



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN.

**“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO
RADIATIVO EN ZONAS CON CLIMAS CALIDO SUB-
HÚMEDAS.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

MARTÍN DANIEL RIVERO MONROY.

ASESOR INTERNO:

ING. HÉCTOR MIGUEL SANTOYO MORALES.

ASESOR EXTERNO:

DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES.

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 2010.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS.

A mis Padres por invitarme a la vida y darme su afecto incondicionalmente.

Pedro Rivero

Ofelia Monroy

A mis Amigos por su constante compañía enriqueciendo mi vida a cada momento.

Lorena García

Adolfo Aparicio

Iván Martínez

Erick Nava

Pablo Huelzs

Jesús Barón

A mis Profesores por compartir sus conocimientos y su experiencia.

Gabriel Villa

Ricardo Vilaboa

Jaime Rosas

Adrian Nonato

AGRADECIMIENTOS.

A mi alma mater, la “Universidad Nacional Autónoma de México”, fuente de conocimiento y profunda humanidad.

Al “Centro de Investigación en Energía” por darme la oportunidad de participar en la investigación que dio como resultado este trabajo. Agradezco su entrega y devoción al desarrollo científico y tecnológico en México, brindando oportunidades de crecimiento académico a todos los estudiantes.

A la “Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán” por mi formación académica.

Al “Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología”. Cuya ayuda económica me fomenta e impulsa a continuar con mi desarrollo académico.

A los Doctores:

Octavio García Valladares.

Isaac Pilatowsky Figueroa.

Jorge Rojas Menéndez.

Víctor Hugo Gómez.

Quienes me dieron la oportunidad de participar en la investigación, me asesoraron y me apoyaron constante e incondicionalmente para desarrollar mi tesis.

Al Ingeniero

Héctor Miguel Santoyo Morales quien me asesoro y aconsejo durante el desarrollo de este trabajo.

“La vida es una gran historia compuesta a su vez de varias historias, mientras unas terminan otras comienzan, tal vez, lo importante es hacer siempre todo cuanto podamos para dar a cada historia un buen final”... Martín Daniel Rivero Monroy

INDICE.

RESUMEN.....	I
OBJETIVO GENERAL.....	I
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	I
PRESENTACIÓN.....	II
CONTENIDO POR CAPÍTULOS.....	III
CAPITULO 1 “INTRODUCCIÓN”.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. ENFRIAMIENTO.....	2
1.3. SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.....	2
1.4. BALANCE RADIATIVO.....	4
1.5. ENFRIAMIENTO RADIATIVO.....	5
1.6. HISTORIA Y ALGUNAS APLICACIONES CONOCIDAS.....	7
1.7. CLIMA LOCAL.....	13
1.8. HIPÓTESIS.....	14
1.9. JUSTIFICACIÓN.....	14
CAPITULO 2 “PRINCIPIOS FÍSICOS”.....	16
2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	16
2.2. RADIACIÓN.....	17
2.3. DEPENDENCIA ANGULAR DE LA RADIACIÓN.....	18
2.4. FLUJOS DE RADIACIÓN.....	18
2.5. LEYES FÍSICAS DE LA RADIACIÓN.....	20
2.5.1. Ley de Planck.....	20
2.5.2. Ley de Stefan-Boltzman.....	20

2.5.3. Ley de Wien.	21
2.5.4. Ley de Beer-Lambert.	22
2.6. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN.	23
2.7. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES.	24
2.8. MODELO FÍSICO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.	26
2.8.1. Elemento radiativo.	26
2.8.2. Elemento de aislamiento.	27
CAPITULO 3 “ESTUDIO EXPERIMENTAL”.	28
3.1. PROTOTIPOS DE EXPERIMENTACIÓN.	28
3.2. DISEÑO Y MATERIALES DE LOS PROTOTIPOS.	28
3.2.1. Radiador.	28
3.2.2. Panel aislante.	30
3.2.3. Dimensiones.	30
3.2.4. Funcionamiento del sistema.	30
3.3. INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA.	32
3.3.1. Adquiridor de datos.	32
3.3.2. Programa HP VEE.	35
3.3.3. Equipo de cómputo.	36
3.3.4. Estación meteorológica.	37
3.3.5. Sensores.	37
3.3.6. Calibración.	40
3.3.7. Montaje del banco de pruebas.	44
3.4. PRUEBAS EXPERIMENTALES.	46
3.4.1. Prueba 1.	47
3.4.2. Prueba 2.	50
3.4.3. Prueba 3.	53
3.4.4. Prueba 4.	55

CAPITULO 4 “CONCLUSIONES”	59
4.1. CONCLUSIONES FINALES.....	59
BIBLIOGRAFIA.	60

RESUMEN.

El presente trabajo consiste en el estudio experimental de un sistema de enfriamiento de bajo consumo energético, el cual, funciona aprovechando los principios del fenómeno de enfriamiento radiativo nocturno. Tal estudio consiste en una serie de pruebas que fueron planteadas tomando en cuenta ciertos parámetros, criterios y observaciones, los cuales, son definidos, explicados y justificados durante el desarrollo de éste trabajo.

Dicho estudio experimental se realiza utilizando prototipos diseñados y construidos por el Centro de Investigación en Energía (CIE); los resultados y observaciones finales son aprovechados e incluidos dentro de un proyecto general llamado “Estrategias de Climatización de Bajo Consumo Energético” llevado a cabo por el (CIE), el cual, es planeado y efectuado con el equipo e infraestructura del (CIE), bajo la dirección, coordinación y la constante supervisión de un equipo de investigadores conformado por los doctores: Jorge Rojas Menéndez, Isaac Pilatowsky Figueroa, Octavio García Valladares y Ramón Tovar. El aspecto técnico de ensamblaje de los prototipos, montaje del banco de datos, la instrumentación, medición, captura de datos y procesamiento de los mismos fue aprovechado y documentado para la creación de ésta tesis.

OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el potencial de enfriamiento de un sistema de enfriamiento radiativo nocturno, estudiar su desempeño en zonas con un clima cálido sub-húmedo y determinar que tan viable sería su aplicación como sistema de enfriamiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Presentar una introducción, antecedentes y aplicaciones del fenómeno de enfriamiento radiativo.
- Efectuar un estudio bibliográfico definiendo los principios físicos, leyes de radiación y conceptos básicos del fenómeno.
- Explicar el principio de operación del prototipo.

- Realizar un estudio experimental sobre los prototipos, describiendo el método, técnica, parámetros considerados, instrumentos, equipos, dispositivos y rutina utilizada.
- Analizar y presentar los datos obtenidos en el estudio experimental.
- Presentar conclusiones sobre los resultados finales.
- Elaboración de la tesis y presentación del examen profesional.

PRESENTACIÓN.

Diariamente la sociedad utiliza diversos sistemas de enfriamiento para múltiples aplicaciones, por ejemplo: para conservar alimentos, enfriar motores, computadoras, un reactor nuclear, climatizar una habitación, enfriar agua para producir hielo, etc. Muchos de los sistemas utilizados actualmente consumen una gran cantidad de energía, generan residuos contaminantes y son costosos.

Para algunas necesidades es posible sustituir o mejorar los sistemas de enfriamiento convencionales para con ello lograr una disminución en el consumo de energía, costos de operación y la generación de contaminantes.

El enfriamiento radiativo, es un fenómeno de enfriamiento natural, el cual, puede potencializarse y aprovecharse para diferentes propósitos. Actualmente existen algunos sistemas de enfriamiento que utilizan el fenómeno de enfriamiento radiativo, dichos sistemas no requieren de grandes cantidades de energía comparadas con otros sistemas de enfriamiento, como los son, los sistemas de enfriamiento por compresión entre otros. Algunas ventajas adicionales de dicho enfriamiento natural radican en que no requiere de sustancias nocivas para el medio ambiente y su operación es relativamente económica.

Como se menciona mas adelante, el enfriamiento radiativo es un fenómeno cuyo potencial puede aumentar o disminuir en función a ciertas condiciones físicas y climáticas; por tal motivo, es necesario continuar con el estudio este fenómeno para comprender más su naturaleza y así aprovecharlo eficazmente.

El propósito central de esta tesis consiste en estudiar el comportamiento y el potencial de enfriamiento de un sistema que funciona aprovechando dicho fenómeno, bajo un clima cálido sub-húmedo. El sistema será sometido a múltiples pruebas y será observado bajo diversos parámetros, que serán definidos en capítulos posteriores.

Durante el desarrollo de ésta tesis se mencionan algunos dispositivos que aprovechan dicho fenómeno y se han desarrollado a través de la historia. De la misma manera se

explican los principios, leyes y conceptos físicos bajo los cuales se lleva a cabo el fenómeno de enfriamiento radiativo, se plantea un modelo físico que reproduzca el fenómeno, posteriormente se propone un prototipo experimental, se presenta el método experimental, pruebas, resultados y finalmente conclusiones.

CONTENIDO POR CAPÍTULOS.

Capítulo 1. “Antecedentes” Dentro de este capítulo se desarrolla una introducción general, se mencionan algunos métodos de enfriamiento, se define el fenómeno de enfriamiento radiativo y se presentan algunos antecedentes relacionados. Por último se plantea la hipótesis y justificación de la tesis.

Capítulo 2. “Marco teórico” Este capítulo contiene el marco teórico, presenta los principios, leyes y conceptos físicos bajo los cuales se lleva a cabo el fenómeno de enfriamiento radiativo. Se plantea un modelo que reproduzca dicho fenómeno, se definen sus características físicas y se explica cada elemento que integra el modelo.

Capítulo 3. “Estudio experimental” En este capítulo se describe los prototipos experimentales. Se plantea el Material y método utilizado explicando las características y el propósito de cada uno de los elementos que conforman el prototipo además del modo de operación. Se definen los parámetros a través de los cuales se analiza el potencial de enfriamiento, las variables físicas que se medirán en las pruebas y los instrumentos utilizados. Por último se exponen las condiciones operacionales y climáticas bajo las cuales se lleva a cabo cada prueba.

Capítulo 4. “Conclusiones” A lo largo de este capítulo, se presentan los resultados de las pruebas efectuadas, se analizan e interpretan los datos obtenidos, se reportan observaciones relevantes durante las pruebas, por último son presentadas las conclusiones finales y se propone un estudio posterior que continúe con un análisis más profundo sobre este tema.

CAPITULO 1.

“INTRODUCCIÓN.”

1.1. ANTECEDENTES.

La energía es esencial para el funcionamiento de todo proceso, cada día la civilización demanda una mayor cantidad debido al crecimiento constante de la industria y la población humana, en toda actividad cotidiana esta implícito el uso de la energía, por tal razón, es necesario generar nuevas tecnologías para obtener energía, así como también buscar fuentes alternativas que sean seguras, económicas, renovables y menos agresivas al medio ambiente. De igual manera, es importante plantear estrategias para economizar, aprovechar y optimizar su consumo.

Actualmente la principal fuente de energía de la sociedad proviene de los hidrocarburos, el petróleo, el gas y otros derivados son utilizados en los medios de transporte, generación de electricidad y muchas otras aplicaciones. Cada día la demanda de petróleo aumenta y siendo un recurso limitado llegará el día en que se termine por completo. Desde la década de 1970 se ha presentado una disminución considerable en su producción mientras la demanda de energía la supera, provocando con ello una crisis energética mundial, por tal motivo, se comenzó a generar conciencia sobre las fuentes de energía, su manejo y su aprovechamiento, despertando el interés por encontrar fuentes alternativas además de nuevas estrategias que resuelvan problemas relacionados. (Kishore, V. N. 2009)

Un proceso que consume energía considerablemente es la refrigeración. La climatización por ejemplo, es una manera de controlar un ambiente interior y tal proceso requiere un gran consumo de energía por los sistemas de calefacción y aire acondicionado. Un ejemplo de esto sucede en China, ya que este país consume un promedio del 27.8% de su producción neta de energía tan sólo en aplicaciones de uso domestico y es de resaltar que el 55% de energía consumida por un edificio promedio en dicho país se utiliza para la climatización. [Wang Yiping, Cui Yong, etal. 2008].

1.2. ENFRIAMIENTO.

El termino “enfriar” se refiere a disminuir y mantener la temperatura de un cuerpo o un sistema por debajo la temperatura ambiental. Para conseguir dicho enfriamiento es

necesario extraer el calor del elemento que se desea enfriar y transferirlo o disiparlo a otro lugar o elemento. El enfriamiento contempla un rango muy amplio de temperaturas que puede ir desde la climatización hasta la producción de hielo “congelación.”

1.3. SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.

Existen diversos métodos y procesos sistemáticos para enfriar, tales métodos pueden clasificarse básicamente en dos tipos: Los métodos artificiales y los naturales.

a) **Métodos artificiales.** Se definen de acuerdo a su principio o ciclos de operación, por mencionar algunos se encuentran:

- Ciclos mecánicos. Consisten en la compresión mecánica de vapores o gases, en este caso se aprovechan las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo.
- Ciclos termo-mecánicos. Es un ciclo Rankine, el cual, se combina o acopla a un ciclo de compresión de vapor, en el cual, la potencia proporcionada proviene de un ciclo de generación de vapor, así como también de un ciclo de eyecto-compresión, esto quiere decir que el gas es comprimido térmicamente por las altas velocidades producidas por el efecto del eyecto-compresor.
- Ciclos térmicos. Estos ciclos implican las propiedades químicas de ciertas sustancias ó elementos que al diluirse o absorberse generan el fenómeno de enfriamiento.
- Ciclos termoeléctricos. En este caso se utilizan las propiedades termoeléctricas de sólidos especiales, por lo general aleaciones metálicas, el fundamento de este tipo de enfriamiento es llamado efecto Peltier.

-
- Ciclos electromecánicos. Estos ciclos generan vapor para producir energía eléctrica y se encuentran acoplados a ciclos de compresión mecánica.

b) Métodos naturales. El término de enfriamiento natural, se refiere a aquellas técnicas que aprovechan algunos fenómenos de enfriamiento natural que se presentan debido a ciertas propiedades físicas en algunos materiales. Tales técnicas no requieren dispositivos ó procesos químicos complejos, sin embargo,

c) en algunos casos no se excluye el uso de dispositivos simples como ventiladores o bombas de fluido. Algunas de estas técnicas son:

- Enfriamiento por ventilación. Esta técnica se refiere a la circulación natural de algún fluido, a través del espacio o cuerpo que se desea enfriar, el cual se encuentra abierto ó expuesto al exterior.
- Enfriamiento por ventilación nocturna. Consiste en enfriar utilizando la disminución de temperatura ambiental durante la noche, exponiendo el sistema o cuerpo que se desea enfriar, al exterior por las noches y aislarlo durante el día para conservarlo en lo posible el frío logrado.
- Enfriamiento por evaporación directa. Se lleva a cabo humedeciendo el aire, una vez húmedo, el aire se enfría y finalmente éste aire frío es usado para enfriar otro sistema, espacio o cuerpo.
- Evaporación indirecta. Funciona humedeciendo una superficie de materiales adecuados, la humedad enfría esta superficie durante el proceso de evaporación, por ultimo se utiliza la superficie fría para absorber el calor de lo que se desea enfriar.
- Enfriamiento de suelo. Esta técnica aprovecha las condiciones de baja temperatura del suelo en algunas regiones geográficas apropiadas. Utilizando un fluido de trabajo que extrae el frío de la tierra para su posterior uso.

-
- Enfriamiento radiativo. Esta técnica de enfriamiento funciona aprovechando las propiedades ópticas de los materiales, los cuales emiten o radian el calor que contienen a otro cuerpo o sistema denominado sumidero térmico. Esta última técnica es utilizada por el prototipo que será evaluado durante el desarrollo de este trabajo, su naturaleza y condiciones serán explicados con mayor detalle a continuación.

1.4. BALANCE RADIATIVO.

Para comprender la naturaleza del enfriamiento radiativo es necesario definir previamente el concepto de balance radiativo.

Existe un intercambio radiativo entre la Tierra y el espacio. Durante el día, la Tierra recibe energía del sol, la cual, es emitida en una longitud de onda corta, de esta energía, solo una pequeña parte llega a la Tierra. De la energía que llega a la Tierra, una porción es reflejada, otra es absorbida y una más es emitida nuevamente al espacio, produciendo el mencionado intercambio radiativo. Tal intercambio o balance es positivo durante el día pues la Tierra absorbe más energía del sol de la que refleja o emite. Durante la noche, bajo ciertas condiciones ambientales, el balance es negativo ya que la Tierra emite una mayor cantidad de energía de la que recibe al espacio en una longitud de onda larga.

Los gases que componen la atmósfera de la Tierra, presentan ciertas cualidades, una de ellas, es la capacidad de absorber radiación en diferentes longitudes de onda, sin embargo, a pesar de esto existe “ventanas” de transparencia atmosférica para determinadas longitudes de onda. Estas ventanas son importantes para que la radiación emitida por la Tierra y otros cuerpos en su superficie pueda escapar al espacio. Las ventanas pueden clasificarse de acuerdo a su amplitud, la primera ventana se presenta de $3.5\mu\text{m}$ a $4\mu\text{m}$, la segunda ventana a $4.7\mu\text{m}$ y la tercera, la más amplia, es de $8.5\mu\text{m}$ a $12.5\mu\text{m}$. A través de tales ventanas la Tierra y todo cuerpo en general emiten calor en el rango infrarrojo del espectro electromagnético durante la noche, provocando el abatimiento de su temperatura. La dimensión y transparencia de las “ventanas atmosféricas” se ven reducidas por efecto del contenido de humedad y otros gases absorbentes o dispersores. Otro factor implicado en el balance radiativo es la nubosidad, un cielo nublado actúa como una pantalla que absorbe energía del sol y después la emite en todas direcciones dependiendo también de la composición y naturaleza de la nube, en algunos casos puede producirse un efecto invernadero o bien evitar la ganancia de energía proveniente del sol. En la (Figura 1.1) se muestra el intercambio de energía entre la tierra y el espacio.

