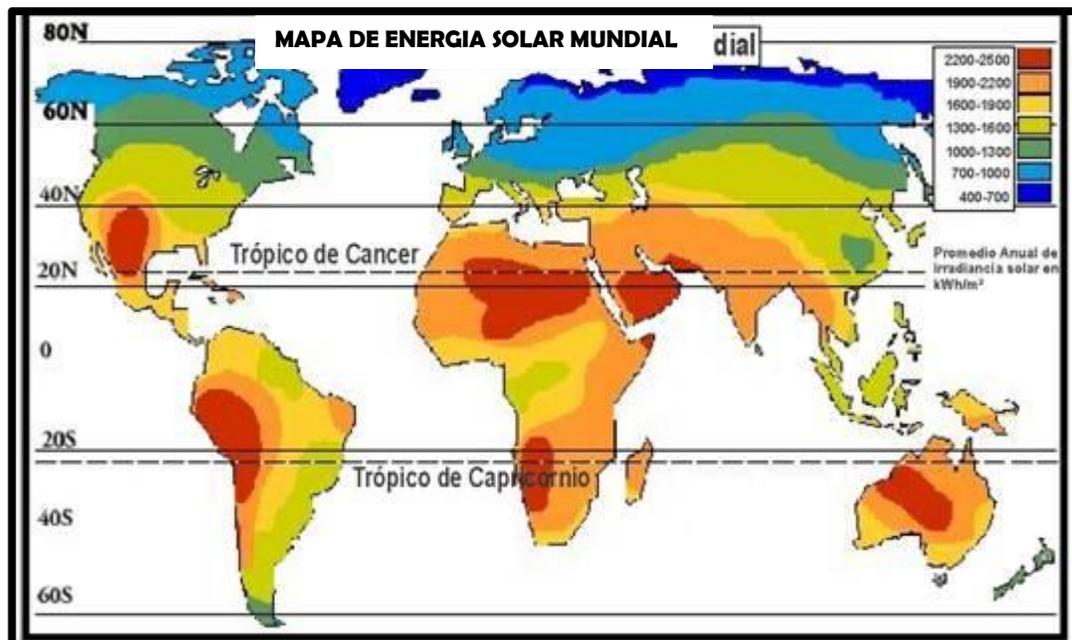


Fig. 2.6. Radiación solar anual del mundo (modificada de [www.skyscrapercity.com](http://www.skyscrapercity.com). Consultada el 12 de febrero de 2017).



- ) Tecnologías activas: incluyen el uso de paneles fotovoltaicos y colectores térmicos para recolectar la energía (Fig.2.8).

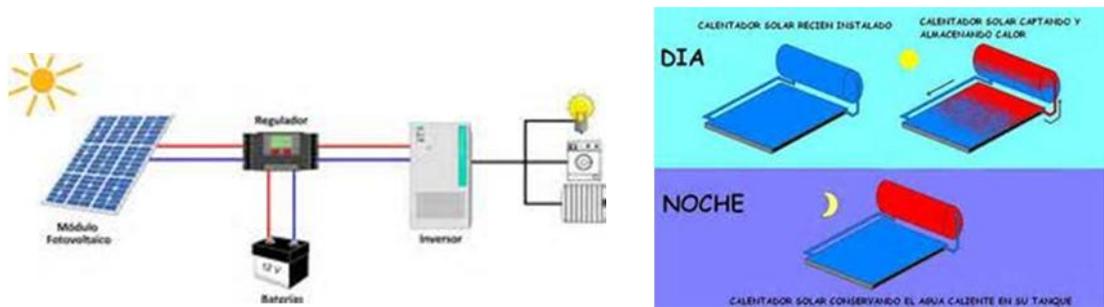


Fig. 2.8. Tecnologías activas: paneles fotovoltaicos y colectores térmicos (Modificada de <https://myprofetecnologia.wordpress.com>, consultada el 25 de febrero de 2017)

- ) Técnicas pasivas (Fig. 2.9) Se encuentran diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática: la orientación de los edificios al Sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para la dispersión de luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural [53].



Fig. 2.9 Tecnologías pasivas (Modificada de Tett, 1999) [12]

Los Sistemas Térmicos, funcionan por medio de la conversión de la luz solar en calor sobre superficies que transfieren dicha energía a fluidos de trabajo para producción de calor de proceso. Esto se puede conseguir por medio de dispositivos planos con superficies selectivas o por medio de dispositivos de concentración de radiación con superficies especulares y selectivas [54].

Los colectores de energía solar térmica están clasificados como:

- ✓ Los colectores de baja temperatura generalmente son placas planas usadas para calentar agua.
- ✓ Los colectores de temperatura media también usualmente son placas planas usadas para calentar agua o aire para usos residenciales o comerciales.
- ✓ Los colectores de alta temperatura concentran la luz solar usando espejos o lentes y generalmente son usados para la producción de energía eléctrica [55].

## 2.5 CAPTADORES SOLARES PLANOS

Un captador solar de agua o aire se define como un tipo especial de **intercambiador de calor** que transforma la energía solar radiante en calor. Un captador solar convencional está formado por una estructura que contiene un absorbedor, una cubierta y aislamiento en la parte trasera [51], como se observa en la Fig. 2.10

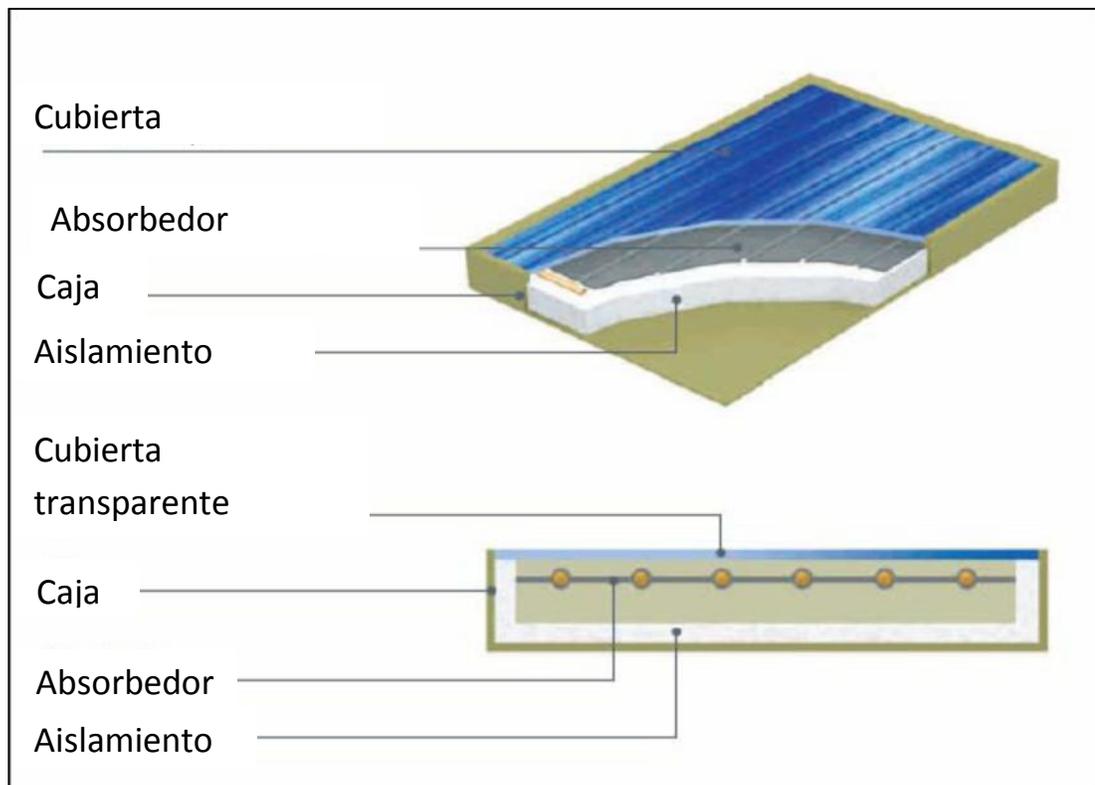


Fig. 2.10 Partes de un captador solar plano (Modificada de Pottler K, 1999) [15]

---

El captador solar trata de extraer parte del calor producido por el flujo radiante incidente para aprovecharlo como energía utilizable, el resto es energía perdida por radiación, convección y conducción. La energía utilizable es extraída del colector a través de un fluido llamado calo portador. Cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura de utilización y la temperatura ambiente, mayores serán también las pérdidas térmicas y, por tanto, menor la cantidad de energía útil o aprovechable que el fluido será capaz de extraer.

En condiciones normales de operación se lleva a cabo el Efecto Invernadero en un captador solar, la radiación solar que incide sobre la cubierta de vidrio, se transmite, se refleja y se absorbe, el vidrio absorbe una mínima cantidad de energía y la mayor parte de la energía que se transmite es absorbida por la placa de absorción [56].

La placa de absorción incrementa su temperatura y se transfiere al fluido caloportador, generalmente agua. La transferencia de calor de la placa absorbidora al fluido ocurre por conducción a través de la placa de absorción y por convección forzada desde la parte interna de la placa de absorción al fluido de trabajo que circula por tubos que están adheridos a la placa. La transferencia de calor desde la placa de absorción a la cubierta vidrio es por convección libre o forzada, y desde la cubierta de vidrio a la atmosfera, es por convección libre o forzada.

Existe también transferencia de calor por conducción desde la placa de absorción a través del aislamiento. Las pérdidas de calor de los diferentes componentes del colector solar a los alrededores están asociadas con las pérdidas por radiación, convección y conducción [57].

La proporción de cada una de las contribuciones o pérdidas de energía dependerá del buen o mal funcionamiento del equipo, el cual se determina por medio de su rendimiento (eficiencia). La figura 2.11 se presenta un diagrama esquemático de los diferentes modos de transferencia de calor en un colector solar

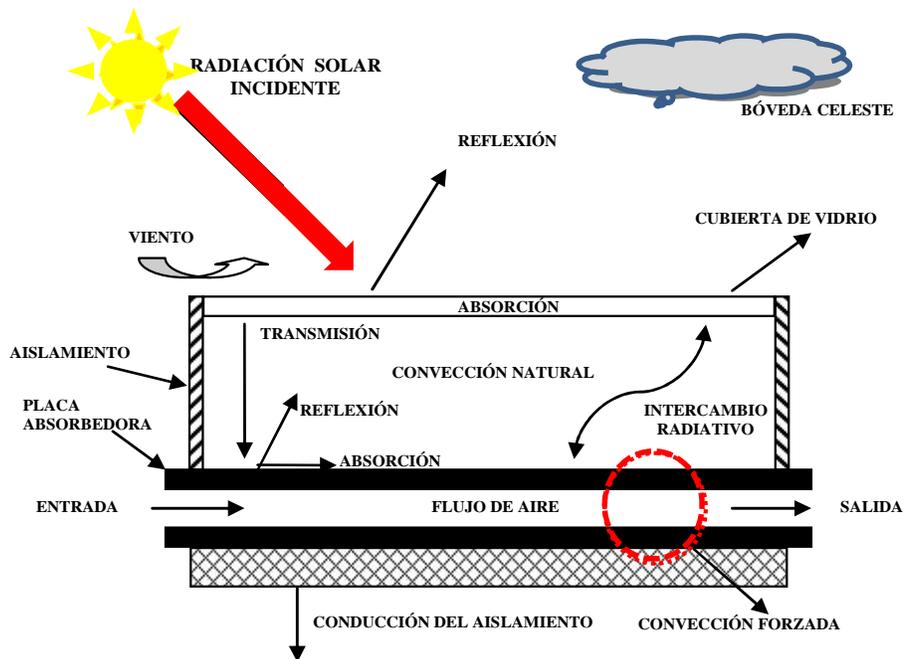


Fig. 2.11 Transferencia de calor en un colector solar (Modificada de Pottler, 1999)

## 2.6 INTERCAMBIADORES DE CALOR

En la mayoría de los procesos y los sistemas industriales sucede que el calor debe ser transferido de una línea de proceso a otra o de un fluido a otro, los equipos que permiten llevar a cabo esta tarea son los intercambiadores de calor. Estos se emplean para transferir calor entre dos fluidos, que se encuentran separados por una barrera o que se encuentren en contacto. La transferencia de calor se realiza a través de una pared (barrera) o de un tubo que separa ambos fluidos [58]. Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de un lugar a otro, aunque en ingeniería hay situaciones en las cuales se dan combinaciones de dos o tres de las formas. Estas son: Conducción, es la transferencia debida al movimiento que se produce en el seno de una masa liquido o gaseosa. Convección, que es el fenómeno de transmisión de calor desde la masa de un cuerpo hacia el medio que lo rodea; y Radiación, que es la transmisión de calor en forma de ondas electromagnéticas hacia otros cuerpos que están a su alrededor [59].

---

### 2.6.1 TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Existen diversas formas de clasificar los intercambiadores de calor, una de ellas es según la distribución de los flujos dentro de este, según esta clasificación encontramos los de flujo paralelo en los que los fluidos frío y caliente entran por el mismo extremo del intercambiador, fluyen en la misma dirección y salen por el mismo extremo; flujo contracorriente en este los fluidos entran por extremos opuestos y fluyen en direcciones contrarias; y los de flujo cruzado en este tipo de intercambiadores un fluido se desplaza dentro del intercambiador perpendicularmente a la trayectoria del otro fluido [60].

Para clasificar los intercambiadores según su aplicación se emplean términos especiales muy usados en ingeniería, estos son: **Calderas**, son unas de las principales aplicaciones de los intercambiadores de calor y se usan en aplicaciones de generación de vapor; **Condensadores**, como su nombre lo indica en estos ocurre un cambio de fase en el cual una corriente en fase de vapor se convierte a fase líquida. Por último existe una clasificación según la estructura física del intercambiador, entre estos encontramos:

- **Intercambiadores de tubería doble:** Consiste en un tubo pequeño que está dentro de otro tubo mayor, circulando los fluidos en el interior del pequeño y entre ambos. Estos intercambiadores se utilizan cuando los requisitos de área de transferencia son pequeños [61].

- **Intercambiadores enfriados por aire:** Consisten en una serie de tubos situados en una corriente de aire, que puede ser forzada con ayuda de un ventilador. Los tubos suelen tener aletas para aumentar el área de transferencia de calor. Pueden ser de hasta 12 m de largo y anchos de 2.5 a 5 m. La selección de un intercambiador enfriado por aire frente a uno enfriado por agua es una cuestión económica, hay que considerar gastos de enfriamiento del agua, potencia de los ventiladores y la temperatura de salida del fluido [62].

- **Intercambiadores de tubo y coraza:** Estos intercambiadores de calor constan de cualquier cantidad de tubos en ocasiones hasta cientos empacados en una coraza o

---

casco con sus ejes paralelos al de este. La transferencia de calor se realiza a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, mientras que el otro se mueve por fuera de estos, pasando por la coraza [63].

- **Intercambiadores de superficie.** En ellos el proceso de transmisión de calor está invariablemente relacionado con la superficie de un sólido que los separa, de modo que no existe la posibilidad de contacto entre ellos. Son los más utilizados en todo tipo de aplicaciones. Atendiendo a la forma de la superficie separadora, estos intercambiadores pueden ser:

- **Intercambiadores de placas.** Son aquellos en los que la superficie de separación entre los fluidos es una pared plana. Son relativamente recientes, pero sus ventajas respecto de los clásicos multi-tubulares, están desplazando a estos en la mayoría de las aplicaciones. Este tipo de intercambiador de calor fue el escogido para acoplar al prototipo de captación solar que se pretende diseñar, porque, es un equipo que cuenta con la ventaja de ser compacto, de fácil mantenimiento, puede manejar fluidos gaseosos o líquidos y según las leyes heurísticas es el tipo de intercambiador que se utiliza cuando los fluidos a tratar son aceite/agua o aire por ejemplo para enfriar aceite en sistemas de lubricación o hidráulicos y transformadores eléctricos. Este tipo de I.C. es el nuestro, [64].