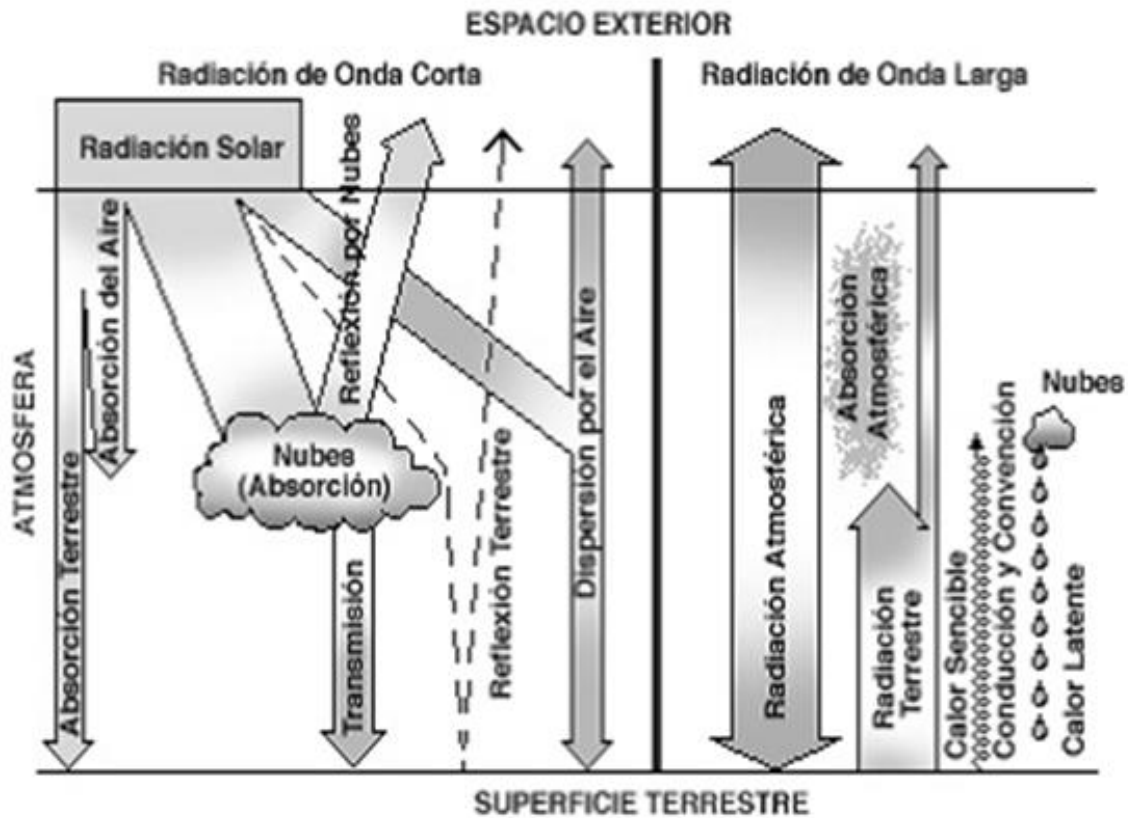


Figura 1.1. Flujos de energía en el balance global térmico.

Teóricamente se prevé que durante una noche con condiciones secas, de cielo claro y con una velocidad del viento baja, un cuerpo podría alcanzar una potencia de emisión de hasta 100W/m^2 . [Juan J. Ambríz G., Isaac Pilatowsky, Etal. 2002].

1.5. ENFRIAMIENTO RADIATIVO.

El enfriamiento radiativo se caracteriza por la pérdida de energía a través de la emisión de calor por radiación, este fenómeno está determinado por la propia física de radiación, en donde la capacidad radiativa esta determinada por el poder emisor de los cuerpos, el cual, depende a su vez de una propiedad característica de los cuerpos, esto es, su temperatura y su emisividad a la cuarta potencia interviniendo la constante de Stefan-Boltzman. Este poder emisor se presenta de manera notoria durante la noche por muchos cuerpos, en algunos casos y bajo ciertas condiciones especiales el abatimiento de temperatura de un cuerpo radiante puede alcanzar hasta 18°C por debajo de la temperatura ambiente. [Juan J. Ambríz G., Isaac Pilatowsky, Etal. 2002].

En numerosas observaciones sobre el fenómeno de enfriamiento radiativo, se encuentra que en particular que muchos cuerpos terrestres; hierba, rocas, madera, etc., sufren un enfriamiento durante la noche.

Los cuerpos terrestres se enfrían progresivamente durante la noche debido en parte al intercambio de calor con el aire circundante pero también por el intercambio radiativo entre la Tierra y la atmósfera.

El enfriamiento radiativo de un cuerpo depende en cierta medida de algunas condiciones, las cuales pueden dividirse en dos tipos esencialmente: condiciones ambientales y propiedades físicas del cuerpo radiante.

a) Condiciones ambientales. Se refiere a ciertas cualidades atmosféricas y climáticas que afectan el fenómeno, las más representativas son:

- Nubosidad. Cuando el cielo se encuentra nublado, la radiación atmosférica es muy intensa, tal que, la radiación neta dada por la diferencia entre la emitida desde el suelo respecto a la recibida de la atmósfera es casi nula. En tal caso, la capa de nubes envía hacia la Tierra tanta energía como la que recibe del suelo provocando un balance radiativo.
- La humedad relativa en el aire. La composición del aire juega un papel importante en el enfriamiento radiativo, una capa de aire con gran cantidad de humedad sobre un cuerpo radiante actúa como una pantalla que disminuye el efecto de enfriamiento.
- Altitud. A medida que aumenta la altitud geográfica, la columna de agua precipitable, definida como el “equivalente líquido” del vapor de agua presente en una columna atmosférica de una longitud dada se reduce, incrementándose la transparencia y disminuyendo la energía radiada por el vapor de agua. Por tanto, a mayor altitud, mayor será el enfriamiento relativo de un cuerpo expuesto al exterior durante la noche.

b) Propiedades físicas del cuerpo radiante. Un potencial de enfriamiento radiativo elevado depende también de las propiedades ópticas del material del cuerpo emisor.

- Emisividad. Una de las propiedades de tal material debe consistir básicamente en una alta emisividad y una baja absorptividad.

-
- Superficie. La superficie de un cuerpo es también un factor importante ya que entre mayor sea la superficie expuesta a la atmósfera mayor será la radiación de calor emitida.

El fenómeno de enfriamiento radiativo se produce naturalmente, también suele llamarse “efecto invernadero negativo”, debido a la pérdida de energía que se produce. Considerando las temperaturas ambientales de la Tierra, la radiación emitida se encuentra en un rango de longitudes larga entre $5\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$.

Cuando un cuerpo, un componente constructivo, un edificio, la superficie terrestre, un individuo, etc., es expuesto a otro cuerpo de menor temperatura como por ejemplo: una masa de agua, cualquier superficie fría ó en este caso a la atmósfera, los cuales, se consideran como pozos térmicos a una temperatura constante, se produce un enfriamiento radiativo. El cuerpo más caliente experimentará un determinado enfriamiento debido a que la cantidad de calor que pierde es mayor que la que gana, es entonces cuando el balance térmico se considera negativo. [Juan J. Ambríz G., Isaac Pilatowsky, Etal. 2002].

1.6. HISTORIA Y ALGUNAS APLICACIONES CONOCIDAS.

El uso práctico del enfriamiento radiativo ha sido explotado por culturas de las zonas desérticas del medio oriente, mucho antes de que fueran comprendidos y cuantificados los principios físicos detrás de dicho fenómeno, como reportan [Bahadori 1979] y [Yellott 1981]. Los pueblos persas eran capaces de producir hielo al exponer, estanques de agua con un delgado espesor, al cielo nocturno de noches de invierno. Con muros de adobe se protegían los estanques de los vientos prevalecientes y mediante la pérdida de calor por radiación, el agua lograba su congelación aun cuando la temperatura del ambiente fuera superior a 0°C . El hielo era cortado y almacenado en un pozo cubierto, de 10 a 15 metros de profundidad. (Figura 1.2).



Figura 1.2 Estanques de agua para producir hielo.

Por otro lado se sabe de construcciones vernáculas en el Medio Oriente y África del Norte, cuyo diseño permite que las superficies emitan durante la noche parte de la energía absorbida durante el día, aprovechando los cielos limpios y secos de esas regiones [Ambriz 1976].

En la década de 1960, Félix Trombe y colaboradores (1963, 1964), realizaron en Francia múltiples experimentos para conocer más del fenómeno de enfriamiento radiativo infrarrojo nocturno. Construyeron tres equipos principales: en el primero, dentro de un recipiente se coloca una placa emisora, preservando el ángulo de emisión de la placa hacia el espacio (Figura 1.3). El recipiente está forrado interiormente con hoja de aluminio -reflectora de la radiación infrarroja, se aísla térmicamente, se recubre de pintura reflejante y se cubre con una lámina de polietileno para minimizar los intercambios por convección. El segundo equipo (Figura 1.4) tiene tres niveles y sendas placas emisoras y láminas de polietileno y el tercero se construyó con 5 niveles. En el equipo con más efectos y láminas de polietileno se obtuvieron disminuciones de temperatura, con relación al ambiente, hasta de 30°C.

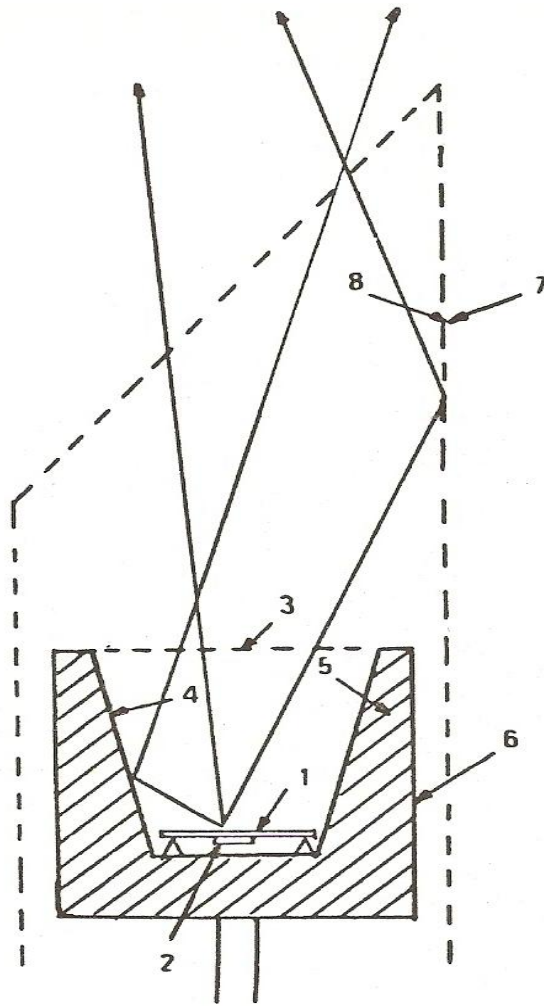


Figura 1.3 Dispositivo de Trombe de 1 piso.

1. Cuerpo negro.
2. Medidor de temperatura.
3. Película de polietileno.
4. Superficie reflectora.
5. Aislamiento.
6. Pintura selectiva.
7. Pantalla reflectora.
8. Pantalla reflectora del infrarrojo.

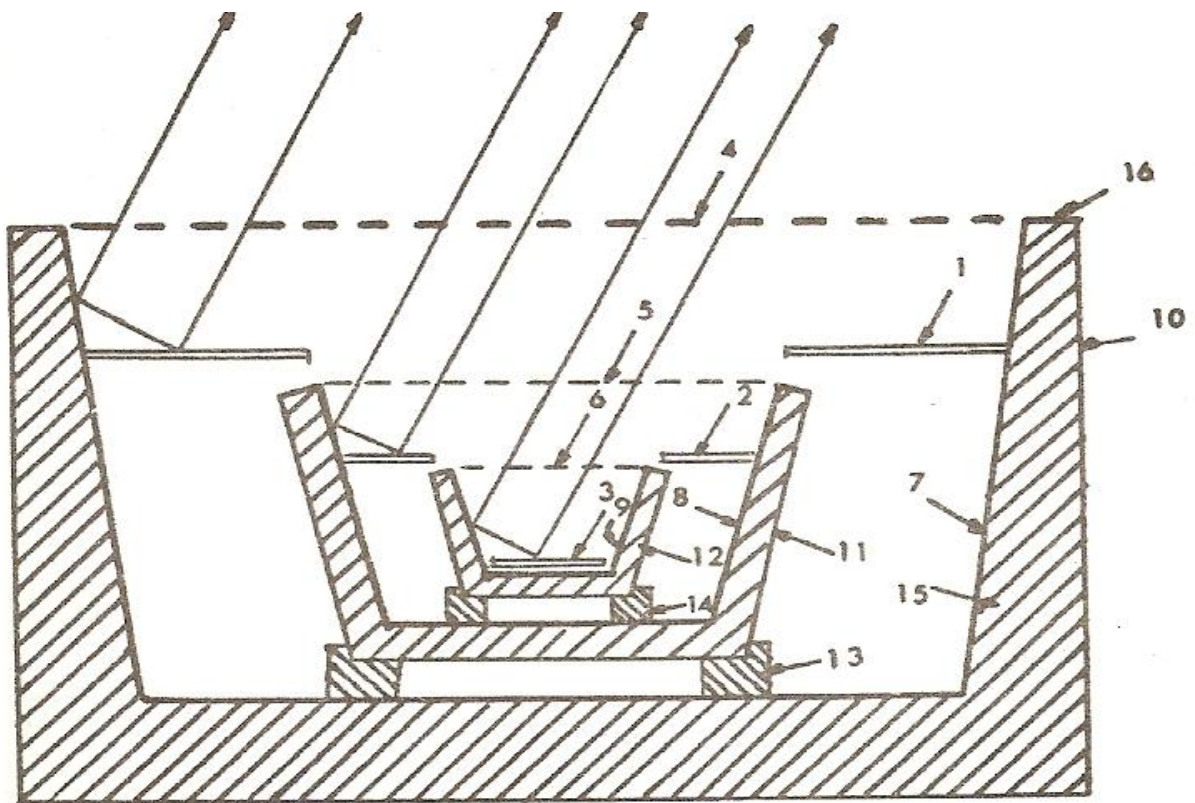


Figura 1.4 Dispositivo de Trombe de 3 pisos.

- | | |
|-------------|-------------------------------------|
| 1, 2, 3. | Radiadores. |
| 4, 5, 6. | Pantallas de polietileno. |
| 7, 8, 9. | Reflectores del infrarrojo. |
| 10, 11, 12. | Recubrimiento de pintura selectiva. |
| 13, 14, 15. | Aislamiento. |

En los setentas, el grupo de Isaac Pilatowsky realizó en México experiencias similares a las de F. Trombe, tanto con placas individuales [Juárez, 1975], como con dispositivos a varios efectos, como el enfriador radiativo nocturno de cuatro efectos [Ambriz, 1976]. Este último consta de 4 efectos, ubicados en diferentes niveles (Figura 1.5). La disipación de la energía infrarroja se hace desde la superficie de cajas metálicas de aluminio recubiertas de una película selectiva fría. Cada efecto es aislado por la parte inferior con cajas de madera que los separan entre sí; esto permite crear zonas de aire confinado que funcionan como amortiguador térmico. En la parte superior, el equipo se cubre con una película de polietileno de 50 μm , con objeto de limitar los intercambios de energía por convección con el aire circundante, sin impedir la emisión infrarroja desde la superficie de las cajas de aluminio. Los resultados de la experimentación realizada en Tizayuca, Hidalgo, se alcanzaron abatimientos en el seno del aire dentro de las cajas hasta 15 °C.

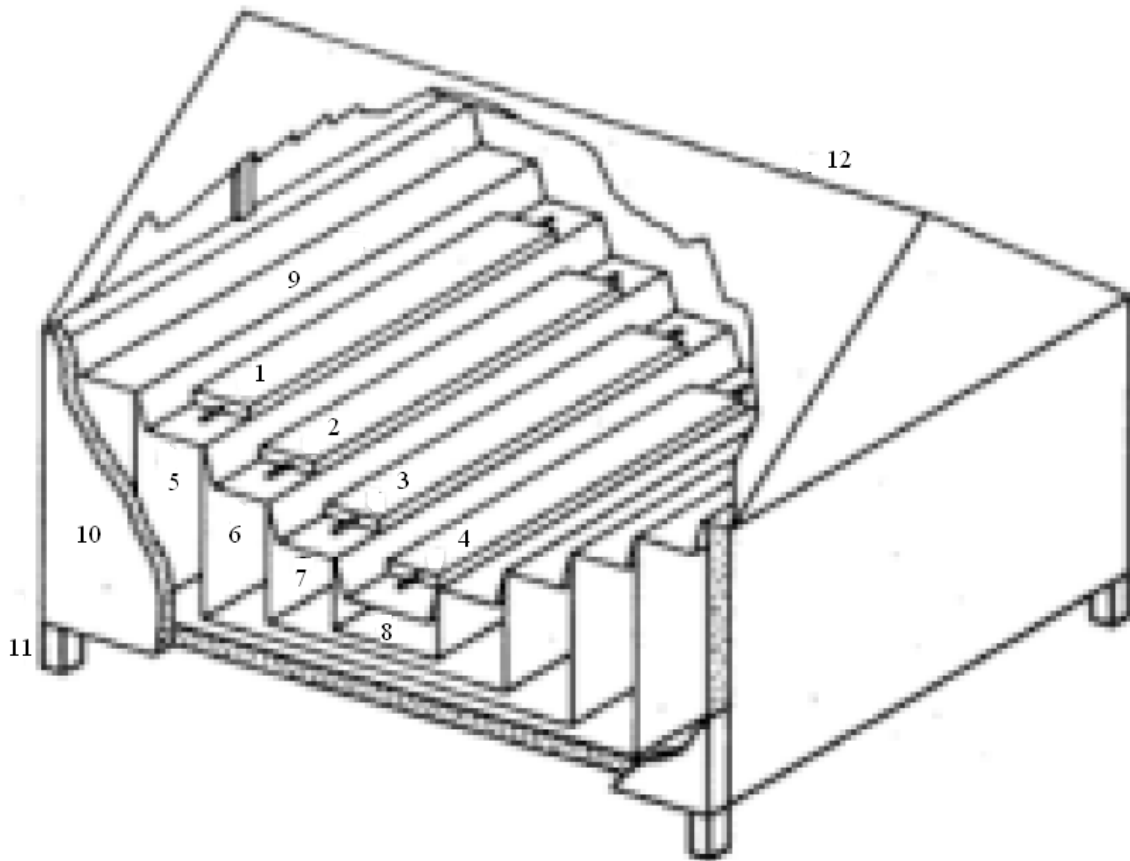


Figura 1.5 Perspectiva del enfriador radiativo.

- 1, 2, 3, 4. Cajas de aluminio.
- 5, 6, 7, 8. Madera
- 9. Lana de fibra de vidrio; 10, Fibra de vidrio
- 11. Ángulo metálico
- 12. Polietileno

Se sabe también que en el desierto de Atacama en Chile, las compañías mineras obtenían agua para beber a partir de aguas salobres, colocando delgadas capas de agua expuestas al cielo nocturno; éstas se congelaban y después se realizaba su fusión lenta y controlada para obtener el agua sin sal. Esto indica claramente que el enfriamiento radiativo puede aprovecharse para diferentes propósitos.

Un ejemplo de la aplicación del fenómeno fue desarrollado por [Al-Nimr, 1998] y [Haddad, 2000], ellos proponen un sistema mejorado de destilación de agua, mediante la incorporación de un dispositivo de enfriamiento radiativo compuesto por un panel radiante y un tanque empacado de almacenamiento. En su modelo matemático incorporan en el desempeño del destilador diferentes datos climáticos, como la temperatura ambiente, la efectiva del cielo, radiación solar incidente, etc., así como las condiciones de operación. Consideran que durante la noche la temperatura del almacén alcanza de 10 a 25°C por debajo del ambiente, con lo cual la eficiencia del destilador se

incrementa. El modelo predice flujos de agua de 3-7 litros/m². En la (Figura 1.6), se muestra un diagrama del dispositivo diseñado por Al-Nimr y Haddad.

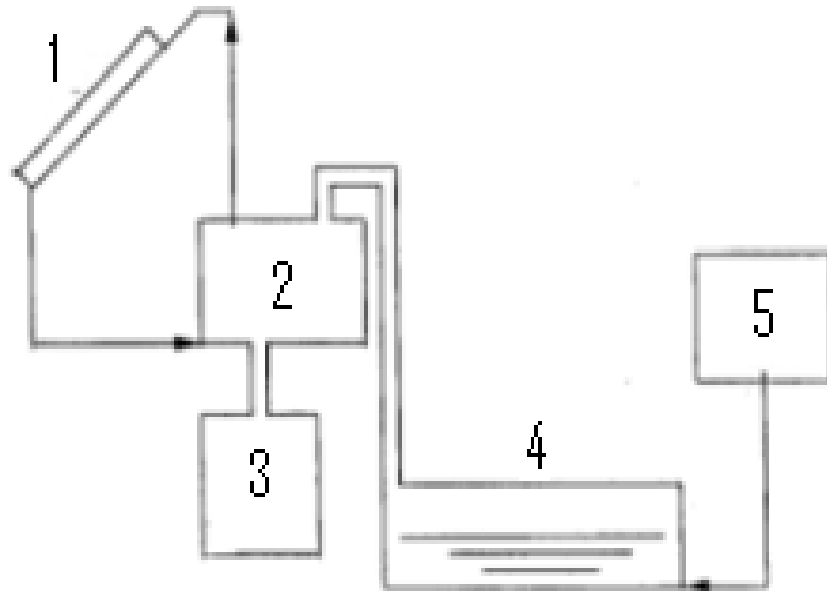


Figura 1.6 Diagrama esquemático de un condensador mejorado.

- 1 Panel enfriamiento radiativo
- 2 Condensador de cama empacada
- 3 Colector de agua pura
- 4 Destilador solar
- 5 Suministro de agua.

La utilización del enfriamiento radiativo en edificaciones también es un tema de interés. [Erell, 2000] estudia un modelo de enfriamiento nocturno infrarrojo en el que considera las características de diseño del radiador, las condiciones ambientales y la forma de operación del radiador de placa plana que circula agua en su interior.

El sistema podía alcanzar una diferencia de temperatura con la del ambiente de 15°C, en un tanque de almacenamiento de agua de 120 litros, con un panel emisor de 0.6 m²; la humedad relativa fue de 28-55% y la temperatura de 16 a 27°C. La potencia de enfriamiento nocturno encontrada es de 13 MJ/m² por la noche.

[Meir, 1999], realizó un experimento similar, en el cual investigó el potencial de enfriamiento radiativo de un dispositivo hecho a base de polímeros (Figura 1.7). Ésta forma parte de un sistema de calefacción doméstico. En su trabajo reporta una

temperatura de 5 a 7 K por debajo de la ambiente durante el transcurso de la prueba. La potencia de enfriamiento, bajo condiciones favorables, que calculó es de 40 W/m².

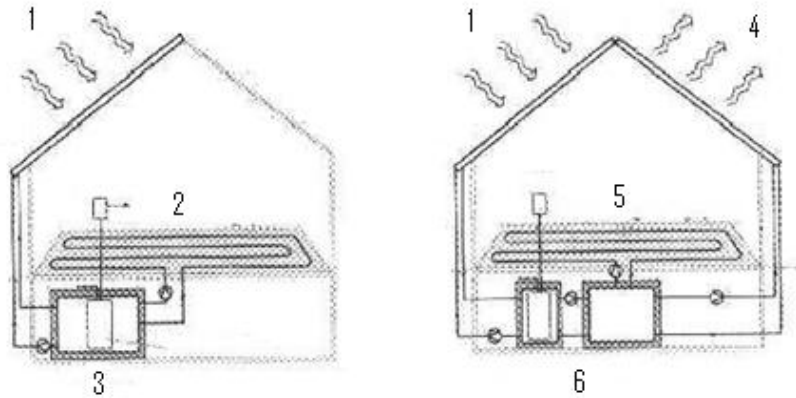


Figura 1.7 Diagrama esquemático de un sistema de calefacción y refrigeración solar.

- 1 Colector solar
- 2 Sistema de calentamiento de piso
- 3 Almacenamiento de calor
- 4 Radiador
- 5 Sistema de calentamiento-enfriamiento
- 6 Almacén de calor-frío.

Una vez mencionados los ejemplos anteriores se puede afirmar que el enfriamiento radiativo ha demostrado tener utilidad para diferentes aplicaciones, el estudio de tal fenómeno debe continuar para ampliar lo que se sabe de él, además de complementar y optimizar los sistemas existentes, con nuevos materiales y técnicas.

1.7. CLIMA LOCAL.

Como se ha mencionado anteriormente, el fenómeno de enfriamiento radiativo ha sido probado y utilizado en zonas con condiciones climáticas de humedad relativa baja, poca nubosidad y una altura de más de 1000m sobre el nivel medio del mar.

Esta tesis tiene como propósito evaluar el desempeño de un sistema de enfriamiento radiativo en una zona con clima cálido sub-húmedo, dentro del municipio de Temixco, Edo. De Morelos. A continuación se da una referencia breve de su ubicación y clima.

A continuación se presentan los datos geográficos del estado de Morelos:

a) Coordenadas geográficas extremas:

Norte 19°08', Sur 18°20' de latitud norte; al este 98°38', al oeste 99°30' de longitud oeste.

b) Climas:

Tipo o Sub tipo.	% de la superficie estatal.
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	67.83
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano.	18.80
Templado subhúmedo con lluvias en verano	9.70
Semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano	2.46
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	1.17
Frío	0.04

Tabla 1.1 Climas, tipo o Sub tipo. Fuente: INEGI. Carta de Climas

1.8. HIPÓTESIS.

El fenómeno de enfriamiento radiativo tiene el suficiente potencial para ser aplicado a diversas necesidades de enfriamiento, es posible aprovecharlo como una técnica de enfriamiento alternativa y de bajo consumo energético para diversas aplicaciones en climas secos o bien climas cálidos-sub húmedos.

1.9. JUSTIFICACIÓN.

Debido a la crisis energética actual, la demanda constante y creciente de ésta además de la contaminación emitida por muchos procesos de enfriamiento, es importante buscar y

estudiar técnicas alternativas que demanden menor cantidad de energía así como también que sean mas económicas y no generen agentes contaminantes.

CAPITULO 2.

“PRINCIPIOS FÍSICOS.”

2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de calor es una rama de la termodinámica que estudia los mecanismos bajo los cuales se transfiere la energía calorífica. Por otro lado el “calor” se define como una forma de energía en circulación que se manifiesta a través a una diferencia de temperaturas.

El calor siempre se transfiere de un cuerpo a cierta temperatura a un cuerpo de menor temperatura, hasta que ambos alcanzan una temperatura igual, este un proceso es llamado balance térmico.

La transferencia de calor se lleva a cabo de tres formas:

- Convección. Esta forma de transferencia implica la presencia de un fluido en movimiento, el calor en dicho fluido, se transfiere junto con el fluido de una zona de mayor temperatura a una zona de menor temperatura dentro del mismo fluido.
- Conducción. Esta forma de transferencia se presenta cuando dos cuerpos de diferentes temperaturas entran en contacto directo. En este caso el calor circulara a través de dicho contacto del cuerpo mas caliente al más frio.
- Radiación. Este caso se refiere a una transferencia de calor a través de la emisión de ondas electromagnéticas. Al igual que las formas mencionadas anteriormente, el calor se transfiere de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura. Todos los cuerpos que se encuentran a una temperatura superior a 0 K, emiten calor a través de radiación electromagnética con espectros de diferentes longitudes de onda en función de su temperatura. Esta forma de transferencia en particular es más importante que las dos anteriores dentro del contexto de éste trabajo ya que, el enfriamiento radiativo funciona a través de este fenómeno. Sus bases, principios físicos y naturaleza son presentados a continuación. [Susana N. Espinosa, Guillermo L. Masini 2000].

2.2. RADIACIÓN.

La radiación es una forma de transmisión de energía a través de un espacio, cuya propagación es de tipo ondulatorio. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética a una temperatura determinada. Una onda electromagnética consiste de campos perpendiculares eléctrico y magnético transversales a la dirección de propagación de la onda. Una onda no polarizada tiene muchos campos orientados en varias direcciones. Los campos eléctricos de una onda polarizada están alineados en una dirección dominante así como los campos magnéticos. La interacción de una onda electromagnética con la materia depende de su polarización. La onda electromagnética transmite energía desde su lugar de origen a un punto de absorción, a una cierta velocidad. Es propiedad de la cresta transmitir la potencia en un flujo de radiación. La energía es almacenada durante la transmisión en los campos asociados con la onda. Un flujo de radiación puede ser tratado como flujo individual de partículas llamadas fotones. La energía transmitida por el flujo radiativo es almacenada en los fotones, en donde cada uno es portador de una cierta cantidad de energía, ecuación 2.1

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 representa el poder emisor espectral, en donde (h) es la constante de Planck y (ν) la velocidad de propagación. Una onda esta caracterizada por una cresta, una amplitud y la distancia entre crestas, llamada longitud de onda (λ). La frecuencia es el número de crestas pasando en un punto dado por unidad de tiempo.

En general la radiación electromagnética tiene una dirección y velocidad de propagación, longitud de onda o frecuencia, estado de polarización y una cierta cantidad de energía que transporta. La velocidad de propagación de la radiación electromagnética en el vacío es de $C = 2.99.776 \times 10^8 \text{ m/s}$. En un medio diferente al espacio vacío, la velocidad se determina por medio del índice de refracción (n), el cual es característico del medio de propagación y varía a través del espectro electromagnético:

$$v = cn^{-1} \quad (2.2)$$

La frecuencia (f) es invariable a la propagación y (λ) depende del índice de refracción:

$$v = \lambda f \quad (2.3)$$

$$\lambda = n c f^{-1} \quad (2.4)$$

Las unidades de longitud de onda dependiendo del ancho de banda pueden ser Angstroms Å, nanómetro (nm) , micrones (μ) o micrómetro (μm), milímetro (mm), centímetros (cm), metros (m) e inclusive kilómetros (km).

2.3. DEPENDENCIA ANGULAR DE LA RADIACIÓN.

Para muchas aplicaciones prácticas se requiere la velocidad de propagación de la energía en una dirección dada. Esto se describe en términos de intensidad de radiación. Para lo anterior es necesario explicar el concepto de ángulo sólido, el ángulo sólido (w) se define como la relación del área (s), de una superficie esférica al cuadrado de su radio (R), siendo:

$$dw = \frac{ds}{R^2} \quad (2.5)$$

en unidades de sterradianes (Sr).

Por definición, la intensidad de radiación de una superficie es la velocidad de la propagación de la energía en una dirección dada por unidad de ángulo sólido y por unidad de área perpendicular al eje del ángulo sólido. Esta definición se aplica a: superficies negras y reales, energía saliendo de una superficie, tanto emitida o reflejada, energía incidente sobre una superficie proveniente del cielo o de cualquier otra fuente y en el caso de la energía espectral o total. (Incropera, Frank P. 1999).

2.4. FLUJOS DE RADIACIÓN.

La densidad de flujo interceptada por un cuerpo le corresponde el término de irradiancia, en unidades de $W m^{-2}$. La densidad de la energía recibida sobre un intervalo

dado de tiempo se le conoce como irradiación o exposición radiante en unidades de $J m^{-2}$.

En la literatura con frecuencia se utiliza el término de insolación como sinónimo de radiación solar, lo cual no es correcto, ya que la insolación se define como; “el acto de exponer o condición de exponerse a los rayos del Sol, o el período de duración de la radiación, irradiancia, radiancia, flujo radiante o densidad del flujo radiante”. También es frecuente encontrar la unidad Langley en unidades de $cal cm^{-2}$, sin embargo, ha caído en desuso. Para aplicaciones en ingeniería se utiliza $Wh m^{-2}$ ó $kW h m^{-2}$.

La Organización Mundial Meteorológica (OMM), recomienda utilizar la siguiente simbología:

Energía: $Q(J)$.

Potencia: $\dot{Q} (W \text{ ó } Js^{-1})$.

Energía referida a radiación: $\Phi(J)$.

Flujo de radiación o potencia referida a un flujo de radiación: $\dot{Q}(W)$.

Densidad de energía de radiación: $F(Jm^{-2})$.

Densidad del flujo de radiación: $\dot{F}(Wm^{-2})$.

Densidad de energía de radiación en una dirección dada: $L (Jm^{-2}Sr^{-1})$.

Densidad del flujo de radiación en una dirección dada: $\dot{L}(Wm^{-2}Sr^{-1})$.

Irradiancia: $I(Wm^{-2})$.

Exposición radiante: $H(Jm^{-2})$.

2.5. LEYES FÍSICAS DE LA RADIACIÓN.

2.5.1. Ley de Planck.

La ley básica propuesta por Planck, relaciona la intensidad energética de la radiación en cada longitud de onda a la temperatura de emisión de la superficie.

Idealmente esta ley se refiere a una superficie descrita como un “radiador perfecto“, o más rigurosamente como un “cuerpo negro”. Un “cuerpo negro” no sólo absorbe toda la radiación que incide sobre él, sino que también emitirá radiación en una manera únicamente dependiente de su temperatura. La intensidad y distribución espectral de la radiación emitida, depende de la temperatura del cuerpo radiante y de su naturaleza:

$$\frac{E_{em}}{E_{ab}} = f(\lambda, T) \quad (2.6)$$

en donde E_{em} y E_{ab} son las energías emitidas y absorbidas por el cuerpo, en esta última no se consideran las energías reflejadas o transmitidas. Para un cuerpo negro perfecto o ideal; $E_{ab} = 1$. Un cuerpo que emite radiación cuya intensidad es menor que la de un cuerpo negro a todas las longitudes de onda, se le llama “cuerpo gris“, cuya temperatura de emisión puede ser calculada a partir de la ley de Stefan-Boltzman, siendo esta más baja que la temperatura real. (Eduardo M. González C, 2002)

2.5.2. Ley de Stefan-Boltzman.

Esta ley establece que la cantidad total de energía emitida por un cuerpo caliente, por unidad de superficie y unidad de tiempo, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. La temperatura determinada de esta forma se le conoce como negra, efectiva o temperatura de radiación. De acuerdo a esta ley, la energía total emitida por un cuerpo negro por unidad de área (cm^{-2}) y tiempo (s) es igual a:

$$E_{em} = \sigma T^4 \quad (2.7)$$

En donde (σ) es la constante de Stefan-Boltzman y es igual a:

$$\sigma = \left(5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) \quad (2.8)$$

La ley de Planck esta referida a la distribución espectral de la energía de la radiación de un cuerpo negro:

$$E_{\lambda} d\lambda = \frac{(hc^2 / \lambda^5) \cos \theta d\lambda}{e^{(hc/k\lambda)-1}} \quad (2.9)$$

en donde $E_{\lambda} d\lambda$ es la cantidad de energía linealmente polarizada emitida por un cuerpo negro en equilibrio con sus alrededores por una unidad de área en la región $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$, por segundo y por unidad de ángulo sólido. En la ecuación θ es el ángulo con respecto a la normal al área emitida, (h) la constante de Planck $\left(6.626 \times 10^{-34} \frac{J}{s} \right)$ (k) la constante de Boltzman $\left(1.3807 \times 10^{-16} \frac{J}{K} \right)$ y (C) la velocidad de la luz. (Incropera, Frank P. 1999).

2.5.3. Ley de Wien.

Otra ley asociada a la de Planck es la ley de Wien, la cual establece que el producto de la longitud de onda correspondiente a la máxima energía en el espectro del cuerpo negro a la temperatura absoluta de emisión, por la temperatura es una constante o que la longitud de onda portadora de la intensidad máxima en el espectro emitido por un cuerpo caliente a una cierta temperatura absoluta, es inversamente proporcional a esta temperatura:

$$\lambda_{\max} T = 0.288 cmK \quad (2.9)$$

La temperatura de un cuerpo negro se puede determinar por medio de cualquiera de estas leyes. La distribución energética de la radiación de un “cuerpo negro” se puede estimar para cualquier temperatura. La energía total radiada por cada unidad de superficie y tiempo varía a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (K), esta ley es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann. La energía proveniente del espectro de la radiación solar esta distribuida de la siguiente manera: 9% corresponde al ultravioleta, el 41 % visible y el 50% al infrarrojo.

La potencia radiante media emitida por una superficie por unidad de área proyectada de la superficie en una unidad de ángulo sólido se le conoce como radiancia. Algunas veces se le llama esteradiancia o esterancia radiante. La potencia radiante emitida por una superficie punto a una unidad de ángulo sólido es la intensidad radiante de la superficie. La potencia radiante emitida en todas direcciones por unidad de área de una superficie es la emitancia radiante o radiancia. La potencia radiante por unidad de superficie incidente sobre una superficie es la irradiancia o incidencia radiante.

La absorción de radiación infrarroja por la materia produce un movimiento vibracional o rotacional de las moléculas o una combinación de ambos. Similarmente la emisión de radiación infrarroja esta acompañada por una disminución de la vibración o rotación. Sólo ciertas frecuencias discretas de vibración o rotación se permiten, y estas frecuencias corresponden a las frecuencias de la radiación la cual se absorbe o se emite. La intensidad de una banda de absorción infrarroja esta en función de la geometría y estructura electrónica de la molécula. (Incropera, Frank P. 1999).