### 2.6.2 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (U)

Un parámetro fundamental en cualquier análisis térmico de intercambiadores, es el Coeficiente Global de Transferencia de Calor U, el cual se puede definir en términos de una resistencia térmica total para la transferencia de calor de un fluido a otro ya sea a través de la pared de un tubo o de una placa, siendo este último, el caso predominante de este estudio.

El Coeficiente dependerá de varios factores los cuales se originan a causa de la operación normal del equipo sobre las superficies del intercambiador de calor y esto son ensuciamientos debido a impurezas en el fluido, formación de óxidos u otras reacciones entre el fluido y el material de las paredes. Los subsecuentes depósitos de una película o

---

escamas sobre la superficie, pueden incrementar en gran medida la resistencia a la transferencia de calor entre los fluidos.

Generalmente el coeficiente global de transferencia se ha calculado utilizando temperatura y flujo en nuestro Intercambiador de calor en estudio ( ecuación 2.20).

### **2.6.3 COEFICIENTES CONVECTIVOS**

El coeficiente convectivo de transferencia de calor representa la resistencia térmica de una superficie existente del intercambiador de calor a que se refiera, no es una propiedad del fluido, es un parámetro que se determina experimentalmente y cuyos valores dependen de todas las variables que influyen en la convección; como son la geometría del sistema, las características del flujo del fluido y del sólido, las temperaturas de ambos, el área de transferencia y las propiedades termofísicas del sistema.

### **2.6.4 BALANCE TERMODINÁMICO**

El modelado de los procesos es un área que involucra tanto el conocimiento teórico como el conocimiento del proceso o sistema que se va a modelar.

Para desarrollar un modelo que sea capaz de representar las variables de estado del proceso con exactitud es necesario conocer su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación, con la finalidad de tener un punto de comparación entre lo experimental y lo simulado; refiriendo a la 1ra. Ley de la Termodinámica.

### **2.6.5 MÉTODO WILSON PLOT**

El Método Wilson Plot es una técnica para estimar los coeficientes de varios tipos de procesos de transferencia de calor con la finalidad de obtener una correlación general de transferencia de calor. Este método es una gran herramienta en las actividades de investigación que implican análisis de intercambiadores de calor.

Este método está basado en la separación de la resistencia térmica total, la resistencia térmica convectiva interna y las resistencias térmicas restantes que participan en el proceso global.

$$R = R_{i1} + R_w + R_e \quad 2.1$$

Donde la resistencia interna se calcula con la siguiente ecuación.

---

$$R_{i1} = \frac{1}{\alpha_{i1} A_{i1}} \quad 2.2$$

La resistencia de la pared se calcula con la siguiente ecuación.

$$R_w = \frac{l_1 \left( \frac{r_e}{r_{i1}} \right)}{2\pi\lambda_w L} \quad 2.3$$

La resistencia externa se calcula con la siguiente ecuación.

$$R_e = \frac{1}{\alpha_e A_e} \quad 2.4$$

Las resistencias tomadas como constantes se agrupan en la siguiente ecuación:

$$C_1 = R_e + R_w \quad 2.5$$

La variación del coeficiente convectivo externo es función de la velocidad, esta variación se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha_e = C_2 v_e^m \quad 2.6$$

Donde al coeficiente m se le asigna un valor 0.8 (Dittus-Boelter) y C<sub>2</sub> es constante con un valor por determinar

Finalmente, la resistencia térmica global obtenida de las pruebas experimentales puede ser representada como una función lineal de los valores experimentales de  $1/v_e^{0.8}$ .

$$R_t = C_1 + \frac{1}{C_2 A_e} \frac{1}{v_e^m} \quad 2.7$$

El coeficiente de transferencia de calor de condensación corresponde al coeficiente convectivo en la parte interna del condensador; el cual es calculado combinando la ecuación 2.1 y la ecuación 2.4.

$$\alpha_{i1} = \frac{1}{(C_1 - R_w)A_{i1}} \quad 2.8$$

## 2.6.6 TRANSFERENCIA DE CALOR

Para analizar el comportamiento de la temperatura al interior de un sistema fotovoltaico hay que reconocer cuales son los mecanismos que tiene la energía para disiparse. Los tipos de transferencia de calor existentes en la naturaleza son tres: **conducción, convección y radiación.**

### 2.6.6.1 CONDUCCIÓN

La conducción corresponde a la transferencia de calor que ocurre en un sólido o en un fluido en reposo mediante movimientos de rotación y vibración a escala molecular. Estos movimientos son más intensos a altas temperaturas por lo que la transferencia de energía ocurre desde zonas de alta a baja temperatura. El físico francés Jean-Baptiste Joseph Fourier describió el flujo de calor como proporcional al gradiente local de temperatura y a la conductividad térmico del material, relación hoy conocida como **Ley de Fourier.**

Si en un medio existe un campo de temperatura  $T(x, y, z, t) = T(r^{\vec{}}, t)$ , la ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos por:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (2.9)$$

Dónde:

$k$ : Conductividad térmica del material ( $W/m \cdot K$ )

$\vec{q}$ : Flujo de calor por unidad de tiempo y área ( $W/m^2$ )

La expresión puede escribirse en sus componentes direccionales tal como sigue:

$$q_x = -k \partial T / \partial x \quad (2.10)$$

$$q_y = -k \partial T / \partial y \quad (2.11)$$

---

$$qz = -k \partial T / \partial z \quad (2.12)$$

Este mecanismo de transferencia de calor permite modelar la transferencia de energía entre capas del módulo fotovoltaico compuesto de distintos materiales, con espesores distintos [65].

### 2.6.6.2 CONVECCIÓN

La convección corresponde a transferencia de calor dentro de un fluido (líquido o gaseoso) que fluye con movimientos macroscópicos, es decir, la transferencia de energía ocurre por la mezcla de porciones de fluido a distintas temperaturas. Este movimiento macroscópico del fluido se conoce como campo de velocidades y es el encargado de generar el traspaso de calor. Se le atribuye a Newton el descubrimiento de la llamada ley de enfriamiento que dice que el flujo de calor de un cuerpo al espacio es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno. En este sentido se describe la ecuación para el cálculo del flujo de calor por convección en estado estacionario

$$q_{conv} = h T \quad (2.13)$$

Dónde:

$h$  : Coeficiente Convectivo ( $w/ m^2 \cdot K$  )

$T$  : Diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno [ $^{\circ}C$  o  $K$ ]

El cálculo del coeficiente convectivo para las distintas situaciones depende de si se trata de *convección natural* o *forzada*. Este tipo de transferencia de calor estará presente tanto en el estudio de pérdidas por convección sobre el panel (contacto al aire que rodea el panel) como en el calor disipado en el interior (convección libre o forzada).

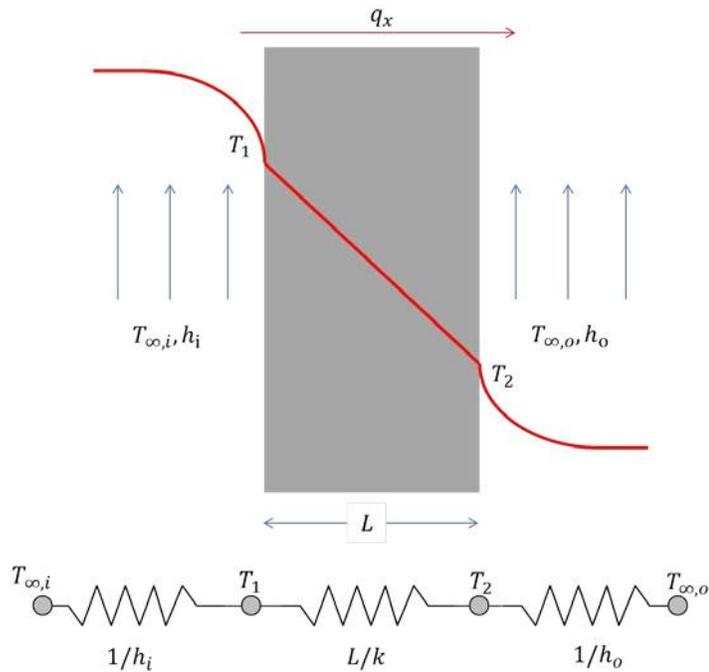


Figura 2.12 Conducción y Convección para un modelo unidimensional

Para caracterizar los coeficientes convectivos respectivos a la geometría de análisis en función de las variables disponibles es necesario contar con la ayuda de algunos números adimensionales, los que permiten caracterizar el comportamiento del flujo de acuerdo al valor que estos toman en situaciones dadas.

### 2.6.6.3 Número de Reynolds

$$Re = U L/\nu = U Dh/\nu \quad (2.14)$$

$U$  : Velocidad del fluido [m/s]

$\nu$ : Viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s]

$L$ : Longitud característica (largo para placas horizontales, diámetro para ductos)

$Dh$ : Diámetro hidráulico (para canales no circulares) definida como

$$Dh = 4Ac/ P \quad (2.15)$$

$Ac$ : Área de sección de paso del fluido [m<sup>2</sup>]

---

$P$ : Perímetro mojado (perímetro del área de sección) [m]

El número de Reynolds permite distinguir fluidos

( $Re > 4000$ ) Fluidos turbulentos

( $Re < 2300$ ) Fluidos laminares

( $Re > 2300 < 4000$ ) Fluido de Transición

#### 2.6.6.4 Número de Prandtl

$$Pr = \nu / \alpha t = C_p \mu / k \quad (2.16)$$

$\nu$ : Viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]

$\alpha t$ : Difusividad térmica [ $m^2/s$ ]

$C_p$ : Capacidad calorífica [ $J/kgK$ ]

$\mu$ : Viscosidad dinámica [ $kg/ms$ ]

$k$ : Conductividad térmica [ $W/mK$ ]

Un número de Prandtl bajo indica que la difusión térmica es mayor que la viscosidad, por lo que predomina la transferencia de calor por conducción. Si el número de Prandtl es alto la difusión de momento es más relevante, por lo que predomina la transferencia de calor por convección.

#### 2.6.6.5 Número de Nusselt

$$Nux = hx/k = hDh/ k \quad (2.17)$$

$h$  : Coeficiente convectivo [ $W/m^2K$ ]

$x$  : Distancia [m] o longitud característica ( $L$  para placas horizontales,  $D$  para ductos)

$Dh$ : Diámetro hidráulico (para canales no circulares)

$k$ : Conductividad térmica [ $W/mK$ ]

Permite relacionar los modos de transferencia de calor por convección y por conducción, relacionando sus coeficientes relevantes. Para el cálculo del número de Nusselt existen variadas correlaciones dependiendo de la geometría a analizar; existen dos casos relevantes para este estudio pero, nada más mencionaremos el que utilizamos en nuestro trabajo.

### 2.6.6.6 Nusselt para placas horizontales (Flujo laminar) [60].

$$Nu_L = hL/k = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.18)$$

$Re$ : Número de Reynolds

$Pr$ : Número de Prandtl

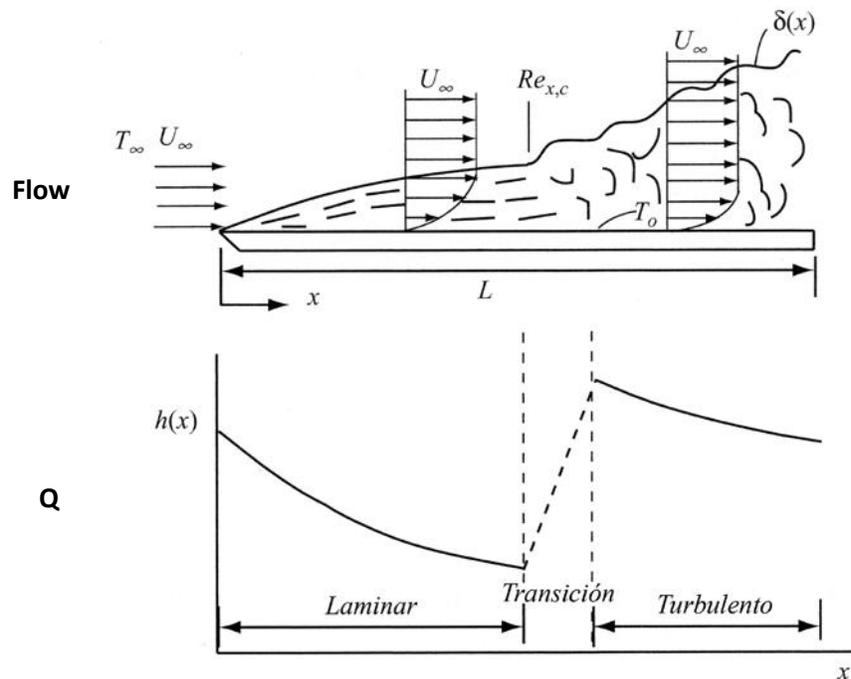


Figura 2.13 Flujo paralelo en una placa horizontal (Convección Forzada) [60]

### 2.6.7 RADIACIÓN

El tercer mecanismo de transferencia de calor es la radiación, que no es otra cosa que ondas electromagnéticas propagándose a través de un medio transparente como el

---

aire o por el vacío. El intercambio de calor por radiación entre cuerpos se puede expresar como:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.19)$$

Dónde:

$\varepsilon$ : Emisividad del cuerpo 1

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann igual a  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$T_1, T_2$ : Temperaturas de los cuerpos respectivamente [K]

Este tipo de transferencia de calor servirá para definir las pérdidas de calor hacia la atmósfera desde el panel fotovoltaico [66].

### 2.6.8 RESISTENCIA TÉRMICA

Se define la resistencia térmica, como un análogo a una resistencia eléctrica, a la oposición que pone un cuerpo o volumen a que el calor fluya a través de él. Es una propiedad que depende del material del que esté compuesto el cuerpo, del área de intercambio térmico y también de la geometría. La resistencia térmica queda caracterizada por la ecuación del calor [67].

$$Q = UA \quad T = T/R \quad (2.20)$$

$$R = T/Q \quad (2.21)$$

)  $U$  : Coeficiente global de transferencia de calor [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

)  $A$  : Área de intercambio de calor [ $\text{m}^2$ ]

)  $Q$  : Calor a disipar [W]

)  $T$  : Diferencia de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$  o K]

Quedan caracterizadas así entonces las resistencias de tipo conductivas (unidimensional).

---

$$R_{cond} = t/kA \quad (2.22)$$

)  $A$ : Área de intercambio de calor [ $m^2$ ]

)  $t$ : Largo del cuerpo conductor [ $m$ ]

)  $k$ : Conductividad térmica [ $W/mK$ ]

Y las de tipo Convectivas

$$R_{conv} = 1/hA \quad (2.23)$$

)  $A$  : Área de intercambio de calor [ $m^2$ ]

)  $h$  : Coeficiente convectivo [ $W/m^2K$ ]

## 2.7 CELDAS SOLARES

Las celdas solares, llamadas también celdas fotovoltaicas (PV) son dispositivos semiconductores que convierten directamente la luz solar en corriente eléctrica para producir energía eléctrica utilizable.

En la actualidad la tecnología más desarrollada para la producción de electricidad solar por vía fotovoltaica es la basada en el uso de módulos fotovoltaicos planos, que incorporan células de silicio, ya sea mono o poli cristalinas, o módulos fotovoltaicos de alta concentración, éstos últimos siendo los más modernos y en los que se necesita mucha menos cantidad de silicio para las células. Sin embargo, la tecnología de módulos fotovoltaicos planos se encuentra desarrollada desde hace décadas, ofreciendo en la actualidad un producto comercial que ha ido mejorando sus prestaciones en el tiempo gracias a la libre competencia. Así los fabricantes actuales garantizan sus productos por tiempos superiores a 20 años, obteniendo degradaciones inferiores al 20% durante la vida útil de los módulos.

La primera aplicación de las celdas solares se realizó en Japón, dentro de un faro en donde reemplazaron el uso de gas durante las noches, todo esto, en 1966. De esta

---

manera, se comenzó a buscar la creación de celdas que en primera instancia pudieran aplicarse como generadoras de luz en lámparas u otros aditamentos que necesitaran de este tipo de alimentación para su funcionamiento.

Como punto final, ahora podemos disfrutar de las virtudes y eficacia de la energía solar gracias a que a partir de 1960, gracias al trabajo del químico industrial Elliot Berman, quien pudo realizar avances en la producción más económica de silicio (el principal material de las energías sustentables). Gracias a eso ahora podemos aplicar esta energía en un sin número de sectores: las telecomunicaciones, la transmisión de señales radiofónicas o de televisión, la instalación de energía eléctrica en zonas rurales donde no alcanzan a llegar las compañías convencionales. En sistemas de riego programados o incluso en artículos tan cotidianos como las calculadoras y otros dispositivos de uso común que se cargan gracias a la energía solar.

### **2.7.1 TECNOLOGÍA DE CELDAS SOLARES**

La producción eléctrica está basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada de ellas una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente de energía la radiación luminosa. Las células se montan en serie sobre módulos fotovoltaicos o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula. Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 mm<sup>2</sup>.

---

## 2.7.2 TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

Existen diferentes tipos de celdas fotovoltaicas en función de los materiales empleados, los métodos de fabricación que se empleen y la forma final.

- Silicio Mono cristalino
- Silicio Poli-cristalino
- Silicio Amorfo
- Otros materiales, como capas delgadas: Arseniuro de galio, di seleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio.

Actualmente, el material más utilizado es el silicio Mono cristalino que tiene prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin. Están basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7% para éste tipo de paneles siendo en los comercializados del 16%.

## 2.7.3 MODELO ELÉCTRICO DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA

El modelo eléctrico teórico para una celda fotovoltaica se representa mediante la llamada ecuación del diodo, expresada en la siguiente ecuación [68].

$$I = IL - I_0 (\exp (qV/ nkT) - 1) \quad (2.24)$$

Dónde:

$I$ : Corriente de salida [A]

$IL$ : Corriente foto generada [A]

$I_0$ : Corriente inversa de saturación [A]

$q$ : Carga electrón [C]

$V$ : Voltaje diodo [V]

$n$ : Factor de idealidad

$k$ : Constante Boltzmann [J/K]

$T$ : Temperatura de celda [K]

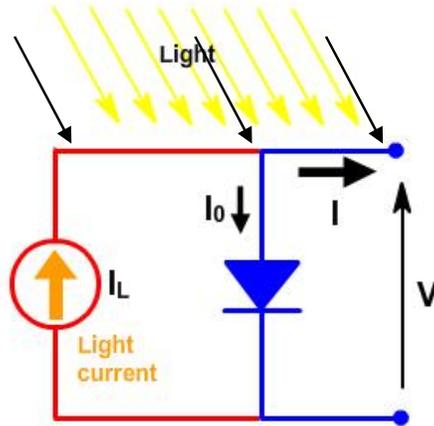


Figura 2.14 Modelo eléctrico de un Panel Fotovoltaico [68].

Con base a este modelo, se puede relacionar la potencia eléctrica ( $P = VI$ ) con la temperatura de celda mediante la corriente de salida del panel. Esto cuantifica numéricamente que a medida que la temperatura de la celda sea mayor, la potencia eléctrica de salida será menor.

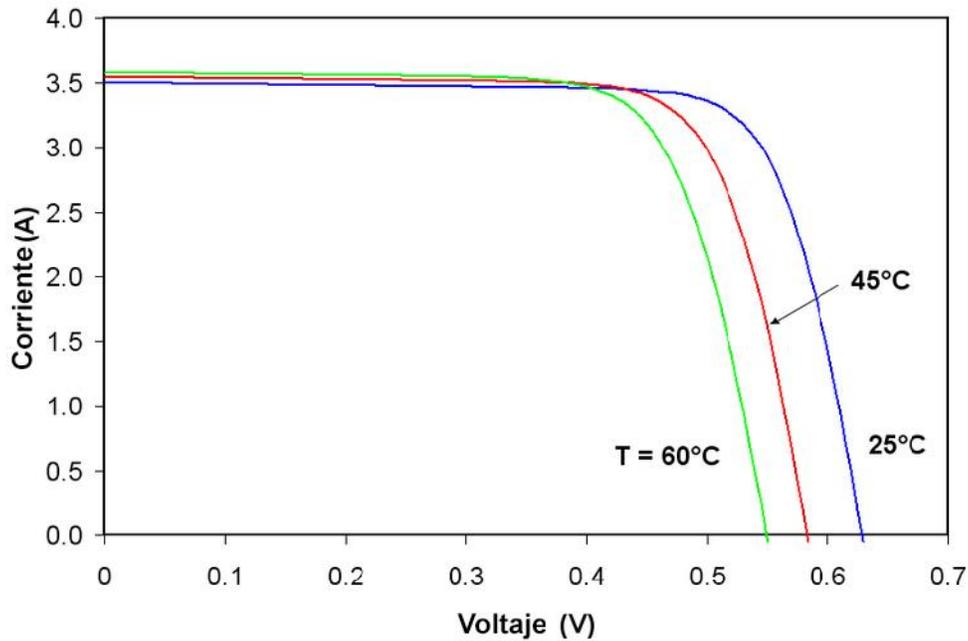


Figura 2.15 Curva V-I Característica de un panel fotovoltaico y el efecto de la temperatura [68].

---

## 2.7.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

Los paneles fotovoltaicos presentes en el mercado deben cumplir ciertas normativas (dependiendo del territorio en el que estén) pero un elemento que traen todos sin excepción es una caracterización particular es (J.V), de los datos más importantes a la hora de considerar adquirir uno.

- **Potencia máxima  $P_{mp}$**

Es un punto de trabajo en que la potencia entregada por el panel fotovoltaico a la carga externa, es máxima.

- **Dimensiones**

Largo, alto, ancho del panel completo, así como las dimensiones de las celdas Fotovoltaicas.

- **Tipo**

Celdas de silicio Mono cristalino, poli cristalino, etc.

- **Características térmicas**

Coeficientes térmicos ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) que cuantifican cuanto varían el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) y la potencia máxima ( $P_{mp}$ ) en función de la temperatura de la celda. Cada panel fotovoltaico cuenta con sus propios parámetros térmicos, y han sido definidos para poder caracterizar su funcionamiento y respuesta (tal como aparece en la Figura 2.13). Su definición es la siguiente [69]

$$\alpha = \partial I_{sc} / \partial T \quad (2.25)$$

$$\beta = \partial V_{oc} / \partial T \quad (2.26)$$

$$\gamma = \partial P_{mpp} / \partial T \quad (2.27)$$

La relación entre la temperatura de la celda fotovoltaica y la potencia de salida está dada por la ecuación:

$$P = P_{mpp} (1 + \gamma / 100 (T_{celda} - 25)) \quad (2.28)$$

---

*T<sub>celda</sub>*: Temperatura de la celda [ $^{\circ}C$ ]

$\gamma$ : Coeficiente térmico de potencia [ $\%/^{\circ}C$ ]

Que indica que mientras más baja sea la temperatura de la celda (mientras más cercana sea a los 25  $^{\circ}C$ ) mayor será la potencia nominal de salida. Esto se puede llevar a términos de la eficiencia de conversión del panel fotovoltaico, que es finalmente hacia donde apunta este estudio. La eficiencia eléctrica de un panel fotovoltaico tiene relación con la fracción de potencia eléctrica generada versus la cantidad de energía solar incidente sobre su superficie.

$$\eta_{el} = P / GA \quad (2.29)$$

*A*: Área superficial del panel [ $m^2$ ]

*G*: Radiación solar incidente [ $W/m^2$ ]

*P*: Potencia eléctrica generada [ $W$ ]

## **2.8 Generalidades del Software ANSYS.**

### **2.8.1 Antecedentes Software ANSYS**

ANSYS es un software de propósito general, que se utiliza para simular las interacciones de todas las disciplinas de la física, estructural, la vibración, la dinámica de fluidos, transferencia de calor y electromagnéticos para los ingenieros, [70].

Así ANSYS, que permite simular pruebas o las condiciones de trabajo, permite probar en el entorno virtual antes de prototipos de productos de fabricación. Por otra parte, la determinación y la mejora de los puntos débiles, vida informática y previendo problemas probables son posibles mediante simulaciones 3D en el entorno virtual, [70].

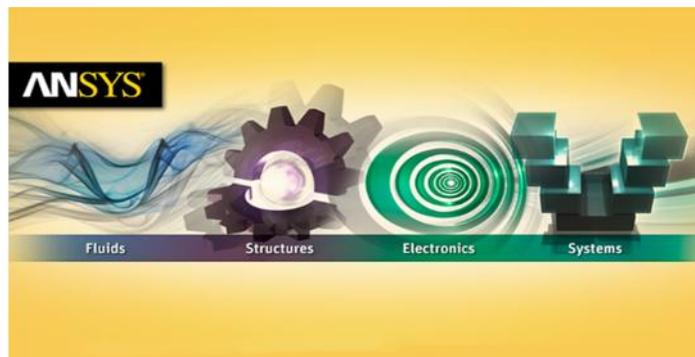


Figura 2.16 ANSYS

Software de ANSYS con su estructura modular, como se ve en la tabla a continuación ofrece una oportunidad para tomar sólo las funciones necesarias. ANSYS puede funcionar integrado con otro software de ingeniería utilizados en el escritorio mediante la adición de módulos de conexión de CAD y FEA, [70].

ANSYS puede importar datos CAD y también permite construir una geometría con sus habilidades "pre-procesamiento". Del mismo modo en el mismo preprocesador, se genera modelo de elementos finitos (malla alias) que se requiere para la computación. [70].

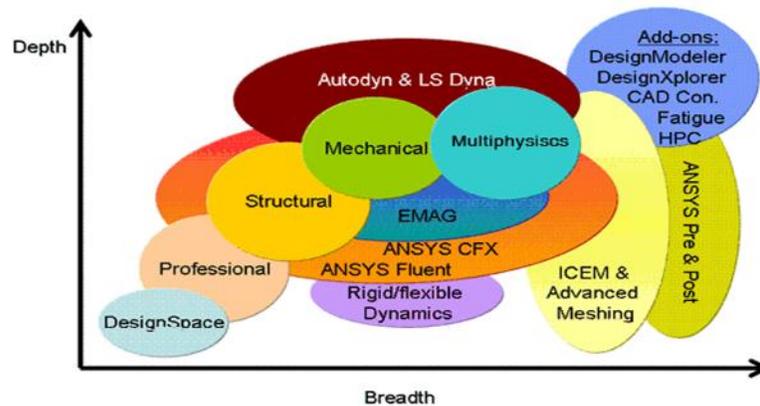


Figura 2.17 ANSYS Áreas [70].

ANSYS puede llevar a cabo la ingeniería avanzada analiza de forma rápida, segura y prácticamente por su variedad de algoritmos de contacto, características de carga a base de tiempo y modelos de material no lineal.

ANSYS Workbench es una plataforma que integra las tecnologías de simulación y sistemas CAD paramétricos con la automatización y rendimiento único. El poder de

---

ANSYS Workbench viene de diferentes algoritmos para resolver, solucionador de ANSYS con años de experiencia. Además, el objeto de ANSYS Workbench es la verificación y la mejora del producto en el ambiente virtual. [70].

ANSYS Workbench, que está escrito para la compatibilidad de alto nivel con todo PC, es más de una interfaz y cualquier persona que tenga una licencia de ANSYS puede trabajar con ANSYS Workbench, [70].

### **2.8.2 PERSPECTIVA TEÓRICA**

Para representar un fenómeno físico de interés se requiere de un modelo matemático, el cual puede ser simple o complejo dependiendo del fenómeno bajo estudio. En general, para representar la dinámica de fluidos, transferencia de calor se usan las ecuaciones de continuidad, momentum, energía. Todas estas ecuaciones cumplen con un principio de conservación y por lo tanto pueden ser expresadas en forma conservativa. Entonces es viable que cada una de estas ecuaciones y sus variantes puedan ser representadas a través de la ecuación general de convección-difusión para su solución.

### **2.8.3 ECUACIONES GOBERNANTES**

Para predecir el comportamiento hidrodinámico, térmico, etc., en un sistema bajo estudio es necesario un modelo matemático que represente el comportamiento del fenómeno, este consiste en la formulación de las ecuaciones gobernantes generales. La formulación de las ecuaciones gobernantes es muy importante conceptualmente, porque se adoptan hipótesis que posteriormente se consideran si son admisibles o no para la representación de un fenómeno en particular. Las ecuaciones de conservación de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa se basan en la formulación Euleriana, en la cual se supone un volumen de control fijo en el espacio a través del cual pasa un fluido, se supone que el medio es continuo y se aplican los principios de conservación de masa, momentum, energía para obtener las ecuaciones de conservación (Bird et al., 1962, [71].; Malvern, 1969, [72]. ; White, 1986, [73]. ; Aris, 1989 , [74]). Así, las ecuaciones gobernantes de flujo de fluidos representan principios matemáticos de las leyes de conservación de la física, estas son:

- 
- La masa de un fluido se conserva (ley de conservación de masa).
  - La razón de cambio de momentum corresponde a la suma de las fuerzas sobre una partícula del fluido (segunda ley de Newton).
  - La razón de cambio de energía es igual a la suma de la razón de calor adicional y la razón de trabajo realizado sobre una partícula del fluido (primera ley de la termodinámica).

La mecánica de fluidos, la transferencia de calor y de masa son fenómenos gobernados por las leyes físicas expresadas en forma matemática, generalmente en términos de ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones representan un principio de conservación. Cada ecuación emplea una cierta cantidad física como su variable dependiente e implica que debe haber un balance entre los diversos factores que influyen en la variable. Las variables dependientes de estas ecuaciones diferenciales son usualmente la velocidad, presión, temperatura y concentración de masa.

#### 2.8.4 ECUACIÓN DE MASA

La ecuación de conservación de masa se deriva de aplicar la ley de conservación de masa. Este principio se expresa como: el flujo neto másico de salida del volumen de control (VC) debe ser igual al incremento temporal de la masa interior. La ecuación resultante es conocida como la ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad, la ecuación es representada en forma tensorial:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.30)$$

Para  $i = x, y, z$

El primer término del lado izquierdo de la Ec. (2.30) representa la variación de la densidad en el tiempo y el segundo término describe el flujo neto de masa saliendo del VC a través de sus fronteras.

#### 2.8.5 ECUACIÓN DE MOMENTUM

La ecuación de momentum es la representación matemática de la segunda ley de Newton, la cual establece que un pequeño elemento de volumen que se mueve con el

fluido es acelerado por las fuerzas que actúan sobre él, es decir, *masa \* aceleración = suma de fuerzas*.