2.5.4. Ley de Beer-Lambert.

De uso más práctico son: la transmitancia (τ) y la absortividad (a) a la frecuencia especificada, el espesor (b) y la concentración del componente en la muestra (c). Estos factores están relacionados a través de la ley de Beer-Lambert de absorción, la cual queda expresada como:

$$\tau(\nu) = e^{-a(\nu)bc} \quad (2.10)$$

2.6. NATURALEZA DE LA RADIACIÓN.

Todo objeto que se encuentre con una energía superior al nivel del cero absoluto, emite ondas electromagnéticas. Si su temperatura es relativamente baja, este emitirá sólo ondas de radio largas, con poco contenido energético. Al aumentar la temperatura, emitirán una mayor cantidad de ondas, empezando a emitir ondas de radio más cortas y con mayor contenido energético. Si la temperatura sigue aumentando, se emitirán microondas aún más energéticas y posteriormente radiaciones infrarrojas. Cada emisión de radiaciones no es exclusiva de una determinada temperatura, cada cuerpo emite toda la gama de radiaciones, existiendo una emisión máxima, es decir una gama de longitudes de onda que son las más radiadas.

El cuerpo humano emite ondas de radio a 37°C , siendo el máximo de radiación correspondiente a los infrarrojos largos. A unos 600°C , el máximo de radiación se encuentra en el infrarrojo corto, encontrándose en la región de la luz visible roja, reluciendo el cuerpo con un rojo intenso.

Si la temperatura sigue aumentando, el máximo de radiación continúa desplazándose hacia las longitudes de ondas cortas y cada vez más se emite luz visible de longitudes cada vez menores. Aunque se emite más radiación roja, se va agregando poco a poco luz anaranjada y luz amarilla en pequeñas proporciones, pero significativas. Al llegar a los 1000°C , la mezcla de los colores la percibimos como naranja y a los 2000°C como amarilla. Lo que en realidad vemos es la mezcla de los diferentes colores.

Al llegar a los 6000°C (la temperatura superficial del Sol), el máximo de radiación está en el amarillo visible y lo que percibimos son grandes cantidades de radiación visible, desde el violeta hasta el rojo. La incidencia simultánea de toda la gama de luz visible en nuestra vista nos produce la sensación del color blanco, y de ahí el color del Sol.

La temperatura de la Tierra, es el resultado del balance energético entre la energía incidente y las pérdidas térmicas, el cual dependerá de la estación del año, la latitud y altitud al nivel del mar. Un factor a considerar adicional a los anteriores, es la presencia de la cobertura vegetal, ya que esta absorbe la luz y la transforma en energía química a través del proceso de la fotosíntesis y finalmente los medios acuáticos que absorben la radiación en función de la profundidad, sustancias disueltas o partículas en suspensión.

En particular la región espectral del visible, se divide como sigue en la tabla 2.1.

4000 Å – 4300 Å	Violeta
4300 Å – 4900 Å	Azul
4900 Å – 5300 Å	Verde
5300 Å – 5800 Å	Amarillo
5800 Å – 6300 Å	Anaranjado
6300 Å – 7000 Å	Rojo

Tabla 2.1. Región espectral visible.

2.7. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES.

El término de “cuerpo negro”, se usa para describir una superficie ideal o material que obedece las leyes de Planck, Stefan - Boltzman y Wien. Una propiedad adicional del cuerpo negro es su calidad de absorción. Por definición un cuerpo negro absorbe toda la radiación, a todas las longitudes de onda incidente desde cualquier dirección. Esta propiedad origina que un “cuerpo negro”, ni refleja, ni trasmite la energía incidente.

El concepto de “cuerpo negro” sirve como una referencia útil para comparar las propiedades radiativas de las superficies reales con respecto a una superficie ideal.

Una superficie real reflejará y absorberá parcialmente la radiación incidente. Si una superficie no es perfectamente opaca, esta transmitirá parcialmente la onda incidente. Si consideramos una cantidad de radiación monocromática incidente sobre una superficie real, tenemos que:

$$1 = \alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (2.11)$$

con:

α_{λ} = absorptancia monocromática = energía absorbida / energía incidente.

ρ_{λ} = reflectancia monocromática = energía reflejada / energía incidente.

τ_{λ} = transmitancia monocromática = energía transmitida / energía incidente.

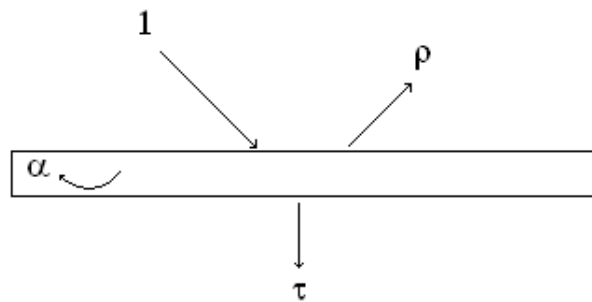


Figura 2.1 Representación del comportamiento de un cuerpo ante la luz incidente.

Ahora bien, de acuerdo con la Ley de Kirchhoff, que describe la relación entre las propiedades de emitir y absorber radiación de un cuerpo, la emisividad es igual a la absorptividad para una misma longitud de onda y dirección de propagación. Esto significa que, un cuerpo con una emisividad de 0.5 en el espectro infrarrojo también tendrá una absorptividad de 0.5 en ese mismo espectro de radiación. La emisividad, por otro lado, es fundamental para poder estimar las pérdidas de calor por radiación.

El flujo de energía emitida por una superficie opaca depende de la emitancia de y la temperatura esta. La *emitancia* de una superficie se define como la relación de la energía emitida a la energía emitida por un cuerpo negro,

$$e = Q_o / Q_{bb} \quad (2.12)$$

la emitancia depende de la longitud de onda, así como de la dirección.

2.8. MODELO FÍSICO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

Considerando los principios físicos implicados en el fenómeno radiativo, es posible describir el modelo físico que servirá como base para proponer un método experimental, con el cual, se pretende obtener datos sobre el rendimiento del sistema.

2.8.1. Elemento radiativo.

Es el elemento del sistema que reúne las características físicas adecuadas para que el fenómeno de enfriamiento radiativo nocturno se lleve a cabo de una manera eficaz. Tales características consisten en:

- a) Alta emisividad. El elemento radiativo debe poseer como una de sus cualidades físicas una alta emisividad con el propósito de potencializar el fenómeno de enfriamiento radiativo nocturno de nuestro modelo. Al tener una mayor emisividad habrá también un mayor efecto radiativo y en consecuencia un mayor enfriamiento.
- b) Área extendida. Por cuestiones prácticas de maniobrabilidad se ha decidido que el elemento radiativo consista en una superficie plana y extendida la cual, sea expuesta a la atmósfera de manera fácil y práctica. La figura 2.2 representa el elemento emisor.

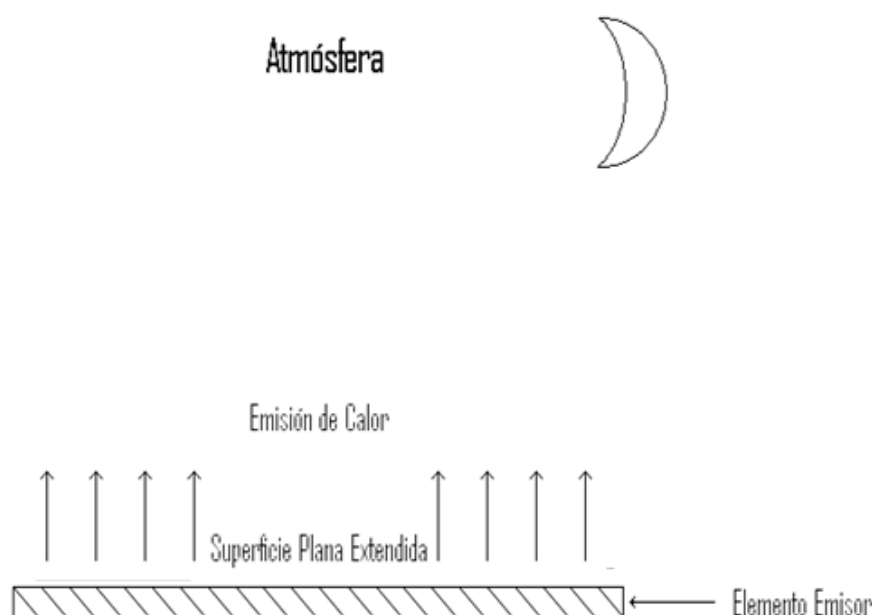


Figura 2.2. Elemento Emisor de calor

2.8.2. Elemento de aislamiento.

El elemento de aislamiento tienen la finalidad de conservar el frío alcanzado por el elemento radiativo. Las principales fuentes que pueden provocar una ganancia de calor pueden ser, el aire del ambiente y la emisión de calor de la superficie terrestre.

CAPITULO 3.

“ESTUDIO EXPERIMENTAL.”

3.1. PROTOTIPOS DE EXPERIMENTACIÓN.

El objetivo principal de esta tesis es analizar la capacidad o potencial de un sistema de enfriamiento radiativo nocturno a través de pruebas efectuadas a dos prototipos desarrollados en el (CIE), cuya única diferencia es el color en la superficie de sus radiadores; se a propuesto un estudio comparativo observando el comportamiento de un prototipo con un radiador cuya superficie fue cubierta con pintura blanca contra otro cuya superficie es pintada con pintura negra; a partir de esto y de otros factores como el clima, se observan sus comportamientos, por ultimo, en función de los resultados, será propuesto el sistema como una técnica alternativa de enfriamiento de bajo consumo energético para diversas aplicaciones.

El propósito del presente capítulo es describir y explicar de manera general el diseño de los prototipos, el material que los compone, su funcionamiento, el método de experimentación, los parámetros considerados y por ultimo los equipos, dispositivos e instrumentos utilizados en las pruebas.

3.2. DISEÑO Y MATERIALES DE LOS PROTOTIPOS.

3.2.1. Radiador.

Se integra por siete tubos, los cuales, se colocan horizontal y paralela uno con respecto al otro, éstos son llamados (travesaños); dos tubos mas llamados (cabezales) son colocados verticalmente en los extremos de los travesaños para finalmente conformar un arreglo tipo arpa. El material de los tubos es cobre al igual que las aletas. Cada aleta, esta hecha de una lamina de cobre delgada y es cubierta en su superficie por una capa de pintura cuya cualidad principal se espera que consista en una alta emisividad, esto facilita la transmisión de calor hacia la atmosfera e incrementa el potencial de enfriamiento radiativo. En la Figura 3.1 se muestra una representación del radiador.

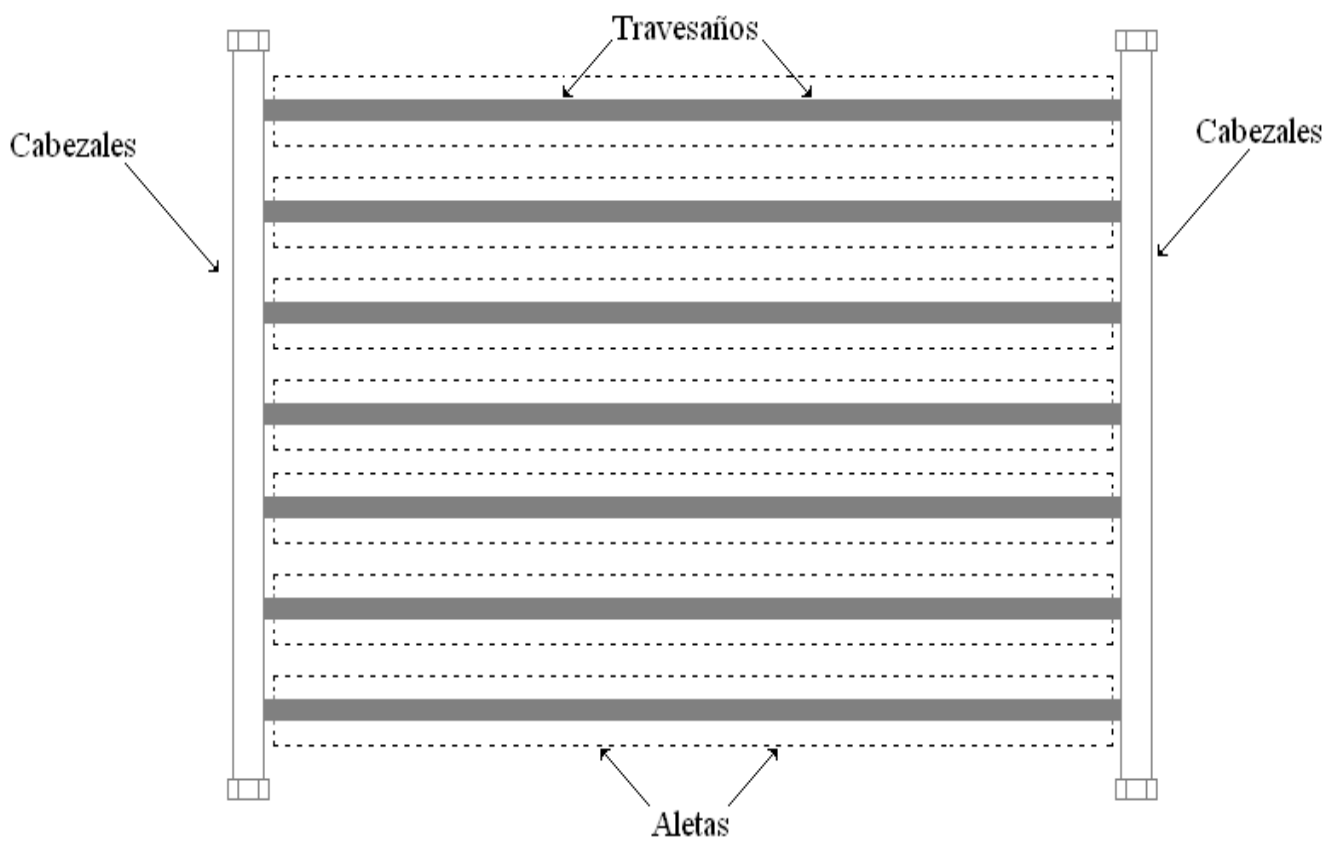


Figura 3.1. Radiador.

3.2.2. Panel aislante.

Con la intención de proteger al radiador de ganancias de calor circundante proveniente de diferentes fuentes disminuyendo con esto el potencial de enfriamiento del sistema, se integra un panel, el cual, aísla térmicamente el radiador. El radiador es colocado dentro del panel dejando expuesta la superficie del radiador a la atmósfera. El material del panel es poliuretano además de hojas de aluminio como marco, con esto, se pretende mantener aislado el radiador de ganancias de calor por convección del aire circundante, por radiación, principalmente del suelo y conducción igualmente del suelo. Figura 3.2.

3.2.3. Dimensiones.

El radiador junto con el panel de aislamiento tiene un área aproximada de 2m². Los travesaños son de ½” de diámetro y 1.7m de longitud aproximadamente, mientras que los cabezales son de ¾” de diámetro y 1m de longitud aproximadamente. Las aletas son de 1mm de espesor mientras que su longitud es de 1.7m aproximadamente.

3.2.4. Funcionamiento del sistema.

El enfriamiento radiativo nocturno es un fenómeno natural presente en todos los cuerpos, su intensidad depende de las propiedades ópticas de los materiales del cuerpo que emite y de ciertas condiciones climáticas, como la velocidad del aire, la humedad relativa y la nubosidad. El radiador es expuesto a la atmósfera, se espera que en el transcurso de la noche y bajo condiciones ambientales favorables el radiador emita su calor en un intercambio radiativo con la atmósfera, disminuyendo así la temperatura de sus superficie.

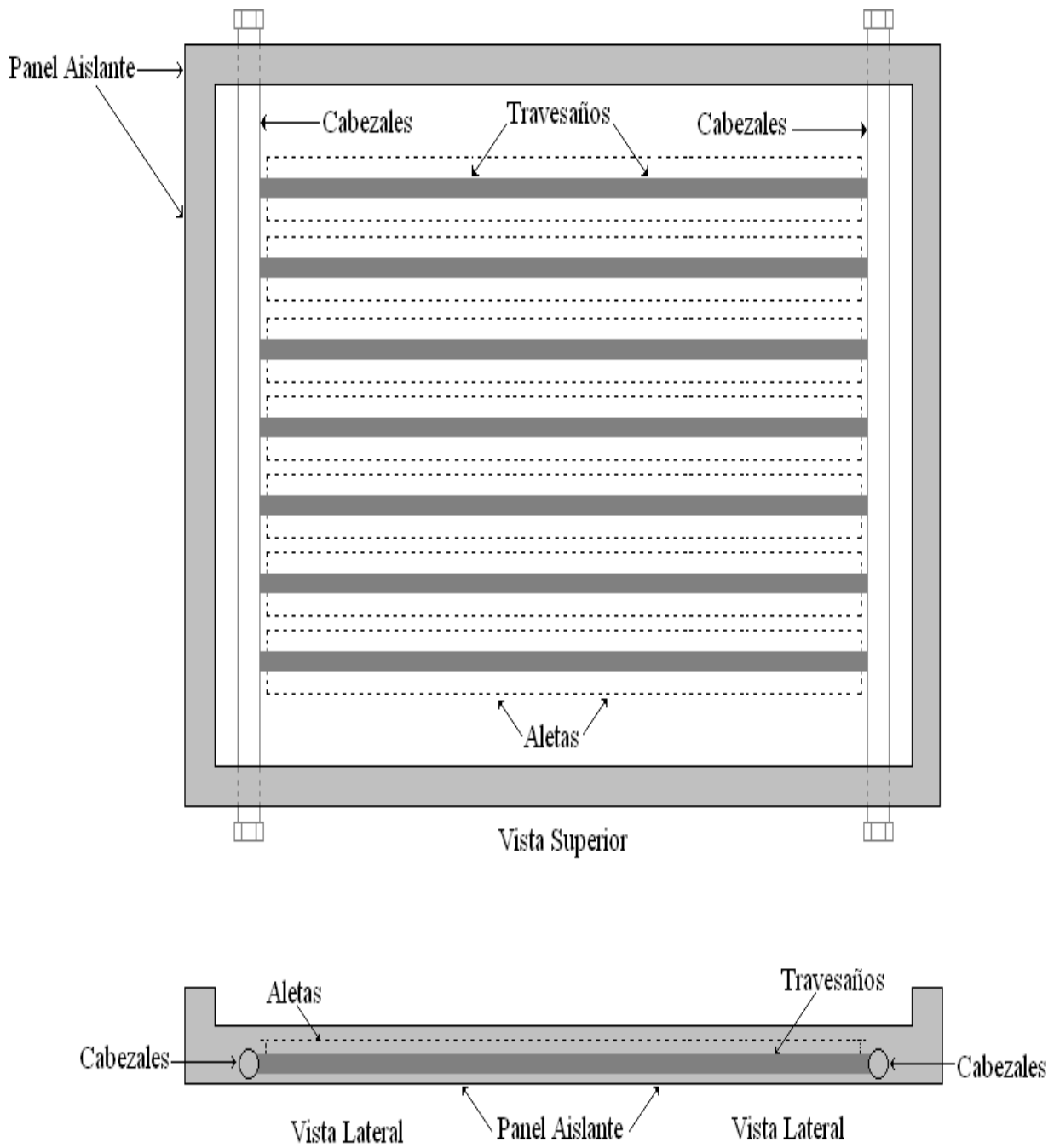


Figura 3.2. Radiador con panel aislante.