En otras palabras, la segunda ley de Newton establece que el incremento temporal del momento lineal en el VC (variación temporal de la cantidad de momento lineal) más el flujo neto de momento lineal de salida del VC (el momento lineal es producto de la masa por la velocidad) debe ser igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre el VC (las fuerzas que actúan sobre el VC son de dos tipos: las fuerzas másicas o de cuerpo y las fuerzas superficiales. Las fuerzas másicas actúan directamente sobre la masa volumétrica del VC, entre ellas la fuerza de la gravedad, centrífuga, coriolis, eléctrica y magnética. Las fuerzas superficiales actúan directamente sobre la superficie del VC del fluido, como son la presión ejercida sobre la superficie impuesta por el fluido exterior al VC y las fuerzas causadas por las tensiones viscosas (normales y tangenciales) actuando sobre la superficie del VC también causado por el fluido exterior al VC por contacto directo). Este balance producirá tres ecuaciones diferenciales parciales, una para cada dirección del sistema coordenada (x, y, z). La forma general de las ecuaciones de conservación de momentum puede ser escrita en forma tensorial como:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} + \frac{\partial(\tau_j)}{\partial x_j} + F_i \quad (2.31)$$

Para cada  $i=x, y, z$  y toda  $j=x, y, z$

El primer término de la Ec. (2.31) representa la velocidad de cambio de movimiento, el segundo término es el incremento de movimiento por convección, el tercer término representa las fuerzas de presión que actúan sobre el volumen de control, el cuarto término es la ganancia de movimiento por transporte viscoso y el último término representa la fuerza de gravedad, centrífuga etc., que actúa sobre el elemento de volumen de control.

### 2.8.6 ECUACIÓN DE ENERGÍA

La ecuación de energía es derivada de la primera ley de la termodinámica, la cual establece que la cantidad de cambio de energía de una partícula es igual a la cantidad de calor adicionado al elemento más la cantidad de trabajo realizado sobre la

partícula. En otras palabras, se expresa que el flujo neto de salida de energía, la interna más la energía cinética (flujo másico multiplicado por la energía por unidad de masa), más el incremento temporal de la energía interna más la energía cinética al interior del VC (variación en el tiempo de la energía del VC), debe ser igual al trabajo realizado sobre el VC, tanto por fuerzas volumétricas como superficiales (el conjunto de las fuerzas másicas son englobadas en una fuerza por unidad de tiempo calculada como el producto de la fuerza por la velocidad en la dirección de la fuerza). Las fuerzas superficiales, al igual que en la ecuación de cantidad de momentum, son las fuerzas viscosas y la presión, más el flujo neto de calor entrante al VC (transferencia de calor a través de las caras del VC debido a los gradientes de temperatura), más la energía neta aportada o retirada al VC (este término es debido a la absorción o emisión de calor y es representado como  $S_E$ ). La energía del fluido se define como la suma de la energía interna ( $e_{int}$ ), la energía cinética ( $(e_c = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2))$ ) y la energía potencial gravitacional. La energía potencial será incluida en la fuerza gravitacional como una fuerza de cuerpo. Entonces, la ecuación para la energía específica  $E = e_{int} + e_c$  del fluido se puede escribir como:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\tau_j u] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\tau_j v] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\tau_j w] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + S_E + \sum_{i=1}^3 F_i u_i \quad (2.32)$$

## 2.9 Estructura de un Código CFD.

Todos los códigos CFD contienen tres elementos principales: un Pre-Procesador, un Solucionador y un Post-Procesador, [75].

### 2.9.1 El Pre-Procesador.

Consiste la entrada de un problema de flujo al programa CFD por medio de una interface amigable y la transformación subsecuente de esta entrada en una forma capaz de ser interpretada por el solucionador. Las actividades a realizar en el trabajo son las siguientes:

- ) Definición de la geometría de la región de interés (dominio computacional).
- ) Generación de la malla (subdivisión del dominio en volúmenes de control finitos es decir en celdas).

- 
- ) Selección de los fenómenos físicos y químicos que necesitan ser modelados.
  - ) Definición de las propiedades del fluido.
  - ) Especificación de las condiciones de fronteras apropiadas en las celdas.

La solución para un problema (velocidad, presión, temperatura, flujo de calor, etc.) se obtiene para nodos dentro de cada celda.

### **2.9.2 El Solucionador**

En relación al solucionador, existen varias técnicas de solución numéricas: Diferencias finitas, elementos finitos, métodos espectrales volúmenes finitos. En líneas generales los métodos numéricos conforman la base del solucionador y desarrollan los siguientes pasos.

- ) Aproximación de las variables desconocidas por medio de funciones simples.
- ) Discretización por sustitución de las aproximaciones en las ecuaciones gobernantes y subsecuentes manipulaciones matemáticas.
- ) Solución de las ecuaciones algebraicas.

Las principales diferencias entre las técnicas de solución numérica están asociadas con la manera en la cual se aproximan las variables y con los procesos de discretización.

### **2.9.3 Solución de problemas con CFD**

Antes de introducir los datos y ejecutar una simulación en un código CFD, hay una etapa de identificación y formulación del problema en términos de los fenómenos físicos y químicos que se van a considerar. Algunas decisiones típicas podrían ser necesarias son, por ejemplo: decidir si se va modelar en dos o tres dimensiones, despreciar los efectos de la temperatura o las variaciones de presión sobre la densidad de un flujo de agua, definir si el problema a resolver implica un flujo laminar o turbulento y seleccionar los modelos correspondientes. Para tomar las decisiones correctas se requieren buenos conocimientos de modelado, ya que hasta en los problemas más simples es necesario hacer suposiciones para llevar el problema a un nivel de complejidad manejable.

---

#### **2.9.4 El Post-Procesador**

Los paquetes comerciales CFD en la actualidad están equipados con herramientas de visualización de resultados muy versátiles, que incluyen la visualización de la geometría del dominio y de la malla, generación de gráficos de vectores, contornos, líneas, gráficos 2D y 3D, seguimiento de partículas, manipulación de vistas (traslación, rotación, etc.) también opciones de colores y recientemente incluyen animaciones para resultados dinámicos. Adicional a los gráficos, todos los códigos producen archivos alfanuméricos con los resultados que permiten exportar y procesarlos externamente.

#### **CONCLUSION DEL CAPITULO 2.**

En este capítulo se concluye que México, es un país rico en fuentes renovables y sustentables de energía. Por lo cual es muy buen candidato para la explotación de todas estas energías y propongo que se dé mayor empleo a la energía solar, además “ANSYS CFD” es la herramienta de ANSYS utilizada en el pre proceso y el post proceso de simulaciones de este trabajo.

---

---

## **CAPÍTULO 3**

# **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

---

En este capítulo se describen, los componentes principales del desarrollo experimental del Sistema Híbrido Solar-Térmico Avanzado. Así, como sus características, preparación y arranque del Sistema Solar Híbrido.

---

### 3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HÍBRIDO SOLAR, TÉRMICO-FOTOVOLTAICO AVANZADO.

La Figura 3.0 muestra el diagrama esquemático del sistema híbrido solar-térmico avanzado. Estos equipos se encuentran ubicados en el Campus Universitario de la UAEM (Universidad Autónoma del Estado de Morelos) dentro de las instalaciones del CIICAp (Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas) en el laboratorio de ingeniería y térmica aplicada 2 (LITA 2).



Fig. 3.0 Diagrama Esquemático del Sistema Híbrido Solar, Térmico-Fotovoltaico Avanzado, ubicado en LITA2-CIICAp.

La Figura 3.1 muestra la fotografía satelital de la ubicación de Conagua (Comisión Nacional del Agua) ubicada en la colonia Vista Hermosa y calle Sonora donde

nos proporcionaron los siguiente datos (Radiación Solar, temperatura ambiente, humedad, precipitación, velocidad del viento) provenientes de la Estación Meteorológica Nacional. Se encuentra a una distancia de 4.5 km del CIICAp, a una altura de 1618 msnm y se escogió Conagua por estar más cerca al centro de investigación.



Figura 3.1 Fotografía satelital de ubicación de CONAGUA-CIICAp

El sistema híbrido solar-térmico avanzado de calentamiento de agua y extracción de calor de las celdas consta de un intercambiador de calor acoplado a 12 celdas fotovoltaicas conectadas en serie y al terminar se conectan en paralelo con la salida de cables PLA IP67 tanto al principio como al final del arreglo, el intercambiador es de aluminio el cual consta de las siguientes mediciones, largo 177 cm. y ancho 15.24 cm. El porta celdas mide 13.9 cm de ancho y 164 cm de largo. Tiene una tubería de cobre de media, interconectada entre el intercambiador y tanque de almacenamiento, las celdas son de tipo Mono cristalinas importadas de China con las siguientes características: Potencia Media (W): 2.7 Wp Promedio; Corriente (Amperios): 5.4 I<sub>max</sub>; Tensión Media (Voltios): 0.5 V<sub>max</sub>; Eficiencia hasta 16.64%, Medida de las Celdas, 125 mm x 125 mm cada células Solar. Cumpliendo con la norma internacional IEC 61215(Irradiación1000 W/m<sup>2</sup>,

---

temperatura 25 °C, AM = 1.5) el tanque tiene una capacidad de 100 litros, el intercambiador tiene una tapa de vidrio templado transparente de 4 mm de espesor para mayor captación de radiación así como su resistencia a las inclemencias del clima. El agua circula por medio de una bomba 1/3 HP en la (Fig. 3.2) que se extrae del tanque de almacenamiento pasando al intercambiador de calor en el cual su función es extraer el máximo calor que las celdas tienen en ese momento debido a la radiación que llega a ellas y después a un rotámetro (Fig. 3.3) marca Cole Parmer de escala graduada de 5 a 65 mm con resolución de 1 mm y una exactitud de  $\pm 2\%$  a escala completa. Constituidos con una carátula de policarbonato, válvula de ajuste fino y flotador de acero inoxidable 316. La presión máxima de trabajo es de 200 psi con un intervalo de temperatura de trabajo de -26 a 121 °C y un intervalo de flujo volumétrico de trabajo para agua de 7 a 150 ml/min. Antes que entre al depósito para darle destino final y que las celdas bajen su temperatura lo más cercano a la temperatura ambiente de fabricación que son 25 °C.



Figura 3.2 Bomba Grundfos 1/3 HP



Fig. 3.3 Flujometro marca Cole Parmer

---

El sistema consta de 4 sensores de temperatura (Termopares tipo T), ubicados de la siguiente manera, el primero se encuentra en la salida del Tanque de Almacenamiento (agua fría), el segundo en la entrada del intercambiador (agua fría), el tercero en la salida del al tanque agua (caliente) y el cuarto en la entrada del tanque (agua caliente) para darle destino final. De estos cuatro termopares nada más utilizamos los datos (3 y 4) que es lo que nos interesaron; Los termopares se emplean generalmente para medir temperaturas entre  $-200$  y  $400^{\circ}\text{C}$ , tienen una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C} - 1^{\circ}\text{C}$ , son útiles en ambientes tanto reductores como oxidantes y también son resistentes a la corrosión en atmósferas húmedas. Estos termopares se encuentran instalados en termo pozos, que se muestran en la Figura 3.4 (A) y los Termo pozos Figura 3.4 (B) la fabricación fue con conectores de marca Parker, modelo FBZ 44 de material de acero inoxidable 316 y un tubing soldado de 6.3 mm (1/4 pulgada) de diámetro externo y 30.0 mm de largo. Un extremo del tubing está conectado al conector y el otro extremo, está sellado con soldadura para evitar cualquier paso de algún fluido, garantizando el uso en el circuito principal para mantener las condiciones de presión absoluta en cada prueba experimental.



(A)



(B)

Figura 3.4 (A) Termopares tipo "T", (B) Termo pozo

---

### 3.2 CALIBRACIÓN DE TERMOPARES TIPO “T”.

Los termopares tipo “T” se calibraron formando un lazo de temperatura por medio del Adquisidor de datos MARCA COLE PARMER. El método de calibración aplicado fue por comparación entre el lazo de temperatura y un estándar de calibración. En la calibración se determinó el error entre cada lazo de temperatura y el estándar de calibración a 15, 30, 45, 60, 75, 90, 100 y 110°C.

Para la calibración de los termopares se utilizó un baño termostático marca Cole-Parmer con rango de operación de  $-45^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$  con una estabilidad de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , y una precisión de  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 3.5). Cada lazo de temperatura se comparó con el estándar de calibración a las temperaturas antes indicadas cuando no había variación en estas y durante un lapso de 5 minutos. La ecuación de la correlación se calculó con los promedios de cada punto de calibración y la temperatura del estándar respectivamente, para cada termopar. La pendiente y la ordenada al origen de la ecuación de la recta obtenida para cada termopar se encuentran reportadas en el Apéndice D.



Figura 3.5 Baño Termostático

---

Posteriormente, los lazos de temperatura se verificaron en el baño térmico en los puntos de temperatura donde se compararon inicialmente obteniendo un máximo de error de 0.05°C.

### **3.3 MEDICIÓN DEL FLUJO**

El flujo másico del fluido de trabajo del transformador de calor se midió con un flujómetro (figura 3.3) de escala graduada de 5 a 65 mm con resolución de 1 mm y una exactitud de  $\pm 2\%$  a escala completa. Constituidos con una carátula de policarbonato, válvula de ajuste fino y flotador de acero inoxidable 316. La presión máxima de trabajo es de 200 psi con un intervalo de temperatura de trabajo de -26 a 121 °C y un intervalo de flujo volumétrico de trabajo para agua de 7 a 150 ml/min.

### **3.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

Para el sistema de adquisición de datos se usó interpretación de las señales de mV de cada termopar (casi en línea) se utilizó un adquisidor de datos, marca Agilent Technologies modelo 34970 (ver Figura 3.5) con una alimentación de 127 volts a 60 Hz. El adquisidor de datos está constituido por un panel frontal para configurar y, posee tres ranuras en la parte posterior para captar señales electrónicas mediante tarjetas multiplexoras. Se utilizaron dos tarjetas multiplexoras modelo 34901A de la misma marca. Se utilizó un software HP Benchlink Data Logger versión 1.4 para visualizar y almacenar los valores de presión y temperatura, Fig. 3.6



Figura 3.6 Sistema de Adquisición de datos Agilent

### **3.3 PROCEDIMIENTOS PARA OPERACIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO SOLAR AVANZADO.**

Para la operación del equipo es necesario el conocimiento previo de la localización e identificación de los dispositivos del equipo y sus componentes, de tener una configuración en la computadora que facilite la labor del operador (como conocer ubicación de las temperaturas entradas y salidas de la solución en los intercambiadores), y utilizar una bitácora donde se apunte lo acontecido.

### **3.4 PREPARACIÓN DEL EQUIPO.**

Antes de realizar pruebas en el equipo experimental es necesario realizar los siguientes procedimientos:

1. Revisar que el depósito de agua de la torre de enfriamiento esté limpio, en caso contrario se debe realizar mantenimiento (drenar, lavar y llenar nuevamente).
2. Verificar que el nivel de almacenamiento de agua del sistema híbrido solar de calentamiento esté en su máximo nivel y tengan la temperatura deseada para poder correr la prueba.

- 
3. El depósito deberá llenarse entre el 70% y el 80% de su capacidad, (la bomba puede trabajar a diferentes niveles de temperatura sin problemas). Es necesario realizar el mantenimiento periódico (drenar, lavar y nuevamente llenar).