3.3. INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA.

3.3.1. Adquiridor de datos.

- **Reseña.** Los sistemas de adquisición de datos se utilizan para medir y registrar señales obtenidas básicamente de dos maneras: a) aquellas que se originan a partir de la “medición directa” de cantidades eléctricas, que pueden incluir voltajes de cd y de ca, frecuencia o resistencia; suelen hallarse en las áreas de prueba de componentes electrónicos, estudios ambientales, trabajos de control de calidad, procesos en lo cuales se involucran (temperaturas, presiones, humedad, radiación etc.), entre otras. b) Señales que se originan a partir de “transductores”, como galgas extensiométricas y termopares. Los sistemas de instrumentación se pueden clasificar en dos clases principales: analógicos y digitales. William D. Cooper, Albert D. Heifrick (2009). El sistema que se utiliza en éste estudio experimental es analógico/digital, la figura 3.3 representa el dispositivo de adquisición.

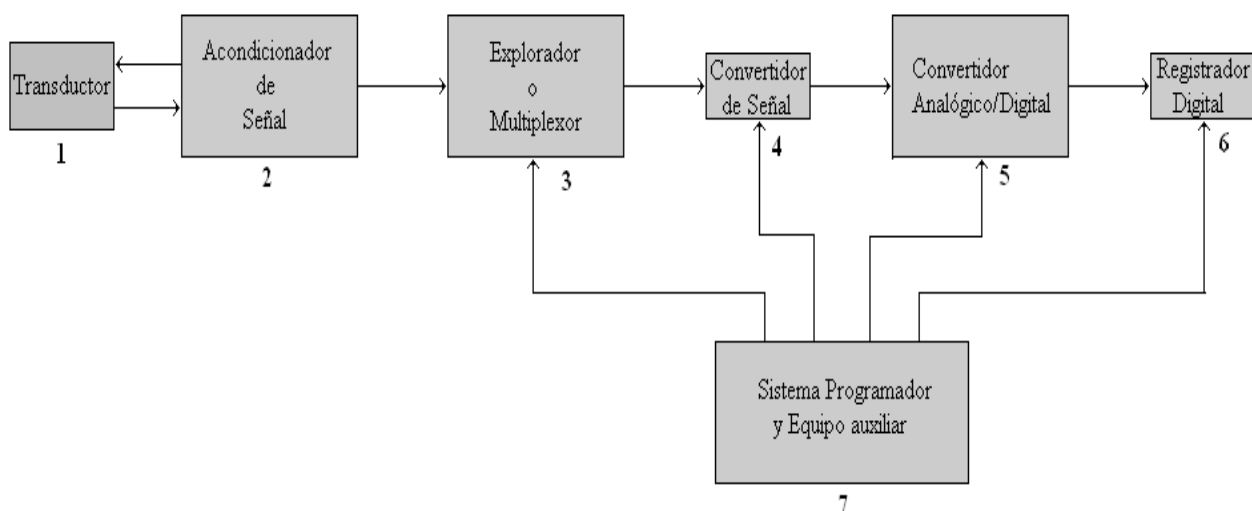


Figura 3.3. Diagrama lógico de un sistema de adquisición analógico / digital.

1. Transductor. Transforma parámetros físicos en señales eléctricas aceptables para el sistema de adquisición.

-
2. Acondicionador de señal. Son circuitos de soporte para el transductor, proporciona energía de excitación y equilibra la señal del sensor.
 3. Explorador o multiplexor. Acepta múltiples entradas analógicas y conecta secuencialmente a un instrumento de medición.
 4. Convertidor de señal. Transforma la señal analógica en una señal aceptable para el convertidor digital, amplificando las señales de bajo nivel de energía generados por termopares u otros sensores.
 5. Convertidor analógico digital A/D. Convierte el voltaje analógico a su forma digital equivalente para su posterior procesamiento, grabación y lectura.
 6. Registrador digital. Registra la información digitalizada en memorias electrónicas.
 7. Sistema programador y equipo auxiliar. “Computadoras” Contiene funciones de programación del sistema y procesamiento digital de datos. Las funciones auxiliares implican linearización y comparación de límites.
- **Fabricantes, marca y modelo del adquiridor utilizado.** Los fabricantes del dispositivo utilizado son HP Instruments, la marca corresponde a Agilent y el modelo es 2345. En la figura 3.4 se muestra el dispositivo.



Figura 3.4. Adquiridor de datos vista frontal.

-
- **Selección y justificación.** El sistema que se eligió para llevar a cabo la medición y captura de datos fue determinada por la versatilidad y la automatización del proceso. Debido a que las mediciones deben efectuarse durante la noche, fue necesario implementar éste dispositivo, ya que es automático y confiable, además de tener la facilidad para funcionar con computadoras convencionales y sus plataformas, por ultimo, se conecta de manera directa y sencilla a los sensores utilizados.
 - **Funcionamiento y características.** El sistema adquiridor de datos funciona conectando los sensores a una tarjeta, la cual, contiene puertos adecuados para dicho propósito. La tarjeta se introduce en el adquiridor, recibe las señales enviadas por los sensores, las amplifica, filtra y codifica, posteriormente dichas señales son recibidas por los circuitos internos del adquiridor donde son procesadas una vez mas, por ultimo la información procesada es transferida a una computadora convencional para su lectura y almacenaje dentro de una memoria electrónica (USB). La figura 3.5 muestra la tarjeta utilizada.



Figura 3.5. Tarjeta electrónica.

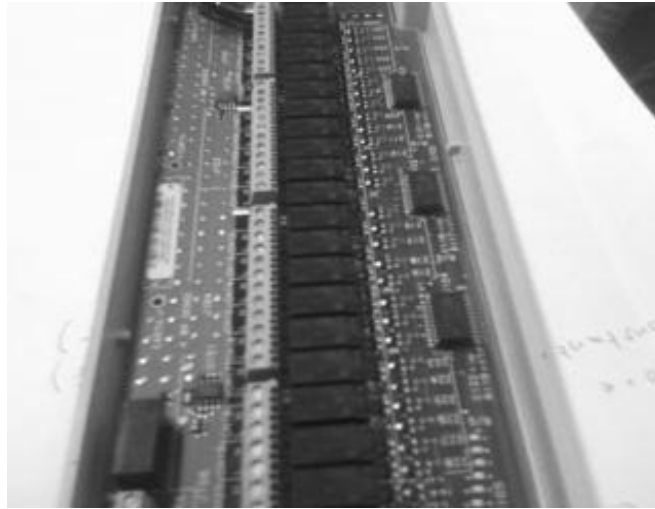


Figura 3.5. Tarjeta con puertos.

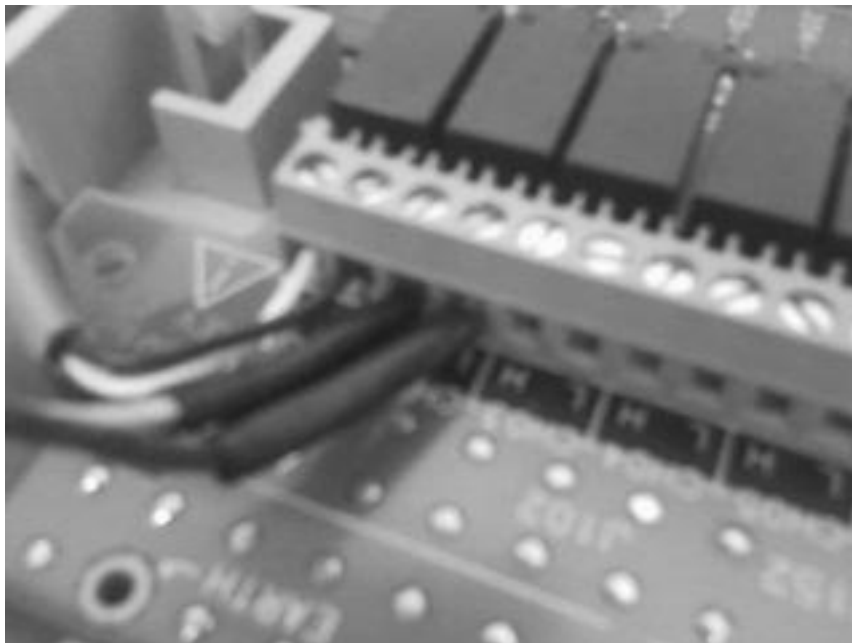


Figura 3.6. Terminales de los sensores conectados a los puertos de la tarjeta electrónica.

3.3.2. Programa HP VEE.

- **Descripción del programa.** HP VEE es un programa desarrollado por Hewlett Packard Co. Éste programa funciona con la plataforma Windows, se instala en una computadora personal o bien en una portátil,

-
- al mismo tiempo se configura con el adquiridor de datos. Una vez hechos los pasos anteriores se crea un sistema dentro del programa instalado utilizando herramientas dentro del mismo, se definen los parámetros bajo los cuales se pretenden llevar a cabo las mediciones, se definen los sensores que se utilizan, el intervalo de tiempo entre cada lectura, la hora en la cual es tomada cada lectura, el archivo en donde serán guardados los datos, etc.
 - **Funcionamiento.** El programa es una herramienta por el cual se comunica y controla el adquiridor de datos a través de la computadora, una vez iniciado, el programa funciona de manera automatizada. El programa tiene también la capacidad de corregir los datos aportados por los sensores; los sensores tienen un margen de error, para corregir tal error, se introduce una ecuación, la cual, es obtenida previamente de un proceso de calibración, esto se explica con detalle mas adelante.
 - **Aplicación.** El programa tiene la capacidad de llevar a cabo diversas funciones dependiendo de las necesidades, la naturaleza y los parámetros de diferentes tipos de experimentación. Para los propósitos de éste trabajo las aplicaciones son: lectura de los datos aportados por los sensores, corrección de las lecturas y captura de las mismas.

3.3.3. Equipo de cómputo.

Se utiliza una computadora cuyos requisitos son: que funcione con una plataforma Windows XP, que cuente con una velocidad de procesamiento mínimo de 1.8 GHz, memoria RAM de 256 M, y por ultimo que cuente con puertos USB para conectarla al adquiridor y extraer los datos obtenidos en cada prueba. En la figura 3.7 se muestra una ventana del programa utilizado.

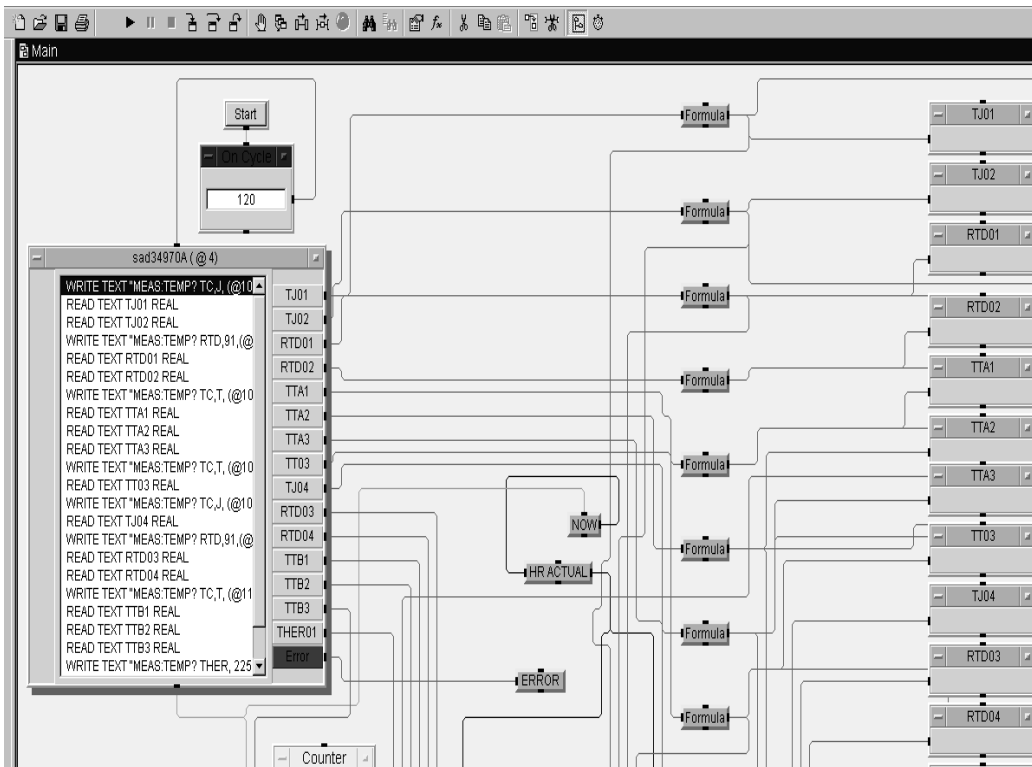


Figura 3.7 Ventana del programa utilizado.

3.3.4. Estación meteorológica.

Dos de los parámetros considerados en las pruebas, ya que afectan el desempeño de los prototipos, son la humedad relativa “RH” y la velocidad del viento “WV”. Los datos correspondientes a dichos parámetros son tomados de la estación meteorológica con la que cuenta el (CIE). Los datos de “RH” y “WV” son captados por la estación meteorológica y almacenados en el servidor del (CIE), tales datos se recopilan entrando a dicho servidor, posteriormente se consideran dichos datos para graficarlos e interpretarlos.

3.3.5. Sensores.

- **Reseña.** Los sensores pueden definirse como dispositivos electrónicos que convierten una variable física a un correspondiente valor eléctrico, éste puede estar en términos de corriente, voltaje ó resistencia. Los sensores, a su vez, pertenecen a los elementos de entrada de datos de un

sistema de control automático. Los sensores pueden clasificarse en: discretos y analógicos. Los sensores discretos simplemente indican si se

- encuentra detectado algún objeto ó no, esto es, generar un “1” lógico si detectan o un “0” lógico si no detectan; tal información es generada principalmente por la presencia de voltaje o por ausencia de éste, aunque en algunos casos la información es reportada por la presencia de corriente eléctrica. Los sensores analógicos se presentan como resultado de un número infinito de valores que pueden representar las diferentes magnitudes que están presentes en una variable física; por lo tanto, en los sensores analógicos su trabajo se representa mediante rangos.
- **Sensores de temperatura.** Entran en la categoría de sensores analógicos y son de los sensores más comunes dentro de las aplicaciones industriales. Dichos sensores son fabricados con diferentes características en función de las necesidades requeridas, pueden ser para medir temperaturas en fluidos o bien en la superficie de objetos.
- **Selección.** Se han seleccionado básicamente dos tipos de sensores de temperatura, estos son los RTD’s, termopares y termistores, los cuales se describen a continuación, su selección esta en función de su rango de operación y aplicación requerida.
- **Descripción.** Los sensores “RTD” (resistencias detectoras de temperatura) por **sus** siglas en ingles o “PT-100”, miden la temperatura en función de la variación de la resistencia eléctrica de su material de construcción, al experimentar cambios de temperatura. Por lo general la resistencia eléctrica aumenta con el incremento de temperatura. Los RTD utilizados son tipo PT-100, por su material de construcción (Resistencia de Platino de 100 Ohm), estos medidores tienen bulbo de 1” de longitud con 1/8” de diámetro y conexión a proceso de 1/2” NPT macho. Los sensores de temperatura RTD, sus características son: Rango de temperatura: De -180° a 620 °C, Presión de operación: Hasta 60 bar, su material del cuerpo es acero inoxidable 316, su tiempo de respuesta es de 0.5 s, y por ultimo su exactitud es de ± 0.3 °C, de la medición.

Los sensores “Termistores”, miden la temperatura en función de una variación en la resistencia eléctrica de un semiconductor, al experimentar cambios de temperatura. Por lo general la resistencia eléctrica aumenta con el incremento de temperatura. Los termistores utilizados son tipo

YSI, estos medidores tienen bulbo de 1" de longitud con 5/32" de diámetro y conexión a proceso de 1/8" NPT macho. Los sensores de temperatura termistores, poseen las siguientes características: Sensor tipo Termistor, rango de temperatura: de -50° a 150 °C, presión de operación: hasta 50 bar, material del cuerpo: acero inoxidable 316, tiempo de respuesta: 0.2 segundos y por ultimo exactitud: ± 0.1 °C, de la medición.

Los sensores "Termopares", miden la temperatura en función de la variación de voltaje generado de la unión de dos metales conocidos, en función de una diferencia de temperatura. Por lo general el voltaje de corriente directa aumenta con el incremento de temperatura. Los termopares utilizados son tipo J (fierro-constantan), estos medidores están incorporados en una placa de 25mm x 100mm y 0.2 mm de espesor en acero inoxidable, y se utilizan principalmente para medir temperaturas en superficies, aunque también pueden ser montados en conectores NPT. Sensor tipo Termopar, rango de temperatura: de -70° a 850 °C, presión de operación: hasta 50 bar, material del cuerpo: acero inoxidable 316, tiempo de respuesta: 1.0 segundos, exactitud: ± 0.5 °C, de la medición. B R. Bannister, D. G. Whitenhead (2009) Las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran los sensores utilizados.



Figura 3.8 Termopar de contacto tipo "T"



Figura 3.9 Sensores tipo RTD para fluidos.



Figura 3.10 Termistor. Sensor patrón.

3.3.6. Calibración.

Todos los sensores presentan un margen de error, dicho margen de error esta en función la precisión del sensor, de la calidad del mismo y en consecuencia de su

costo, no obstante es posible seleccionar sensores económicos cuyo margen de error pueda ser corregido a través de la calibración del mismo y con esto mantener un margen de calidad óptimo en la lectura de los datos. Dicho proceso se explica a continuación:

- **Material de calibración.** Se selecciona un sensor altamente preciso, aunque su costo es considerable, dicho sensor servirá como una referencia confiable para calibrar a los demás, dicha confiabilidad es certificada por el fabricante y por normas internacionales de calidad. Éste sensor servirá como sensor patrón.
- **Pruebas.** Una vez seleccionados los sensores que se desean calibrar, se someten a una prueba en la que tanto el sensor patrón como los sensores a calibrar se conectan al aparato adquiridor de datos.
- **Descripción del baño térmico.** Se utiliza un aparato (baño térmico) que consiste en un pequeño estanque, éste se llena con agua la cual, es calentada a través de una resistencia, la temperatura del tanque es homogeneizada por una pequeña bomba integrada que circula el agua constantemente. La temperatura de dicha resistencia es controlada por un sistema digital de precisión.
- **Procedimiento.** Los sensores son sumergidos parcialmente en el agua dentro del tanque y a través del adquiridor de datos y la computadora se registran los datos que aportan los sensores a diferentes temperaturas.
- **Captura de datos.** El proceso anterior comienza a una temperatura controlada de 25 °C los sensores registran dicha temperatura y el proceso continúa repitiéndose en un ciclo aumentando la temperatura 5 °C en cada ciclo hasta llegar a 50 °C. Una vez registradas las temperaturas de toda la prueba, se tabula y grafica el comportamiento de cada sensor y se compara con el comportamiento del sensor patrón.
- **Ecuación de calibración.** Una vez graficados todos los datos se extrae la ecuación correspondiente de cada grafica. Dicha ecuación es introducida en el programa HP VEE de adquisición de datos, el programa a través de la ecuación corregirá la lectura del sensor de manera automática calibrando con esto el sensor. Las figura 3.11, 3.12 y 3.13 se muestra el dispositivo utilizado.

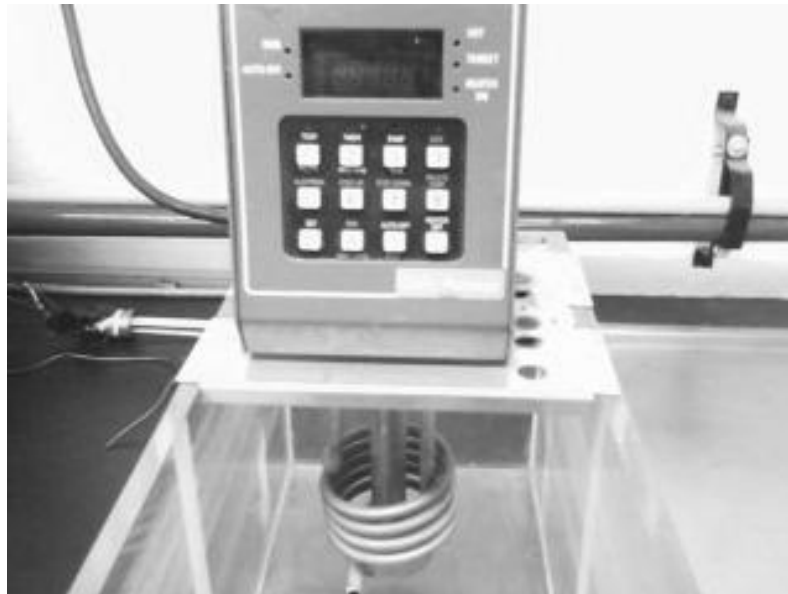


Figura 3.11 Vista frontal del tanque de agua térmico con el dispositivo de control de temperatura en la parte superior.



Figura 3.12 tanque térmico vista lateral.

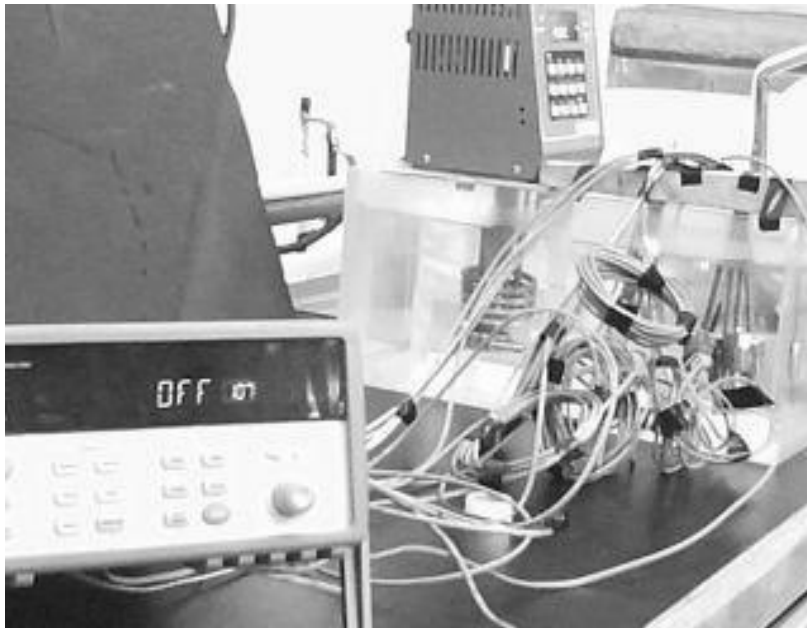


Figura 3.13. Proceso de calibración, a la izquierda el adquiridor y a la derecha el tanque con el control de temperatura y los sensores.

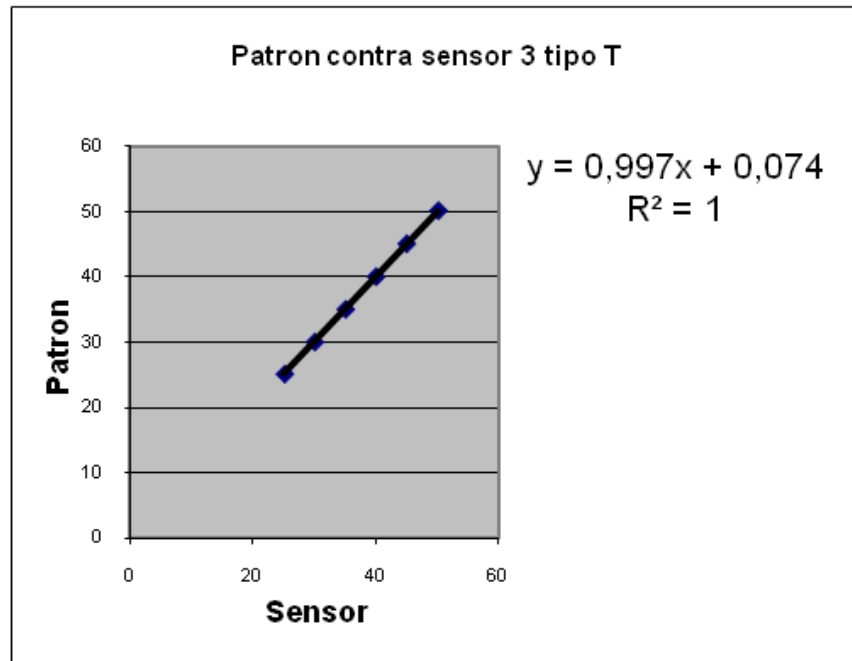
- **Ejemplo de datos de calibración.** A continuación se muestran unas tablas con sus graficas y ecuación obtenidas en el proceso de calibración de un sensor utilizado. En la tabla 3.1 se muestran los datos obtenidos durante las pruebas.

Datos del sensor patrón °C	Datos obtenidos del sensor a calibrar Termopar tipo T
25.147619	25.1406667
30.0328571	30.0289048
35.0223333	35.0580476
40.0042857	40.0092381
45.0134762	44.9924762
50.0572857	50.1511905

Tabla 3.1. Datos obtenidos durante la calibración.

- **Grafica y ecuación.** La grafica 3.1 muestra el comportamiento del sensor patrón contra el sensor a calibrar, a partir de la curva generada se

extrae la ecuación que será introducida en el programa HP VEE de adquisición, finalmente el programa corrige la lectura enviada del sensor para mostrar el dato correcto.

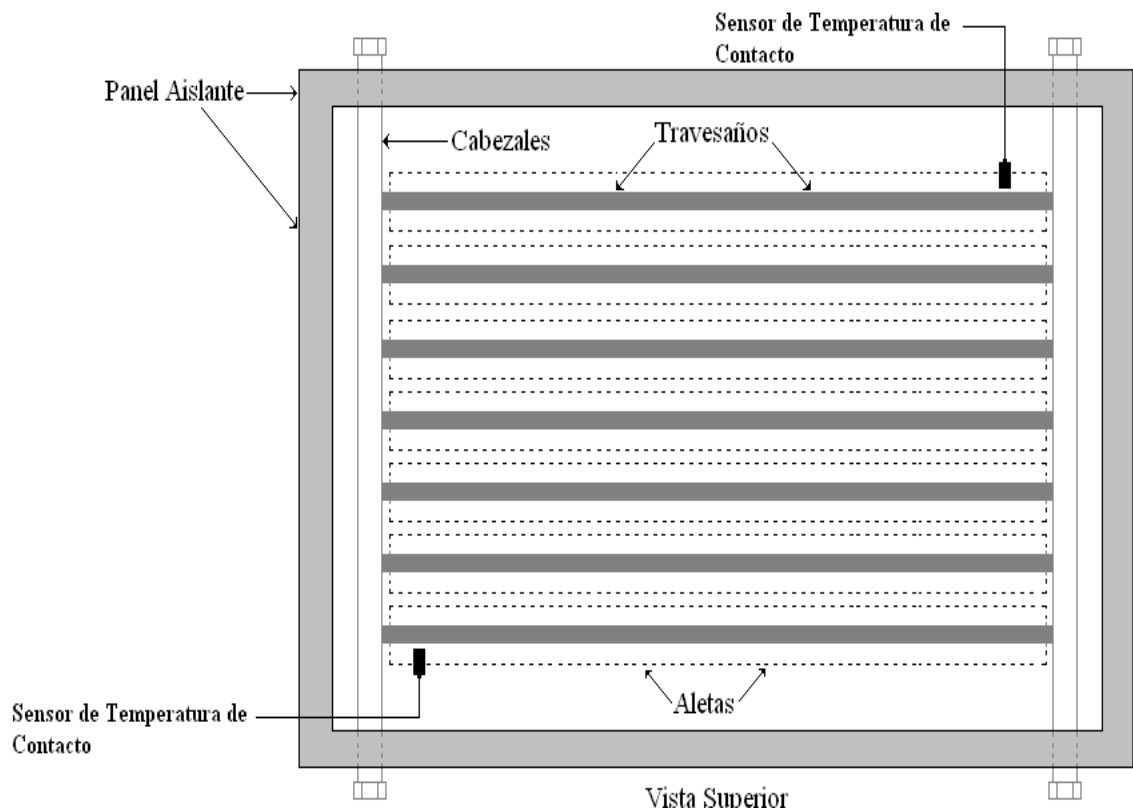


Gráfica 3.1. Se muestra el comportamiento del sensor patrón contra el sensor a calibrar. La ecuación de calibración se muestra del lado derecho.

3.3.7. Montaje del banco de pruebas.

A continuación se describe la distribución y el armado del banco de pruebas de los prototipos.

- **Base Dixon.** Para evitar que el radiador dentro del panel tenga un contacto directo con el suelo además de tener un mayor control y comodidad para trabajar con el radiador, se implementó una base sobre ruedas construida por ángulos Dixon sobre la cual es montado el panel. La figura 3.14 muestra una representación de la base junto con el panel.



3.1.5. Ubicación de los sensores de temperatura de contacto en el radiador.

- Conexiones.** Dos sensores de contacto tipo “T” son montados en cada radiador. Se colocan utilizando un pegamento térmico industrial que tiene como propiedad especial una alta conductividad térmica, gracias a lo anterior, el pegamento no afecta en la temperatura de los radiadores medida por los sensores. Los dos sensores son ubicados en la superficie inferior de las aletas, uno en una esquina del radiador y el otro en la contra esquina. La figura 3.16 muestra una representación de la ubicación de los sensores en el radiador.

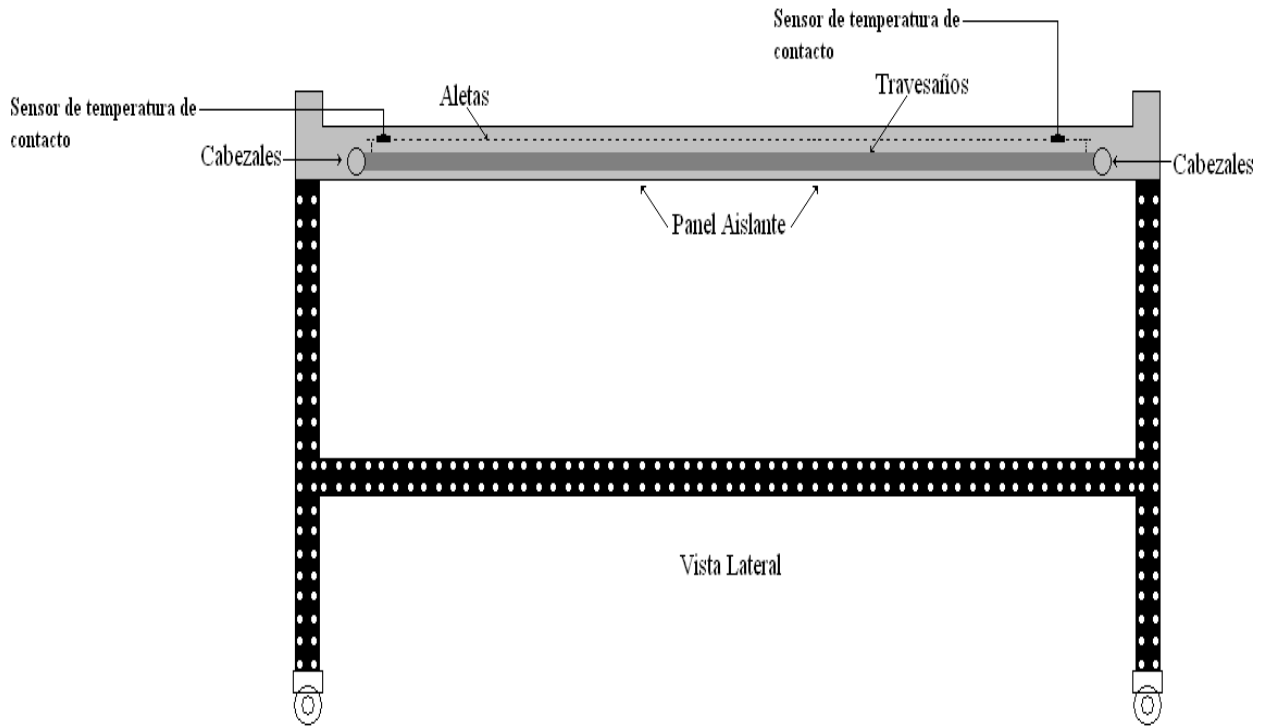


Figura 3.16 Panel sobre una base de ángulo Dixon.

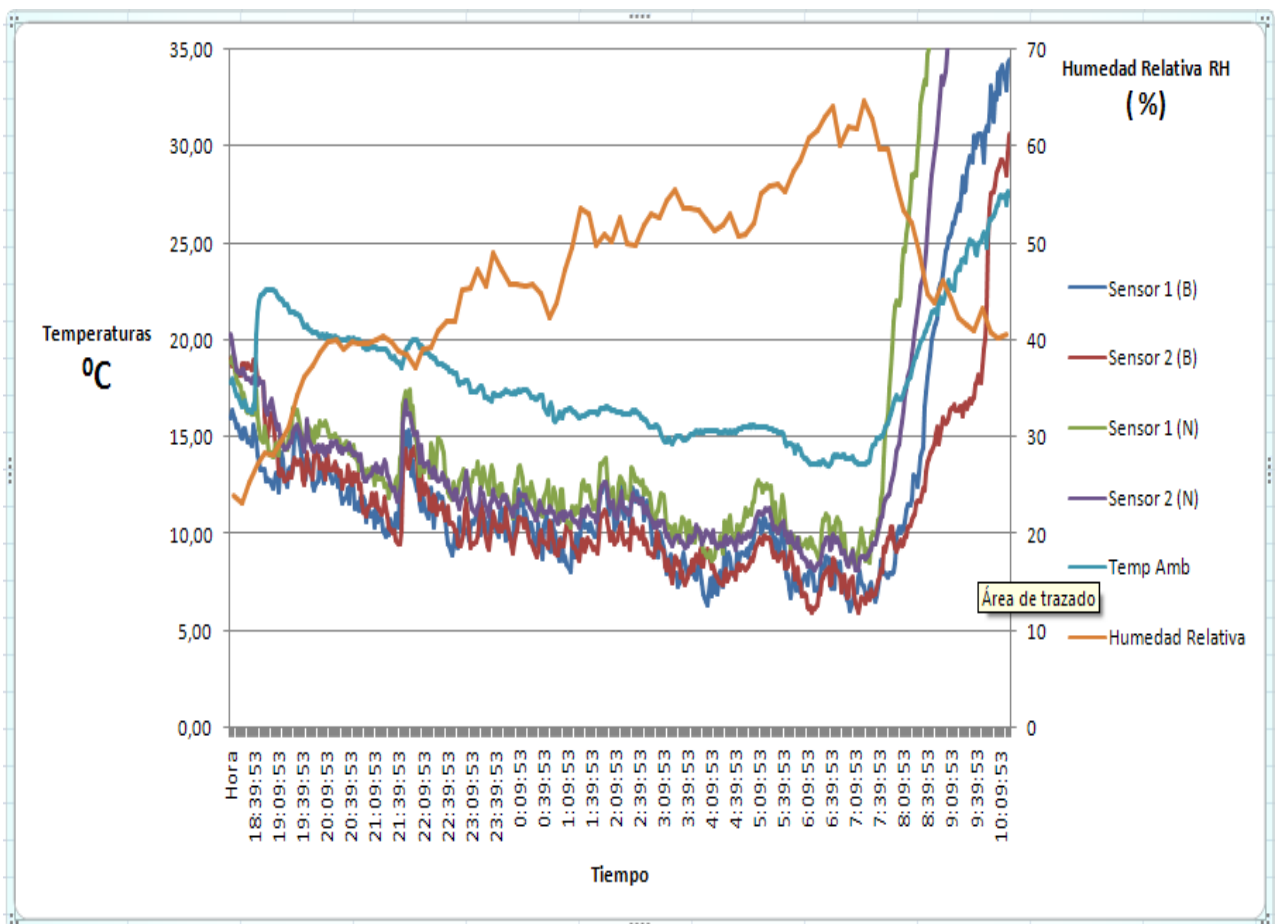
- **Instalación del resto del equipo.** Después de colocar los sensores se monta el adquiridor de datos y la computadora, éstos son resguardados dentro de un gabinete metálico para proteger el equipo del sol, la lluvia y otros factores ambientales. El programa HP VEE es configurado de acuerdo a los sensores y parámetros que se necesitan. La figura 3.17 muestra un diagrama del banco de datos.
- **Revisión.** Por ultimo se realiza una revisión de todo el banco de pruebas para verificar el correcto funcionamiento de todos los elementos.