### **3.5 ARRANQUE DEL EQUIPO**

Para la realización de las pruebas experimentales es necesario llevar a cabo los siguientes procedimientos tales como prestar atención a todos los cambios que ocurren en el equipo durante la prueba:

1. Realizar inspección de los equipos para verificar que la prueba pueda realizarse de manera adecuada.
2. Activar la pastilla de centro de carga del equipo, encender la computadora y el adquisidor de datos.
3. Por medio del programa de monitoreo del adquisidor de datos, verificar constantemente las temperaturas del equipo.

### **CONCLUSIONES DEL CAPITULO 3**

En este capítulo se concluye, que se contó con el equipo apropiado y funcionando en perfectas condiciones por lo cual obtuvimos buenos resultados durante nuestro proyecto.

---

---

# **CAPÍTULO 4**

## **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

---

Resultados experimentales del Sistema Híbrido Solar, Térmico-Fotovoltaico Avanzado. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del sistema híbrido solar en el cual se analiza el comportamiento del sistema híbrido a diferentes condiciones ambientales, así como su eficiencia.

---

Para desarrollar este trabajo de investigación se realizaron las siguientes actividades:

- ) Primero, se instaló el **SSTA** y el tanque de almacenamiento de agua del Sistema Solar se ubicaron dentro del Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada 2 (LITA 2) que se localiza en el Centro de investigaciones en ingeniería y ciencias aplicadas (CIICAP) de la UAEM ubicado en Cuernavaca, Morelos.
- ) Dos, se quitó la tapa de vidrio normal, las celdas que tenían, se lijo manualmente así como también con la fresadora para que estuviera al mismo nivel toda la parte del porta celdas del intercambiador de calor.
- ) Tres, se pusieron nuevas celdas traídas de China.
- ) Cuatro, la tapa que se le puso es de vidrio templado, para mejorar la captación solar además de ser cinco veces más fuertes que el vidrio normal, es resistente al calor y se rompe en piezas pequeñas cuando se quiebra debido a su alta resistencia a la rotura y al calor, tiene una densidad de  $2.5 \text{ g/cm}^3$ , resiste una diferencial de temperatura de  $250^\circ$ .
- ) Cinco, se instalaron cuatro termopares tipo T previamente calibrados para monitorear las temperaturas internas (agua) del intercambiador de calor con respecto a las celdas integradas en la parte superior del mismo.

Para realizar las pruebas fue necesario que la distancia del tanque de abastecimiento de agua y del sistema híbrido (intercambiador de calor acoplado a las celdas fotovoltaicas) no debe ser mayor a 15 metros como lo menciona el Anteproyecto de Norma NMX, titulado "Métodos de prueba para determinar la Eficiencia Térmica de Sistemas de Calentamiento Solar de Agua para Uso Doméstico; Sistema de Circulación Forzada", reporte IM-T-P 23-01-2002.

#### 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL INTERCAMBIADOR DE ALUMINIO EN INVIERNO.

La Figura 4.1 Muestra el comportamiento del Intercambiador de Calor de Aluminio sin Celdas fotovoltaicas y sin circular agua. Como es buen conductor térmico, se comprobó en esta gráfica de acuerdo a los datos obtenidos que la temperatura con respecto al tiempo durante un día en invierno inicia con 29°C a las 10:00 a.m., se aprecia que a medida que transcurren las horas la temperatura aumentó 28°C alcanzando un valor máximo de 57 °C aproximadamente a las 15:07 h.

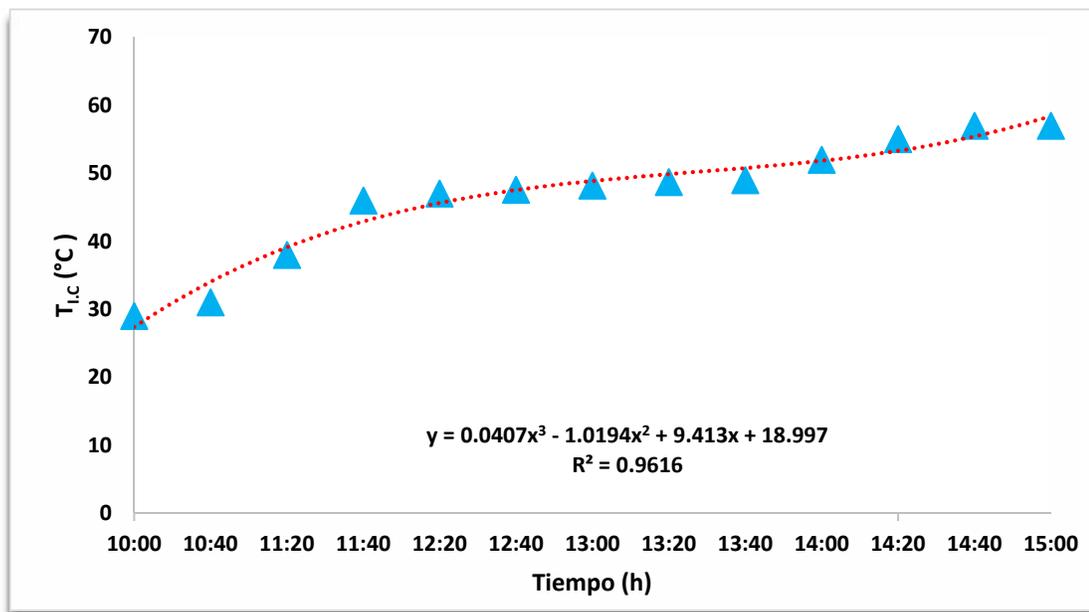


Fig.4.1 Temperatura del intercambiador de calor en invierno (Enero/2016).

## 4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL INTERCAMBIADOR DE ALUMINIO EN PRIMAVERA

La Figura 4.2 Muestra el comportamiento del Intercambiador de Calor de Aluminio sin Celdas fotovoltaicas y sin circular agua. Como es buen conductor térmico, se comprobó en esta gráfica de acuerdo a los datos obtenidos que la temperatura con respecto al tiempo durante un día en primavera inicia con 31°C a las 10:00 a.m., se aprecia que a medida que transcurren las horas la temperatura aumentó 36.9°C alcanzando un valor máximo de 67.9 °C aproximadamente a las 15:07 pm.

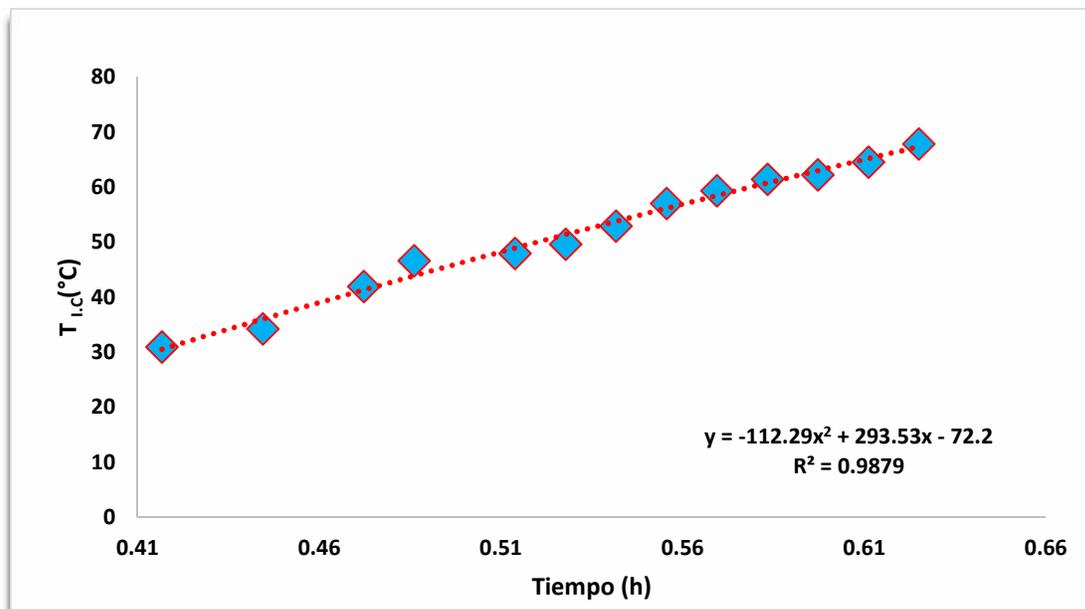


Fig. 4.2 Temperatura del intercambiador de calor en primavera (Abril/2016).

**Conclusión de los gráficos, 4.1 y 4.2** Se midieron, las temperaturas en Enero y Abril del (2016), con lo que se concluye que la medición que se hizo en invierno en un día específico del mes de enero, la temperatura ambiente no paso de los 28 °C y el I.C que es de aluminio logro llegar a tener una temperatura de 57 °C. Para la medición que se realizó en el mes de Abril el I.C, llego a obtener 67.9 °C. Por lo tanto se concluye que al acoplar el sistema haciendo un híbrido, esperamos obtener una buena cantidad térmica del agua que en invierno seria arriba de los 45 °C y en primavera más de 60 °C, tomando en cuenta las perdidas.

### 4.3 RESULTADO SIMULADO DEL INTERCAMBIADOR ACOPLADO SIN CIRCULAR AGUA.

La Figura 4.4 Muestra el Comportamiento de Simulación del Intercambiador de Calor con Celdas (Acoplado) pero sin circular agua. En el cual se ve que a medida que el tiempo transcurre y la radiación solar aumenta con el tiempo llega a una temperatura de 86.33 °C a las 15:45 pm., Nota: Esta Figura es un video como cambia de color según pase el tiempo.

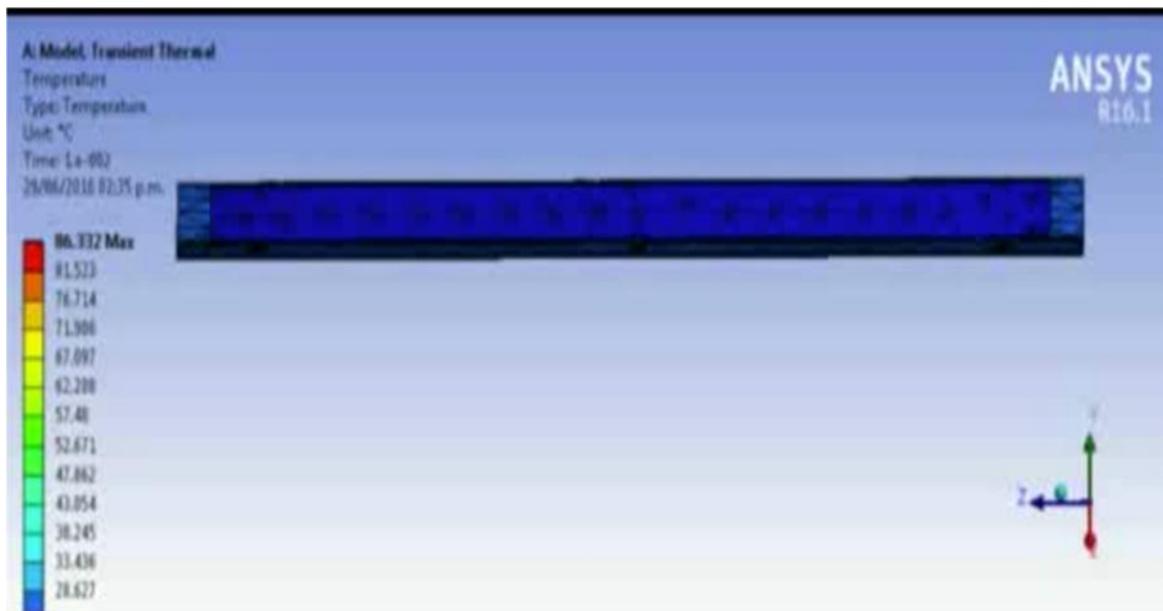


Fig. 4.3 Simulación de temperatura del intercambiador de calor con celdas (Junio/2016).

### 4.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL INTERCAMBIADOR ACOPLADO CON AGUA, EN ABRIL.

La Figura 4.4 Muestra el Comportamiento Experimental del Intercambiador de calor, en el cual se circula agua (Acoplado) en **Primavera, Abril/2017**. En ella se aprecia una prueba aproximadamente de casi 6 h, iniciando a las 10:00 h y terminando a las 16:13 h. Muestra que el agua tiene una temperatura de 30.5 °C inicialmente por encontrarse el sistema apagado. Al finalizar la prueba con el sistema encendido la Temperatura del agua llegó a 61.7 °C, las Celdas tuvieron una temperatura de 65.2 como máximo llegando a disminuir a 57.3 °C, obteniendo las siguientes Eficiencias; Térmica de 56.1%, Eléctrica

9.4% y del Sistema Híbrido de 65.5 %, calculadas utilizando la ecuación 2.29. Con un Coeficiente de Transferencia Global del Sistema Híbrido de  $5451 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  y una Radiación Solar de  $1037 \text{ W/m}^2$  Cabe mencionar que se obtuvieron tendencias de 2do, 3er y 4º. Orden. Estas temperaturas fueron obtenidas directamente de la adquisidor de datos.

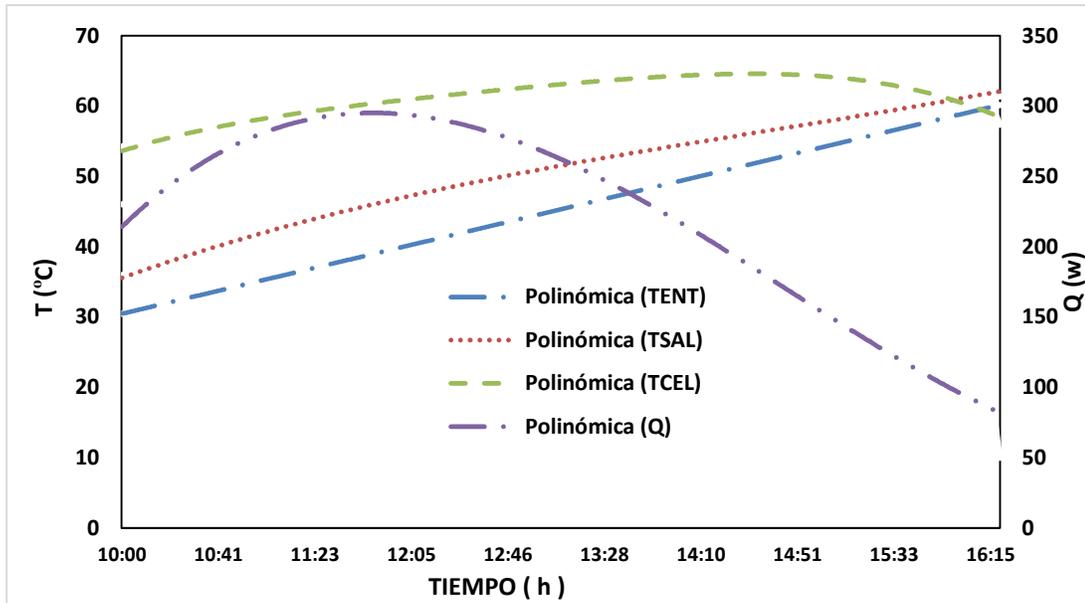


Fig. 4.4 Temperatura del Sistema Híbrido Solar – Térmico Avanzado (Abril/2017)