3.4. PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Los prototipos son sometidos a diferentes pruebas, en cada prueba son modificados algunos parámetros operacionales en los prototipos en función de las observaciones efectuadas en la prueba anterior, a continuación se plantea cada prueba definiendo las condiciones en las que se ejecutó.

3.4.1. Prueba 1. Esta prueba se ejecuto bajo las siguientes condiciones:

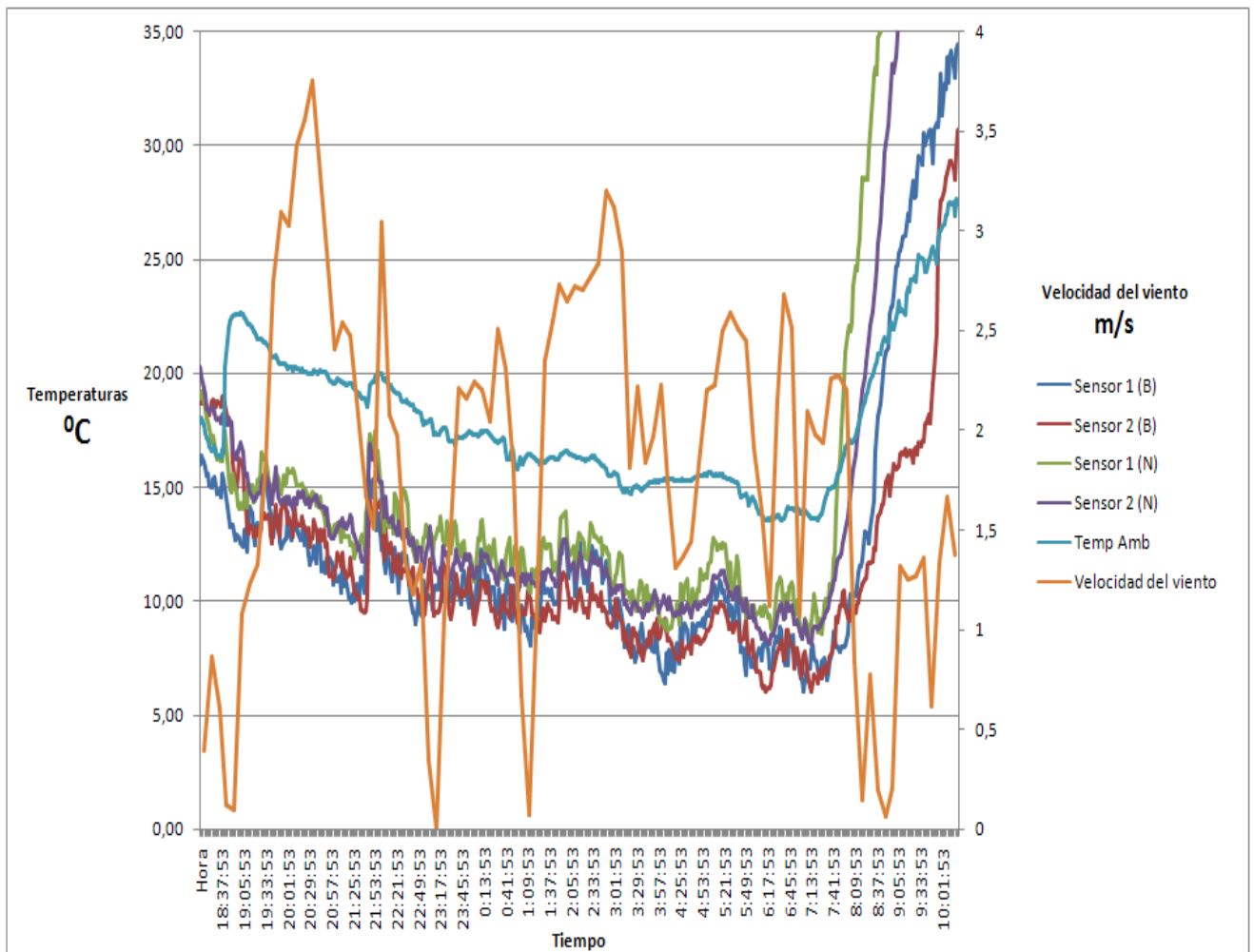
- **Procedimiento.** Se expuso el radiador hacia la atmósfera durante toda la noche, los sistemas de medición y adquisición de datos se encienden en cuanto el sol se oculta en el firmamento, a partir de éste momento los instrumentos funcionan automáticamente.
- **Observaciones preliminares.** Aunque no es posible determinar de manera cuantificada la nubosidad en el cielo, se hicieron observaciones encontrando un cielo despejado en su totalidad.
- **Resultados de la prueba.** La gráfica 3.1 muestra los resultados obtenidos los cuales se interpretan y comentan a continuación.



Gráfica 3.1.

- **Observaciones finales de la prueba 1 grafica 3.1.**

- En la Grafica 3.1 los sensores 1(B) y 2(B) corresponden a los sensores de contacto en la superficie del radiador blanco y dentro de la grafica corresponden a los colores (azul fuerte para el 1B y rojo para el 2B). La grafica demuestra una disminución en la temperatura en el radiador blanco durante la noche, la temperatura del aire (línea azul claro) permanece siempre arriba en una diferencia de 6 a 8 °C aproximadamente con respecto a la temperatura en la superficie del radiador blanco.
- Por otro lado los sensores 1(N) y 2(N) corresponden a los sensores de contacto en la superficie del radiador negro, dentro de la grafica corresponden a los colores verde para el 1N y morado para el 2N. La grafica muestra una disminución en la temperatura del radiador negro con respecto a la temperatura ambiente (línea azul claro) la diferencia entre ambos es de 5 °C aproximadamente.
- Al mismo tiempo la humedad relativa (en color naranja) revela que hay una relación con la temperatura en los radiadores durante la noche ya que cuanto mas alta es la humedad relativa, la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de los radiadores es ligeramente menor.
- El aumento final de las temperaturas en ambos radiadores corresponden a la salida del sol a partir de las 7:30 am aproximadamente.
- Se observó ligera condensación de agua sobre la superficie de ambos radiadores, esto se debe a que la temperatura en la superficie de los radiadores disminuye lo suficiente para condensar la humedad presente en el aire provocando que el agua comience a depositarse.



Grafica 3.2.

- **Conclusiones de la prueba 1 grafica 3.2.**

- De acuerdo con la grafica Las temperaturas en los radiadores disminuyen progresivamente conforme avanza la noche, sin embargo la disminucion no es constante, es decir, existe aumentos intermitentes de temperatura.

3.4.2. **Prueba 2.** Esta prueba se llevó a cabo considerando las siguientes condiciones:

- **Procedimiento.** Tomando en cuenta las observaciones de la prueba anterior se decidió instalar una película de polietileno que cubra el radiador sellando el panel por la parte superior. Por bibliografía se sabe que las películas de polietileno son transparentes a la emisión de luz infrarroja, el cual, es el rango en el cual emiten los radiadores que se analizan en éste trabajo, con ello, se espera que la película no afecte el desempeño de los radiadores. La figura 3.18 muestra una representación del radiador con la película de polietileno.
- **Observaciones preliminares.** Durante el arranque de los sistemas de medición se observó un cielo despejado.

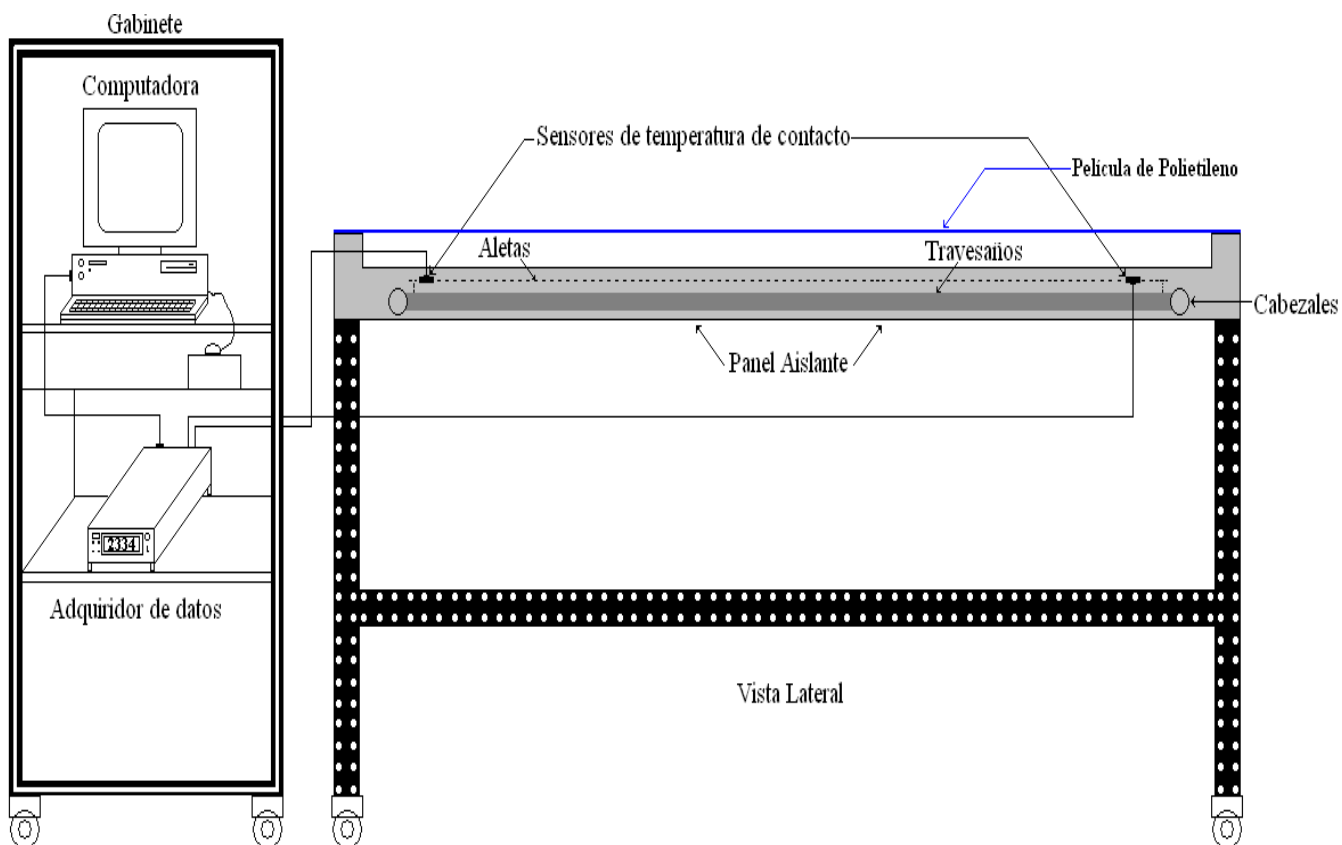
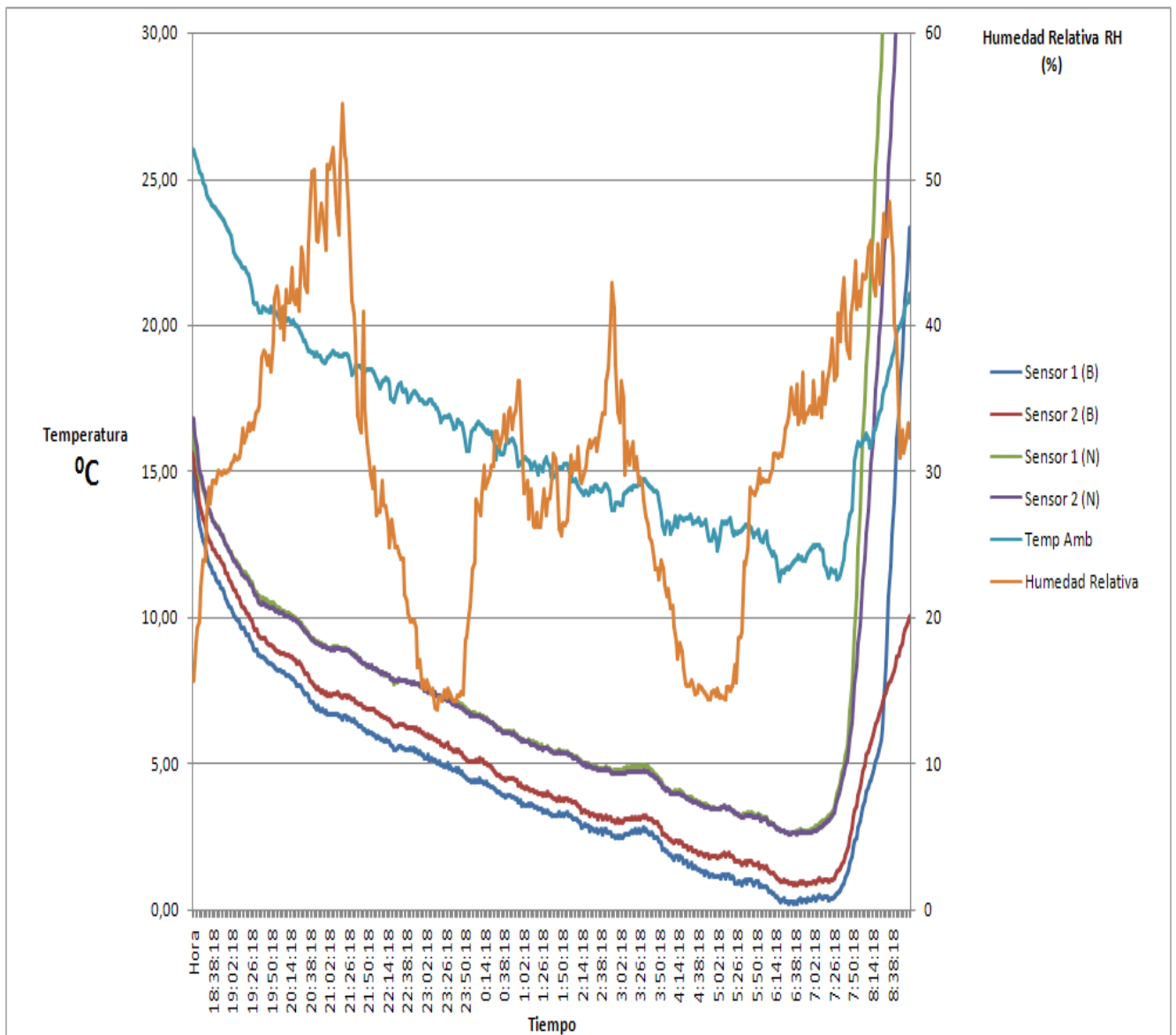


Figura 3.18. Radiador con película de polietileno.

- **Resultados.** Los resultados de la prueba 2 son reflejados, analizados e interpretados a través de la grafica 3.3.



Grafica 3.3

- **Observaciones finales de la prueba 2.**

- De acuerdo con los resultados de la prueba 2 reflejados en la grafica 3.3 la diferencia entre la temperatura ambiente y las temperaturas en los radiadores son mayores. Las temperaturas mínimas alcanzadas en los radiadores entre las 6:14 am y 6:38 am oscilan entre los 0 °C para el radiador blanco y 2 °C para el radiador negro, mientras que la temperatura ambiente en la misma hora oscila entre los 11 °C y 12 °C.
- Lo anterior implica un mayor abatimiento de temperatura y en consecuencia una mayor capacidad de enfriamiento, esto puede deberse entre otras cosas, a que la película de polietileno implementada aísla al radiador de las corrientes de aire convectivas circundantes dando al sistema una mayor estabilidad, ya que, la tendencia en la disminución de temperatura durante el transcurso de la noche, es mas estable y constante que en la prueba anterior.
- Se observó condensación sobre la película de polietileno, lo cual, implica que la temperatura del radiador aun con la película de polietileno es suficientemente baja para condensar agua sobre la película.

- **Conclusiones de la prueba 2.**

- La implementación de la película de polietileno demostró tener un efecto significativo en el desempeño de enfriamiento de los radiadores. Sin embargo, la condensación sigue presente, esto, puede causar una pérdida en el potencial del radiador por lo que será considerada la implementación de una segunda película de polietileno con la intención de reducir la cantidad de aire húmedo que rodea a los radiadores y evitar con ello dicha condensación.
- En esta prueba no es incluida la grafica correspondiente a la velocidad del viento debido a que al utilizar la película de polietileno, los efectos de la ganancia de calor por convección se minimizan y por consecuencia son despreciados.

3.4.3. Prueba 3. A continuación se mencionan las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo la prueba 3.

- **Procedimiento.** Para esta prueba se implemento una segunda película de polietileno con las mismas características de la primera película utilizada, pero, en esta prueba se decidió colocar la película sobre una estructura a dos aguas, “pero solo en el radiador blanco” mientras que el radiador negro permanece solo con la primera película. Se espera que dicha película cumpla con dos aspectos; el primero es que la cantidad de aire húmedo entre el radiador blanco; la primera película y la segunda disminuya considerablemente evitando con esto la acumulación de agua por condensación, la segunda consiste en provocar el escurrimiento de la poca condensación que se pueda formar sobre la segunda capa, gracias a la inclinación de la película a través de la estructura a dos aguas.
- **Observaciones preliminares.** Al arranque de esta prueba se observó un cielo parcialmente despejado. La figura 3.19 representa la segunda capa de polietileno colocada sobre una estructura a dos aguas por encima de la primera película de polietileno.