#### 4.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL INTERCAMBIADOR ACOPLADO CON AGUA, EN MAYO.

La Figura 4.5 Muestra el Comportamiento Experimental del Intercambiador de calor, en el cual se circula agua (Acoplado) en **Primavera, Mayo/2017**. En ella se aprecia una prueba aproximadamente de casi 6 h, iniciando a las 10:00 h y terminando a las 15:26 h. Muestra que el agua tiene una temperatura de  $37.80 \text{ }^\circ\text{C}$  inicialmente con el sistema apagado. Al finalizar la prueba con el sistema encendido se obtuvo que la Temperatura del agua llegó a  $71.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , las Celdas llegaron a  $79.09 \text{ }^\circ\text{C}$  como máximo, llegando a disminuir a  $65.83 \text{ }^\circ\text{C}$ . La Radiación Solar fue de  $1067 \text{ W/m}^2$ . El agua pudo absorber la mayor cantidad de calor de las celdas, ese día estuvo completamente soleado y sin interrupción de nubes. Se obtuvieron las siguientes Eficiencias; Térmica de 78%, Eléctrica 9.4% y del

Sistema Híbrido 87.4 %. Con un Coeficiente de Transferencia Global del Sistema Híbrido de  $5790 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Obteniendo ajustes de tendencias de 2do, 3er y 4º. Orden

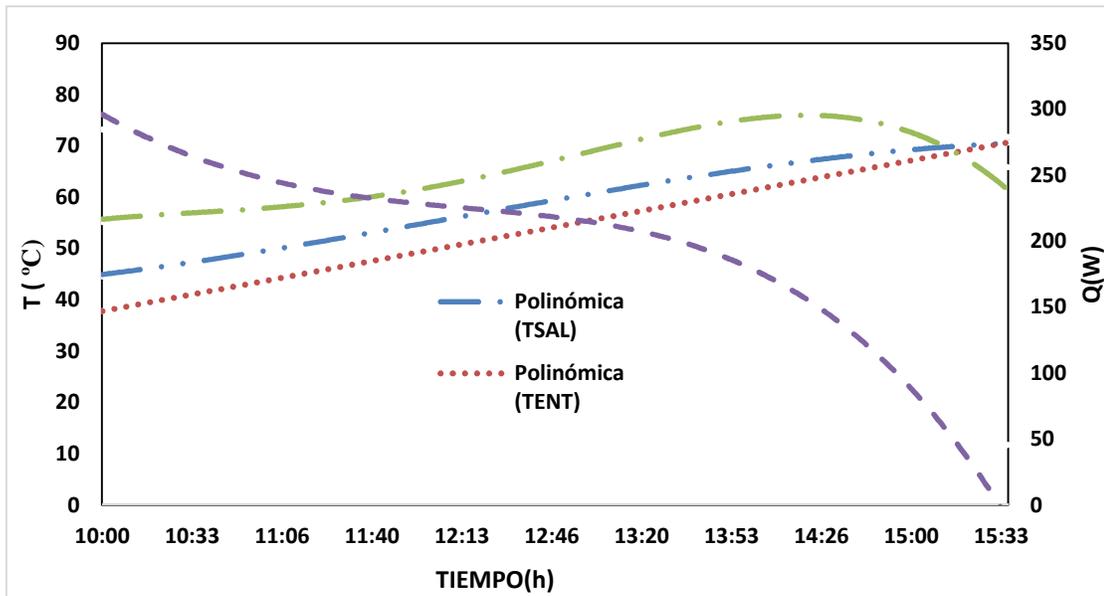


Fig. 4.5 Temperatura del Sistema Híbrido Solar – Térmico Avanzado (MAYO/2017).

#### 4.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL INTERCAMBIADOR ACOPLADO CON AGUA, EN NOVIEMBRE.

La Figura 4.6 Muestra el Comportamiento Experimental del Intercambiador de calor, en el cual circula agua (Acoplado) en Otoño, **Noviembre/2017** En ella se aprecia una prueba aproximadamente de más de 8 h, iniciando a las 10:00 h y terminando a las 18:25 h. con el sistema está apagado inicialmente, el agua tiene una temperatura de  $28.6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Al finalizar la prueba con el sistema encendido se obtuvieron los siguientes resultados la temperatura del agua llegó a  $53.69 \text{ }^\circ\text{C}$  y las Celdas obtuvieron como máximo  $55.69 \text{ }^\circ\text{C}$  llegando a disminuir a  $52.80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las Eficiencias; Térmica de 48.3%, Eléctrica 9.4% y del Sistema Híbrido 57.7 %. Con un Coeficiente de Transferencia Global del Sistema Híbrido de  $4345 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  y una Radiación Solar de  $992 \text{ W/m}^2$ . Obteniendo ajustes de tendencias de 2do, 3er y 4º Orden.

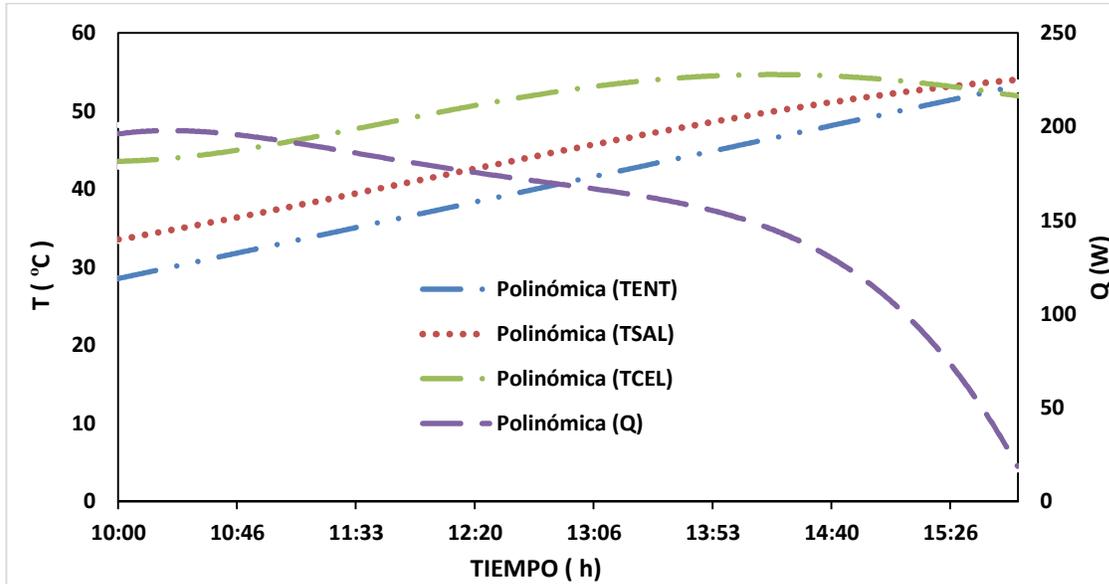


Fig. 4.6 Temperatura del Sistema Híbrido Solar – Térmico Avanzado (Noviembre/2017)

#### 4.7 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL INTERCAMBIADOR ACOPLADO CON AGUA, EL 29 DE ENERO.

La **Figura 4.7** Muestra el Comportamiento Experimental del Intercambiador de calor, en el cual circula agua (Acoplado) en **Invierno, 29 Enero/2018**. Se aprecia una prueba aproximadamente cercana a las 5 h, iniciando a las 10:00 h y terminando alrededor de las 14:44 h. Inicialmente el sistema está apagado, el agua tiene una temperatura de 27.8 °C. Al finalizar la prueba con el sistema encendido se obtuvieron los siguientes resultados la temperatura del agua llegó a 59.1 °C, las Celdas 62.7 °C como máximo, llegando a disminuir a 44.3 °C. Se obtuvieron las siguientes eficiencias; Térmica de 59.8%, Eléctrica 9.4% y del Sistema Híbrido 69.2 %. Con un Coeficiente de Transferencia Global del Sistema Híbrido de  $4897 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  y una Radiación Solar de  $814 \text{ W/m}^2$ . Obteniendo ajustes de tendencias de 2do, 3er y 4º orden.

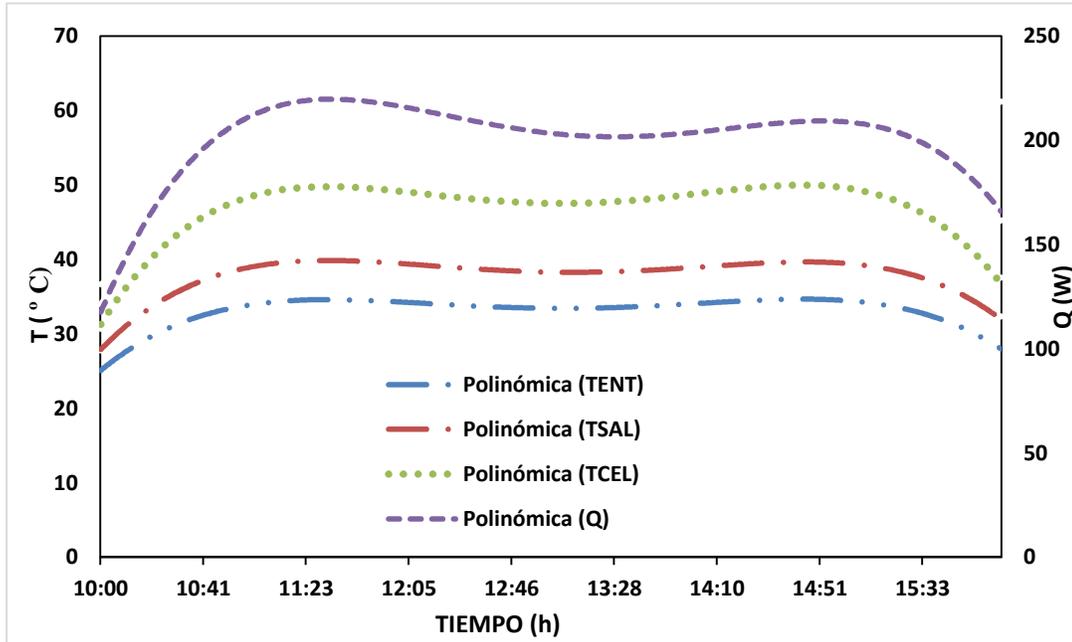


Fig. 4.7 Temperatura del Sistema Híbrido Solar – Térmico Avanzado (29 Enero/2018)

**Conclusión de las gráficas experimentales, ya mencionadas anteriormente.** Las gráficas se tomaron datos a partir de las 10:00 a.m. hasta las 16:00 p.m. en lo cual se activa el equipo y empieza a recircular el agua tomando en cuenta la salida del fluido del tanque a la entrada y salida del intercambiador de calor (I.C). Con lo cual se concluye que fue posible Simular y Caracterizar las temperaturas, flujo, rendimiento y valorar las condiciones del sistema de calentamiento solar. Se logró bajar la Temperatura de las Celdas así, como el Nivel térmico del Agua superior a los 70 °C, con una diferencia de 14 °C de disminución de la temperatura de las Celdas. La eficiencia térmica fue en el I.C hasta 78 % y sistema híbrido 87.4 % con una temperatura de 71.7°C como máxima. La temperatura de trabajo de las Celdas fue de 68°C con una potencia de trabajo de 26.83 W y Eficiencia eléctrica del 9.4% de acuerdo a la geometría del I.C. El equipo acoplado genero 284.3 W, con un coeficiente de transferencia global de 5790 W/ m<sup>2</sup> °C. **Podemos decir que somos los primeros en realizar un trabajo con este tipo de geometría para un sistema híbrido solar, térmico-fotovoltaico avanzado, por lo consiguiente, es original.**

---

#### 4.8 Resultados Simulados del Intercambiador Acoplado con Agua

Para poder llevar a cabo las simulaciones, es necesario definir las condiciones de fronteras o condiciones nominales de proceso, en base a estas se realizaron las siguientes simulaciones, si bien es claro que los sistemas que trabajan en base a energía solar presentan una cierta limitación, puesto que su fuente de energía es la radiación solar, la cual es una fuente de energía impredecible y aleatoria. He aquí la importancia y la razón de un punto de diseño, en otras palabras con estas condiciones se busca obtener resultados, donde se especifica una situación determinada, un recurso solar asociado, tipo de Intercambiador acoplado y unas condiciones ambientales para que garantice la demanda térmica del proceso para el que se requiere.

La Figura 4.8 Se presenta el parámetro más importante del punto de diseño de éste proyecto, para un día en condiciones normales del mes de **Abril/2017** en Cuernavaca, Morelos. Ya que presenta un promedio de radiación favorable de **(G=1037W/m<sup>2</sup>)**, Mostrando el Comportamiento Simulado del Intercambiador (Acoplado) en **Primavera**, una temperatura de 67.1 °C Comparándolo con los resultados experimentales que se obtuvo de 61.3 °C con una diferencia de temperatura entre los dos resultados de 5.8 °C.

---

Se muestra los resultados de la Temperatura 67.0 °C en la simulación realizada en ANSYS FLUENT.

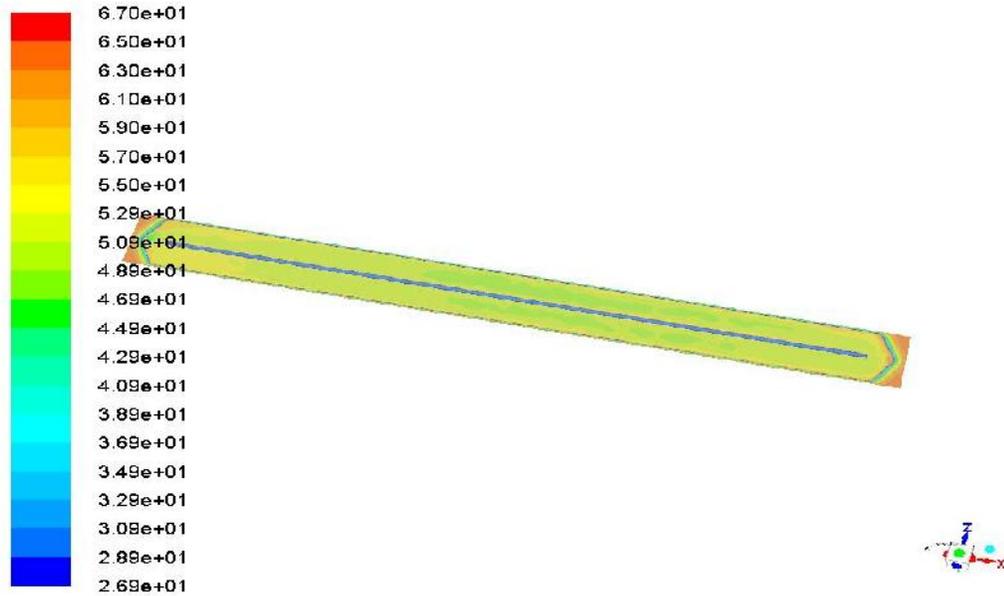


Fig. 4.8 Temperatura de Simulación (primavera, ABRIL/2017)

La Figura 4.9 Se presenta el parámetro más importante del punto de diseño de éste proyecto, para un día en condiciones normales del mes de **Mayo/2017** en Cuernavaca, Morelos. Ya que presenta un promedio de radiación alto por ser el mes de mayor incidencia solar de ( $G=1067 \text{ W/m}^2$ ), Mostrando el Comportamiento Simulado del Intercambiador (Acoplado) en **Primavera**, una temperatura de 79.1 °C Comparándolo con los resultados experimentales que se obtuvo de 71.7 °C con una diferencia de temperatura entre los dos resultados de 7.4 °C. Obteniendo un error porcentual del 9.3%

---

Se muestra los resultados de la Temperatura 79.1 °C en la simulación realizada en ANSYS FLUENT.

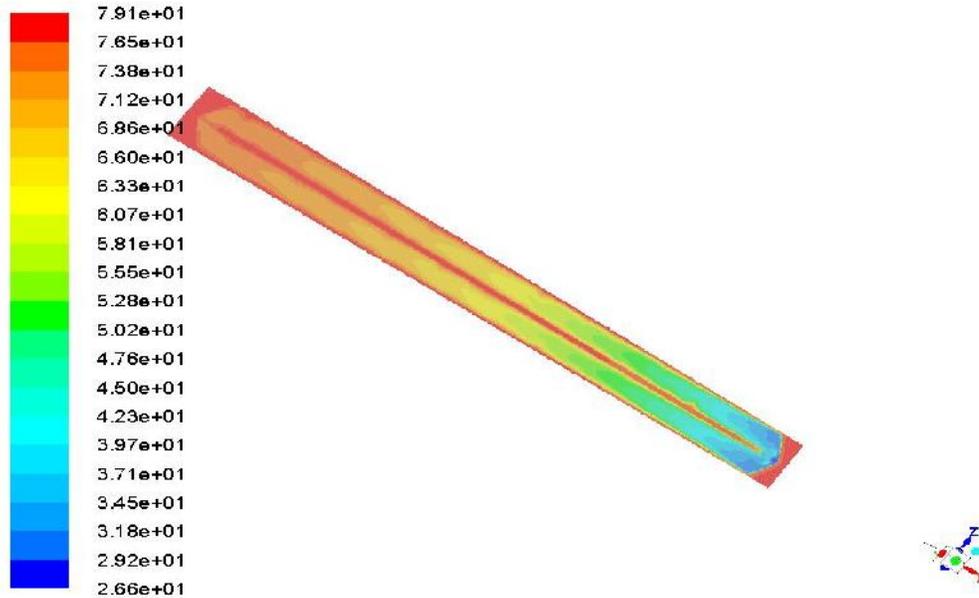


Fig. 4.9 Temperatura de Simulación (primavera, Mayo/2017)

La Figura 4.10 Se presenta el parámetro más importante del punto de diseño de éste proyecto, para un día en condiciones normales del mes de **Noviembre/2017** en Cuernavaca, Morelos. Es el mes que pertenece a la tercera estación del año, Otoño; su incidencia solar fue de **(G=992 W/m<sup>2</sup>)**, Mostrando el Comportamiento Simulado del Intercambiador (Acoplado) con una temperatura de 57 °C Comparándolo con los resultados experimentales que se obtuvo de 53.69 °C con una diferencia de temperatura entre los dos resultados de 3.31 °C.

---

Se muestra los resultados de la Temperatura en 57 °C en la simulación realizada en ANSYS FLUENT.

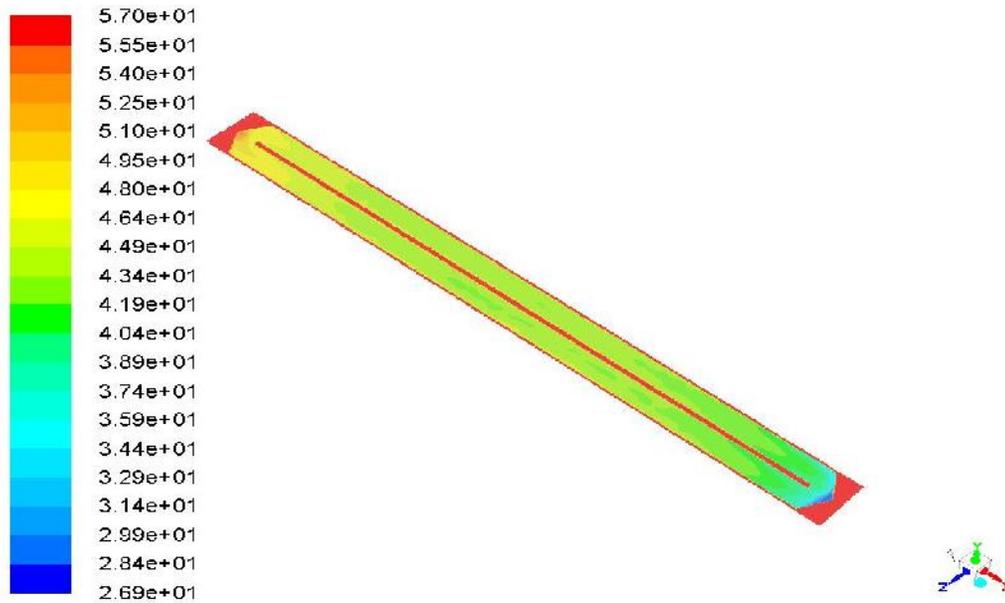


Fig. 4.10 Temperatura de Simulación (otoño, Noviembre/2017)

La Figura 4.11 Se presenta el parámetro más importante del punto de diseño de éste proyecto, para un día en condiciones normales del mes de **Enero/2017** en Cuernavaca, Morelos. Varía mucho este mes entre un día y otro, su incidencia solar fue de ( $G=814 \text{ W/m}^2$ ), Mostrando el Comportamiento Simulado del Intercambiador (Acoplado) con una temperatura de 62.3 °C Comparándolo con los resultados experimentales que se obtuvo de 59.1 °C con una diferencia de temperatura entre los dos resultados de 3.2 °C.

---

Se muestra los resultados de la Temperatura en 62.3 °C en la simulación realizada en ANSYS FLUENT.



Fig. 4.11 Temperatura de Simulación (invierno, Enero/2018)

**Conclusión de las gráficas experimentales.** Como se aprecia en estas gráficas se ingresaron datos al ANSYS de radiación y temperaturas, a partir de las 10:00 a.m. hasta las 16:00 p.m. en lo cual se activa el equipo y empieza a recircular el agua tomando en cuenta la salida del fluido del tanque a la entrada y salida del intercambiador de calor (I.C), como también la temperatura de las celdas en el momento de monitoreo hasta que termina la prueba. Dando resultados parecidos a los que obtuvimos experimentalmente; Ya que, el flujo másico fue constante.

---

---

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

Este capítulo presenta las conclusiones del trabajo de tesis y las recomendaciones para estudios futuros.

---

## 5.1 Conclusiones

1. La eficiencia térmica fue en el I.C hasta 78% e híbrido 87.4 % con una temperatura de 71.77°C como máxima. La temperatura de trabajo de las Celdas fue de 68°C con una potencia de trabajo de 26.83 W y Eficiencia eléctrica del 9.4% de acuerdo a la geometría del I.C. El equipo acoplado genero 284.3 W, con un coeficiente de transferencia global de 5790 W/ m<sup>2</sup> °C.
2. La superficie en del sistema híbrido térmico fotovoltaico es de **0.22796** m<sup>2</sup>, muy inferior a la superficie de un panel fotovoltaico (1.7 m<sup>2</sup>) o una captador solar (2.5 m<sup>2</sup>).
3. Se logró disminuir la Temperatura de las Celdas al mismo tiempo que se obtuvo un Nivel térmico del Agua superior a los 70 °C, con una diferencia de 14 °C de disminución de la temperatura de las Celdas, además de con ello se incrementará la vida útil del sistema híbrido por no estar sometido a altas temperaturas.
4. De acuerdo a nuestros resultados y comparando con una extensa revisión bibliográfica podemos concluir que este trabajo es original por los siguientes motivos: La geometría es un I.C de placa plana con las medidas propias de nuestro trabajo, incluyendo la cantidad de celdas integradas a ella. Por lo tanto decimos que es avanzado debido a la capacidad de optimización del área de trabajo así como, en lo económico.
5. Los resultados obtenidos experimentales comparados con los simulados obtuvieron un margen de error no mayor al 9%.
6. Se comprobó que mediante la refrigeración por medio de convección forzada las celdas tienen un mejor desempeño ya que el flujo es constante gracias a la bomba.
7. El modelo matemático muestra buena similitud con los datos experimentales.
8. Se obtuvo un Reynolds de régimen laminar menor a 2300.
9. De acuerdo al valor obtenido en la eficiencia eléctrica del 9.4 % se considera aceptado ya que en la literatura hay reportes a partir del 9 % en celdas Mono cristalinas como las que se usaron en este trabajo.

---

10. El depósito de almacenamiento de agua de 100 litros se observó que llegó el momento en que ya estaba tibio y por lo mismo ya no fue capaz de seguir enfriando a las celdas, por lo consiguiente se necesitaría un depósito de característica del doble de capacidad que se utilizó.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Continuar con la evaluación experimental utilizando otras soluciones trabajo (anticongelante o aceite) y obtener sus propiedades de transferencia de energía para conocer con cual se obtiene un mejor desempeño del equipo.
2. Se recomienda rediseñar el I.C con la finalidad de poder aprovechar al máximo el calor obtenido por el fluido calo-portador.
3. Se recomienda empezar las pruebas a partir de las 7:00 am para obtener mayor conocimiento de la diferencia entre los resultados obtenidos en el presente trabajo y trabajos futuros.
4. Se recomienda encontrar el flujo másico ideal es decir cuando exista mayor captación de temperatura al rediseñar el equipo o utilizar otro fluido.
5. Se recomienda añadir al equipo celdas de alta concentración para obtener mayor cantidad de energía térmica y eléctrica.
6. Se recomienda que en el diseño del interior del intercambiador de calor donde circula el fluido se utilicen aletas que generen régimen turbulento o de transición para compararlo con el flujo laminar del presente trabajo y conocer con cual régimen se obtiene mayor desempeño del equipo

---

## REFERENCIAS

- [1] De la Cuesta JR. (2012). Diseño de instalaciones solares térmicas para la producción de agua caliente sanitaria. Aplicación a un Edificio de Viviendas. Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla, España, 1: 22-55.
- [2] De Cusa J. (1998). Energía solar para viviendas. Ediciones CEAC. España, 18-37.
- [3] Almaraz SR. (1994). Ingeniería de la energía solar. Edit. Colegio Nacional de México, 20-36.
- [4] Peuser FA. Remmers KH. Schnauss M. (2002). Solar thermal Systems. Successful Planning and Construction. Solar Praxis, 74-114.
- [5] Close, D.j., 1962. The performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation. Solar Energy 6, p.p. 33-40.
- [6] Ong, K, A Finite Difference Method to Evaluate the Thermal Performance of a Solar Water Heater, Solar Energy 16, p.p. 137-147, 1974.
- [7] Smith, Ch., and Wiss, T., 1976. Design Application of the Hottel-Whillier-Bliss Equation, solar Energy, p.p. 109-112, Colorado State University, U.S.A.
- [8] Bértiz P. L., Álvarez G. M. 1982. Influence of the inclination Angle of a Sun-Ray Collector Surface on an Incident Radiation. CUBAENERGÍA, Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa.
- [9] Hamdy K. Elminir, Ahmed E, Ghitas, F. El-Hussainy, R. Hamid, M.M. Behery, Khaled M. Abdel-Moneim. 2006. Optimum solar flat-plate collector slope: Case study for Helwan, Egypt. Energy Conversion and Management, Volume 47, Issue 5, p.p. 624-637
- [10] Bassiouny R., Korah N. (2009). Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate. Energy and buildings. Volume 41, Issue 2 p.p. 190-196
- [11] Chen Xi, Yang Hongxing, Lu Lin, Wang Jinggang, Liu Wei. 2011. Experimental studies on a ground coupled heat pump with solar thermal collectors for space heating. Energy 36 p.p. 5292-5300.
- [12] Fernández A., Dieste J.A. (2013). Low and medium temperature solar thermal collector based in innovative materials and improved heat exchange performance. Energy Conversion and Management, Volume 75, p.p. 118-129.

- 
- [13] Ayompe L.M., Duffy A. 2013 Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate. *Applied Thermal Engineering*, Volume 58, Issues 1-2, p.p. 447-454.
- [14] Javadi F.S., Saidur R., Kamalisarvestani M. 2013 Investigating performance improvement of solar collectors by using nanofluids. *Renewable and sustainable energy reviews*, Volume 28 p.p.232-245.
- [15] Ong, K. Volume 55, Issue 3, 1995. Thermal performance of solar air heaters— Experimental correlation. September p.p. 209–220
- [16] Hussein, H.M.S.; Mohamad, M.A.; El-Asfour, A.S. 1999 Optimization of a wickless heat pipe flat plate solar collector. *Energy Conversion and Management* v 40 n 18, p.p. 1949-1961.
- [17] Kurklu, Ahmet; Ozmerzi, Aziz; Bilgin, Sefai. 2002 Thermal performance of water-phase change material solar collector. *Renewable Energy* v 26 n 3, July, p.p. 391-399.
- [18] Zhai X. Q., Wang, R.Z., Wu, U.Y., Dai Y.J., Ma, Q., 2005. Design and performance of a solar powered air-conditioning in a green building. *Applied Energy* 85, 297-311.
- [19] Majdi Hazami, Ali Riahi, Farah Mehdaoui, Omeima Nouicer, Abdelhamid Farhat. Energetic and exergetic performances analysis of a PV/T (photovoltaic/thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions. *Energy*, Volume 107, 15 July 2014, Pages 78-94
- [20] A. Guenounou, A. Malek, M. Aillerie. Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: Application to a coastal Mediterranean region of Algeria. *Energy Conversion and Management*. Volume 114, 15 April 2016, Pages 356-363.
- [21] Manuel Lämmle, Thomas Kroyer, Stefan Fortuin, Martin Wiese, Michael Hermann. Development and modelling of highly-efficient PVT collectors with low-emissivity coatings. *Solar Energy*, Volume 130, June 2016, Pages 161-173
- [22] T. Hernández, S.G. Pérez, O. Flores, J.A. Hernández, D. Juárez-Romero, A. Álvarez, A. Huicochea, J.V. Galaviz-Rodríguez. Heat transfer prediction on flat solar collectors for the water purification system integrated to an absorption heat transformer. *Desalination and Water Treatment*.2016 (1-9)
- [23] Alejandro del Amo, Amaya Martínez-Gracia, Angel A. Bayod-Rújula, Javier Antoñanzas. An innovative urban energy system constituted by a

---

photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring. *Applied Energy* 186 (2017) 140-151.

[24] Salwa El Gindi, Ahmed Reda Abdin, Ayman Hassan (2017). Building Integrated Photovoltaic Retrofitting in Office Buildings, *Energy Procedia* 115 (239–252).

[25] Maycock, P., & Stirewalt, E. (1985). *A guide to the photovoltaic revolution*. Pennsylvania: Rodale Press.

[26] Brinkworth, B. J., Cross, B. M., Marshall, R. H., & Yang, H. (1997). Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy*, 61, 169-178.

[27] Moshfegh, B., & Sandberg, M. (1998). Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renew Sustain Energy*, 2, 287-301.

[28] Brinkworth, B. (2000). Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts. *Solar Energy*, 69, 413-420.

[29] Brogren, M., & Karlsson, B. (2002). Low-concentrating water-cooled PV-thermal hybrid systems for high latitudes. *The twenty-ninth IEEE photovoltaic specialists conference*, (pp. 1733-1786).

[30] Sandberg, M., & Moshfegh, B. (2002). Buoyancy-induced air flow in Photovoltaic façades effect of geometry of the airgap and location of solar cell modules. *Build Environ*, 37, 211-218.

[31] Krauter, S. (2004). Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82, 131-137.

[32] Tiwari, A., Sodha, M. S., Chandra, A., & Joshi, J. C. (2006). Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 175-189.

[33] Abdolzadeh, M., & Ameri, M. (2008). Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*, 37, 91-96.

[34] Kozak, T., Maranda, W., Napieralski, A., De Mey, G., & De Vos, A. (2009). Influence of Ambient Temperature on the Amount of Electric Energy Produced by Solar Modules. *MIXDES 16th International Conference 'Mixed Design of integrated Circuits and Systems'*, (pp.351-354).

[35] Marco, B., Pietro, F., & Bettina, N. (2012). Energy performance evaluation of a demo solar desiccant cooling system with heat recovery for the regeneration of the adsorption material. *Renew Energy*, 44, 40-52.

[36] Sanvicente, E. (2013). *Experimental investigation of thermal and fluid*

---

*dynamical behavior of flows in open-ended channels: Application to Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems.* PhD thesis: INSA de Lyon.

[37] Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2013). Investigations on the performance of a double pass, hybrid - type (PV/T) solar air heater. *International Journal of Energy and Environment*, 4(4), 687- 698.

[38] Ge, T. S., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2014). Review on solar powered rotary desiccant wheel cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 476-497.

[39] Adham Makki, Siddig Omer & Hisham Sabir (2015). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 41, January 2015, Pages 658-684

[40] M. Hasanuzzaman, A.B.M.A. Malek, M.M. Islam, A.K. Pandey, N.A.Rahim. A review: Global advancement of cooling technologies for PV systems. *Solar Energy* 137 (2016)25-45.

[41] Athina G. Gaglia, Constantinos A. Balaras, Spyros Lykoudis, Athanassios A. Argiriou, Evangelos Dialynas. Energy efficiency of PV panels under real outdoor conditions an experimental assessment in Athens, Greece. *Renewable Energy* 101 (2017) 236-243.

[42] Jin Zhang, Yimin Xuan. Performance improvement of a photovoltaic - Thermoelectric hybrid system subjecting to fluctuant solar radiation. *Renewable Energy* 113 (2017) 1551-1558.

[43] Erdem Elibol, Özge Tüzün Özmen, Nedim Tutkun, Oguz Köysal. Outdoor performance analysis of different PV panel types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 651-661.

[44] Los movimientos del Sol en el cielo. El concepto de ecuador celeste y eclíptica. Consultada el 30 de abril de 2016 desde: <https://sites.google.com/site/eltempocosmico/los-movimientos-del-sol-en-el-cielo-el-concepto-de-ecuador-celeste-y-ecliptica>.

[45] Mekhilef S., Saidur R., Safari A. (2011). A review on solar energy use in industries Review Article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4): 1777-1790.

[46] Energia Solar Termica (2015). Consultado el 19 de abril de 2016 desde: <http://web.ing.puc.cl/power/alumno12/costosernc/C..html>

[47] Ballestrín J., Marzo A. (2012) Solar radiation, attenuation in solar tower. *Plants. Solar Energy*, 86(1):388–392.

- 
- [48] Innovacion Orientada. Sector Energía Solar (2006). Gaceta de la Secretaría de Economía y de FUMEC (Fundación México–Estados Unidos para la Ciencia), 3-21.
- [49] Park R., Pandey AK, Tyagi VV., Tyagi SK. (2014). Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems Review Article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 30: 105-123.
- [50] Tett SFB. (1999). Causes of twentieth century temperature change. *Nature*, 399: 569–572.
- [51]. Neville R. (1995). The Sun and Sunlight. *Solar Energy Conversion. The Solar Cell*. Second Edition, 39-70.
- [52] Energia Solar Termica. (2015). Consultado el 9 de mayo de 2016 desde: <http://solar-thermal.anu.edu.au/>
- [53] Duffie JA., Beckman WA. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2:114-130
- [54] Pottler KSC, Beck A., Fricke J. (1999). Optimized finned absorber geometries for Solar air heating collectors. *Solar Energy*, 67: 1-3, 35-52.
- [55] Kern, D. (1999). *Procesos de transferencia de calor*. Ed. McGraw Hill, México
- [56] Cuadrado, K. (2012). *Diseño, construcción y pruebas de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para laboratorio de térmicas de la facultad de mecánica*. Ecuador.
- [57] Honsenberg, Christiana y Bowden, Stuart. Photovoltaic Education Network. *PVEDUCATION.ORG*. [En línea]<http://www.pveducation.org/>.
- [58] NREL - *Outdoor PV Module Degradation of Current-Voltage Parameters*. Smith, Ryan M., Jordan, Dirk C. y Kurtz, Sarah R. Denver, Colorado: NREL, 2012.
- [59] Cengel, Y. (2004). *Transferencia de calor*. Ed. McGraw Hill, México.
- [60] Incropera, Frank P. y DeWitt, David P. *Fundamentos de Transferencia de Calor, 4a. ed.* México: Prentice Hall, 1999.
- [61] Lee, Ho Sung. *Thermal Design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

- 
- [62] CSUC. (2016). CSUC. Obtenido de <http://www.csuc.cat/es/http://www.csuc.cat/es/aula-de-noves-tecnologies/ansys-info-day-academico-y-de-investigacion>.
- [63] Bird R.B. Stewart W.E. Lightfoot E.N. (1962). Transport phenomena. Wiley, New York.
- [64] Malvern L. (1969). Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [65] White F.M. (1986). Fluid mechanics. McGraw Hill, New York.
- [66] Aris R. (1989). Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics. Dover Publications. New York.
- [67] Almaraz S. R., Muñoz G. F. 1994. Ingeniería de la energía solar. Edit. Colegio Nacional de México.
- [68] Sukamongkol, Y; Chungpaibulpatana, S; Ongsakul, W. A Simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads. Thailand, 2001.
- [69] *NREL - Outdoor PV Module Degradation of Current-Voltage Parameters*. Smith, Ryan M., Jordan, Dirk C. y Kurtz, Sarah R. Denver, Colorado: NREL, 2012.
- [70] CSUC. (2016). Obtenido de <http://www.csuc.cat/es/http://www.csuc.cat/es/aula-de-noves-tecnologies/ansys-info-day-academico-y-de-investigacion>.
- [71] Bird R.B. Stewart W.E. Lightfoot E.N. (1962). Transport phenomena. Wiley, New York.
- [72] Malvern L. (1969). Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [73] White F.M. (1986). Fluid mechanics. McGraw Hill, New York.
- [74] Aris R. (1989). Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics. Dover Publications. New York.
- [75] Cavendish CFD, S.A DE CV [en línea] <http://www.cavendishcfd.com/fluent.ht>

Representación gráfica de la bibliografía consultada por año.

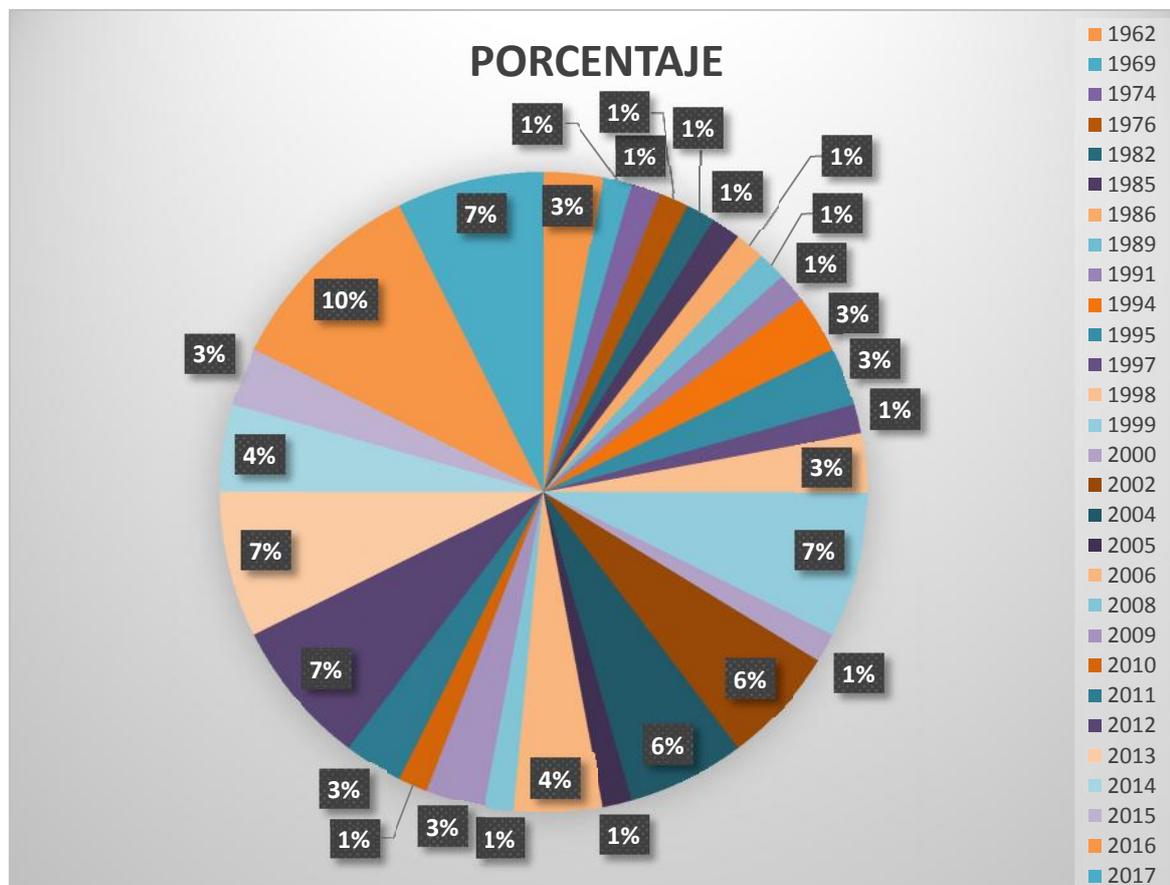


Figura 5.1 Porcentaje de bibliografía consultada por año.

---

## APENDICE 1

### A) TRABAJO ENVIADO A CONGRESO:

Heat transfer prediction on solar collector for the water purification system integrated to absorption heat transformer By T. Hernández, **S.G. Pérez**, O. Flores, J.A. Hernández, D. Juárez, A. Álvarez, A. Huicochea. Rome 2016 Desalination for the Environment: Clean Water and Energy 22–26 May 2016. Marriott Park Hotel, Rome, Italy.

### B) ARTÍCULO PUBLICADO:

HEAT TRANSFER PREDICTION ON SOLAR COLLECTOR FOR THE WATER PURIFICATION SYSTEM INTEGRATED TO HEAT TRANSFORMER ABSORTION. T. Hernández, **S. G. Pérez**, O. Flores, J. A. Hernández, D. Juárez, A. Álvarez, A. Huicochea. Deslination for the environment: Clean Water and Energy. 2017.

### C) ARTÍCULO ENVIADO PARA PUBLICAR:

ARTÍCULO ENVIADO: 29-06-2018

IN SUBMIT FOR PUBLICATION IN *DESALINATION AND WATER TREATMENT*. THE COMMISIONING OF ABSORPTION HEAT TRANSFORMER FOR WATER DISTILLATION USING SOLAR PANELS. **S.G.Perez**<sup>1</sup>, J. Siqueiros<sup>2\*</sup>, G. Urquiza-Beltrán<sup>3</sup>, A Hui cochea<sup>3</sup>, A.H.Hernández<sup>4</sup>

#### D) Calibración de Termopares:

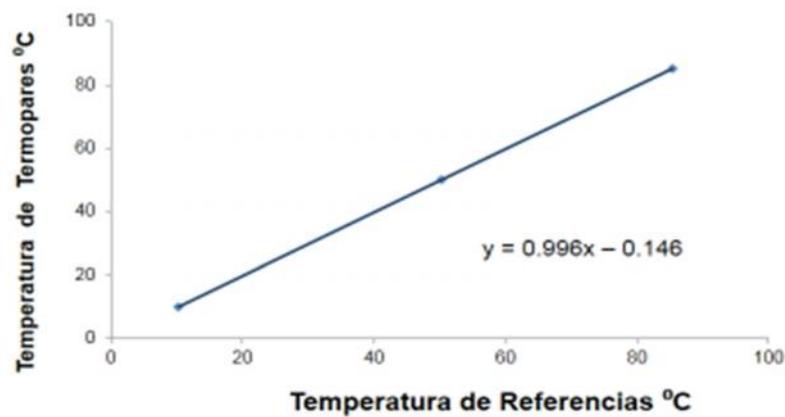
La pendiente y la ordenada al origen de cada sensor de temperatura se indican en la siguiente tabla,

Tarjeta	Canal	m	b
3	301	0.997	-0.142
	303	0.996	-0.146
	305	0.997	-0.144
	306	0.989	-0.148

Notas:

El número del termopar es el mismo que el número de canal.

#### CALIBRACION DE LOS TERMOPARES (ASTM Standards: E 230 – 03)



Cuernavaca, Morelos, 07 de junio de 2018.

DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA  
DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ  
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ  
DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE  
DR. ÁNGEL HORACIO HERNÁNDEZ SORIA  
DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN  
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

Por este conducto me permito comunicarles que han sido designados miembros del COMITÉ REVISOR de la TESIS titulada "SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR, TÉRMICO-FOTOVOLTAICO AVANZADO" que presenta el alumno SANDRO GUADALUPE PÉREZ GRAJALES, para obtener el título de DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS con opción terminal en TECNOLOGÍA QUÍMICA.

Se les recuerda que por reglamento se tiene un plazo de 20 días hábiles (a partir de la fecha de recepción del documento) para la revisión del manuscrito, por lo que le solicitamos no exceder el plazo señalado.

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarles un cordial saludo.

Recibi  
Tesis  
6/21/2018  
Siqueros

Recibi 2018  
13 Nov.  
Huicochea

Recibi  
10/11/18

Atentamente  
Por una humanidad culta  
Una universidad de excelencia



JEFATURA DE POSGRADO EN  
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ  
Coordinador de Posgrado  
En Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Recibi  
5-11-18

JAFP\*RSU/nmc  
Recibi  
12/11/18

Recibi  
8/11/2018  
Zurett

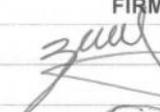
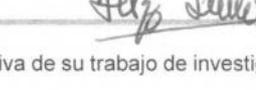
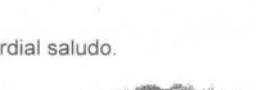
ASUNTO: APROBACIÓN DE TESIS

Cuernavaca, Morelos, 07 de junio de 2018

**SANDRO GUADALUPE PÉREZ GRAJALES  
PRESENTE**

Por este conducto le notifico que su tesis de Doctorado titulada **“SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR, TÉRMICO-FOTOVOLTAICO AVANZADO”**

Fue aprobada en su totalidad por el jurado revisor y examinador integrado por los ciudadanos

NOMBRE	FIRMA
DR. ALVARO ZAMUDIO LARA	
DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ	
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ	
DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE	
DR. ÁNGEL HORACIO HERNÁNDEZ SORIA	
DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN	
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ	

Por consiguiente, se autoriza a editar la presentación definitiva de su trabajo de investigación para culminar en la defensa oral del mismo.

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente  
*Por una humanidad culta*  
Una universidad de excelencia



  
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ  
Coordinador de Posgrado  
En Ingeniería y Ciencias Aplicadas

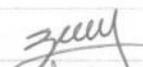
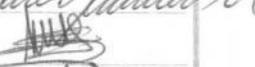
JAHPRSU/nmc

Cuernavaca, Morelos, a 07 de junio de 2018.

**DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ**  
**COORDINADOR DE POSGRADO**  
**EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la "SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR, TÉRMICO-FOTOVOLTAICO AVANZADO" que presenta el alumno SANDRO GUADALUPE PÉREZ GRAJALES, para obtener el título de DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS con opción terminal en TECNOLOGÍA QUÍMICA.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ALVARO ZAMUDIO LARA	Aprobado	
DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ	Aprobado	
DR. ARMANDO HUICOHEA RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE	Aprobado	
DR. ÁNGEL HORACIO HERNÁNDEZ SORIA	Aprobado	
DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN	Aprobado	
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.