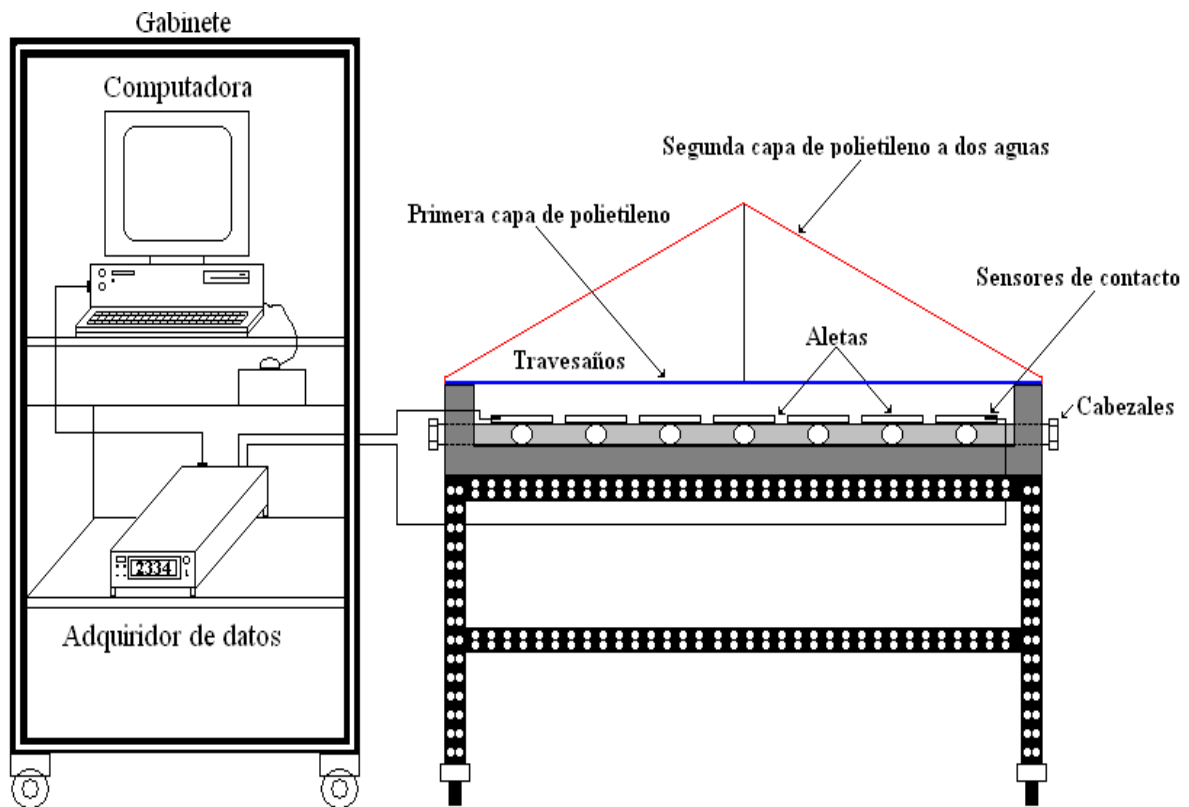
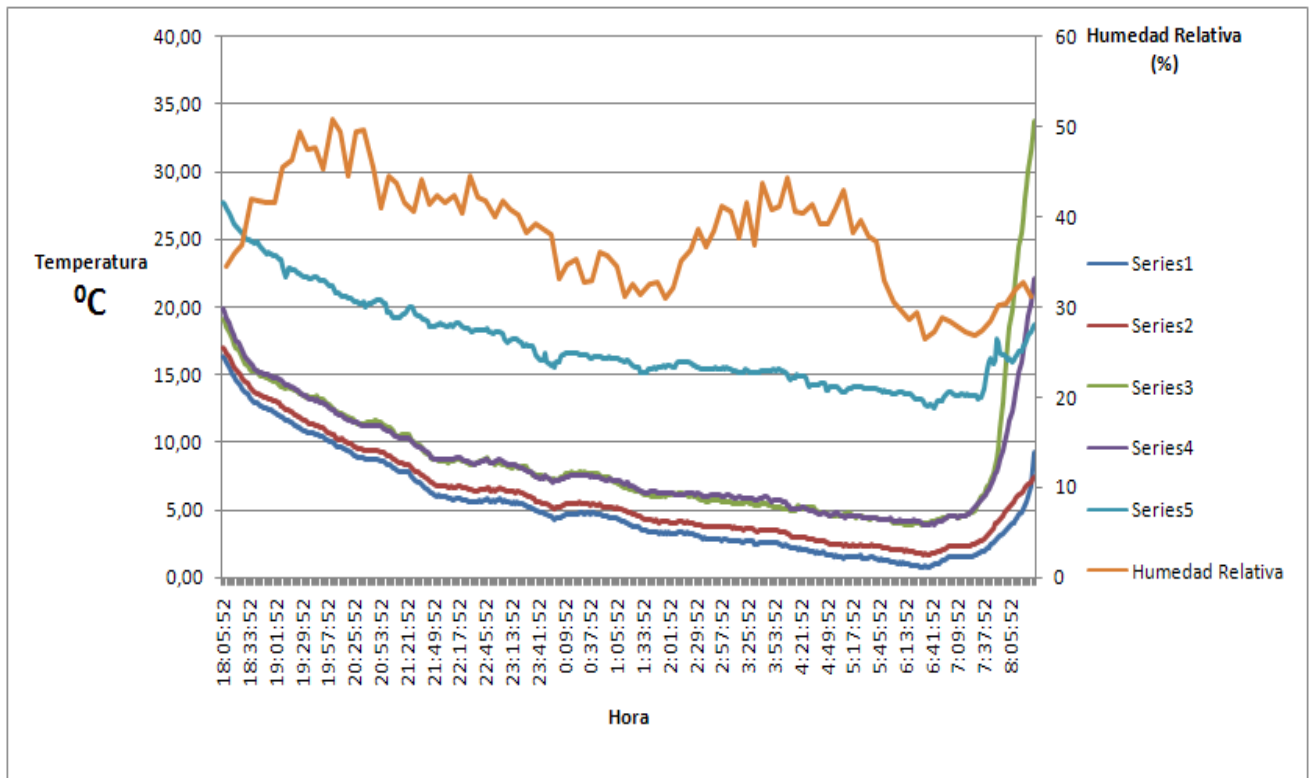


Figura 3.19. Sistema con segunda película de polietileno, vista frontal.

- **Resultados de la prueba 3.** Los resultados de la prueba tres son reflejados en la gráfica 3.20. Las observaciones finales y conclusiones se presentan a continuación.



Gráfica 3.4.

- **Observaciones finales de la prueba 3.**
 - De acuerdo con la grafica 3.4 la temperatura en el radiador blanco alcanzo una mayor diferencia con respecto a la temperatura del ambiente entre las entre las 6:15 am y las 6:30 am, su diferencia aproximada fue de 13 °C.
 - Por otra parte, el radiador negro alcanzo una diferencia de temperatura menor entre su superficie y la temperatura ambiente, su diferencia fue de 9 °C aproximadamente.
 - Se observó condensación sobre la película de polietileno del radiador negro, mientras que la superficie de la película de polietileno a dos aguas en el radiador blanco permaneció seca como se había supuesto.

- **Conclusiones de la prueba 3.**

- Debido a las observaciones anteriores y a los resultados mostrados en la grafica 3.4, se concluye que el uso de la segunda película de polietileno aporta a los radiadores un mayor desempeño en el enfriamiento.
- Al igual que en las pruebas anteriores, la grafica 3.4 continua indicando la influencia de la humedad en el proceso de enfriamiento radiativo.

3.4.4. Prueba 4.

- **Procedimiento.** Para esta prueba se decidió utilizar solo el radiador blanco debido a que demostró un enfriamiento ligeramente mayor. Se hará circular agua dentro de la tubería del radiador con la intención de observar con cuanta eficiencia puede ser extraído el frio generado, a través de un fluido de trabajo.
 - Se decidió utilizar agua como fluido de trabajo ya que es práctica y fácil de manejar.
 - Se instaló un sistema de tuberías y un termo tanque conectados al radiador. El agua circula desde un tanque térmico hacia la entrada del radiador, una vez dentro, el agua pasa por los travesaños y cabezales en donde se espera que ocurra un intercambio de calor entre el agua y el radiador para con ello enfriarla.
 - Una vez enfriada, el agua sale por otro extremo del radiador y circula hacia el termo tanque nuevamente para comenzar nuevamente el ciclo.
 - Se instalaron 3 sensores de temperatura tipo “T” dentro del tanque a diferentes niveles para registrar temperaturas en diversas capas

- de agua, esto tiene el objetivo de observar estratificación de la temperatura en el agua.
- Se instalaron 2 sensores tipo “RTD”, uno en la tubería de entrada al radiador y otro a la salida, con ello se desea conocer la temperatura del agua a la entrada y a la salida.
- Se instalo también un sistema de válvulas y un rotámetro en la tubería con el propósito de controlar el flujo de circulación del agua. La figura 3.20 muestra una representación del sistema.

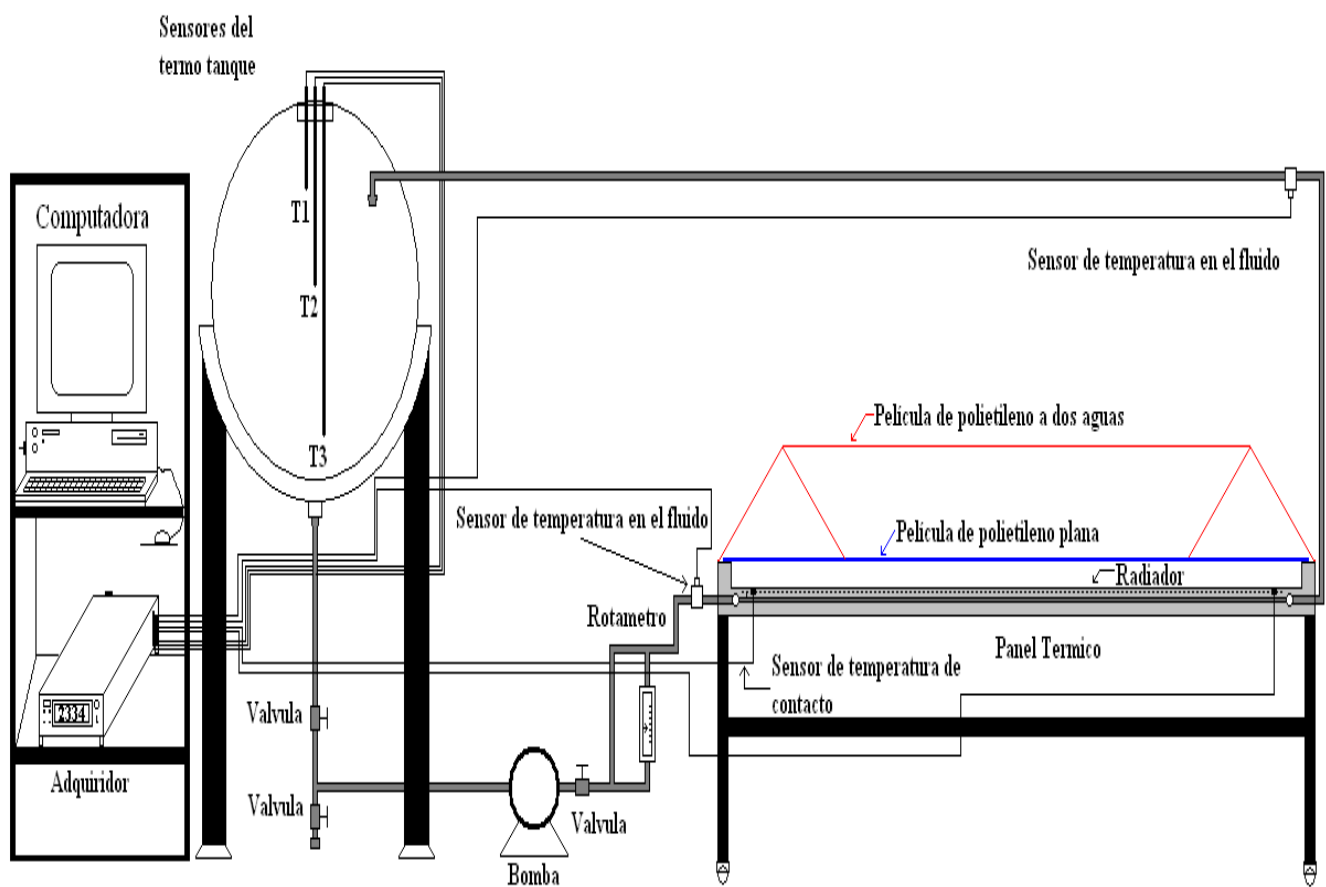
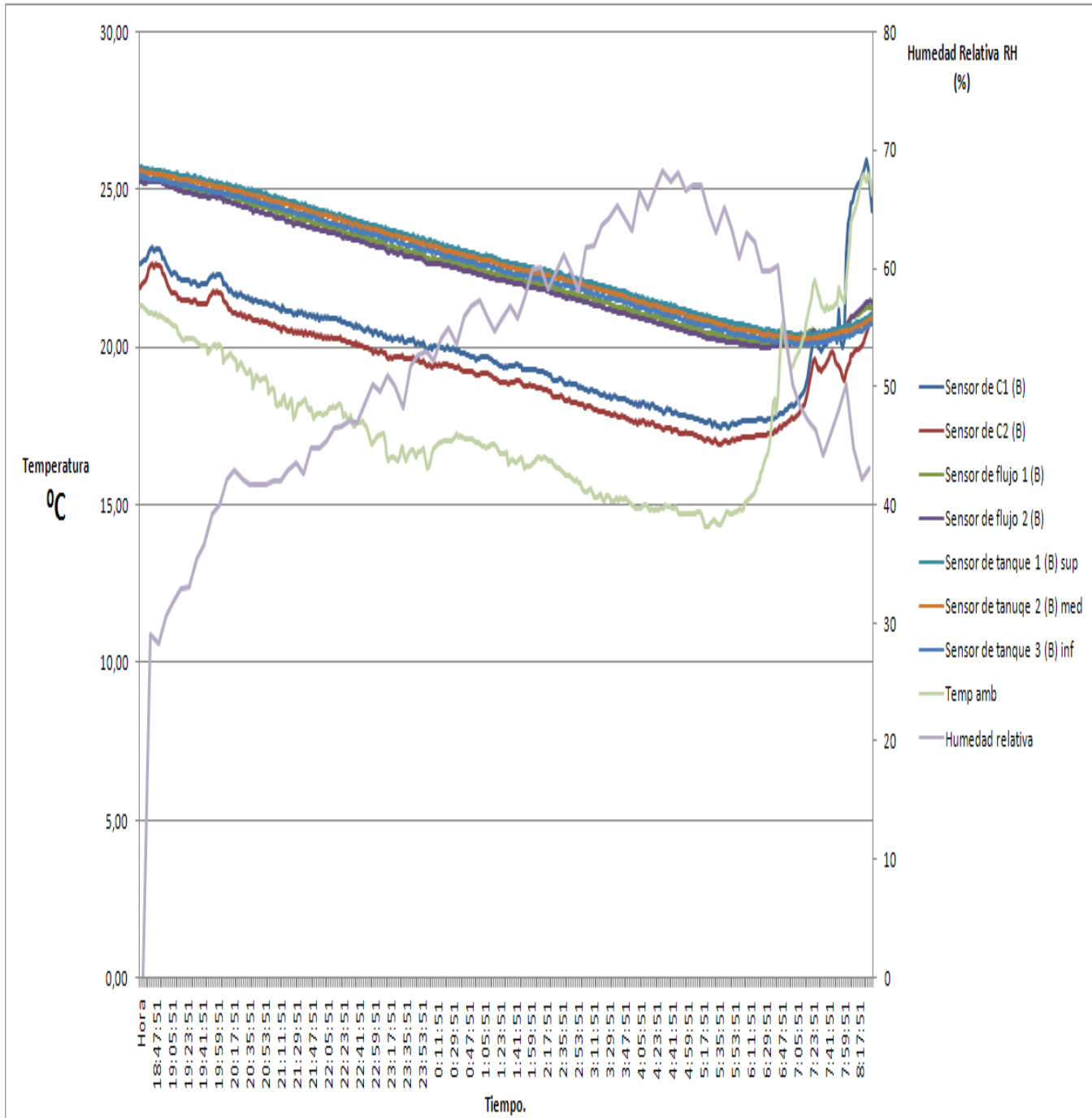


Figura 3.20

- **Observaciones preliminares.** La prueba se llevo a cabo con un clima de cielo despejado.

- La prueba se llevo a cabo ajustando un flujo de 2 L /min y con una masa de 15 L.

- **Resultados.** Los resultados obtenidos se reflejan en la gráfica 3.5, las observaciones e interpretación se mencionan a continuación.



Gráfica 3.5

- **Observaciones finales de la prueba 4.**

- De acuerdo con la grafica generada a partir de los datos obtenidos en la prueba 4 se observa que la disminución de temperatura en el agua de los tanques no alcanza las temperaturas de las pruebas sin circulación de agua. Esto se debe en parte a la cantidad de masa que se pretendió enfriar

(150L), tal cantidad es demasiada para las dimensiones del radiador y por consecuencia su potencial de enfriamiento.

- Las temperaturas en la superficie de los radiadores permanecieron alrededor de los 17°C a las 6:43pm, hora en la cual se registro la temperatura mas baja, mientras que la temperatura ambiente a la misma hora fue de 14°C . Sin embargo existió un enfriamiento en la temperatura en el agua, ya que la temperatura inicial en el agua dentro de los tanques fue de 25°C aproximadamente mientras que la temperatura mas baja alcanzada fue de 20°C . Lo anterior demuestra que existe un enfriamiento real en el agua.

- **Conclusiones finales de la prueba 4.**

- La prueba demostró que es posible enfriar un fluido de trabajo, sin embargo la capacidad para enfriar tal fluido a una temperatura mayor dependerá de las dimensiones del radiador, de las condiciones climáticas y de los materiales utilizados.

CAPITULO 4.

“CONCLUSIONES.”

4.1. CONCLUSIONES FINALES.

Durante las primeras tres pruebas fue demostrado que los prototipos poseen un potencial de enfriamiento considerable tomando en cuenta que las pruebas fueron efectuadas en un clima cálido sub húmedo. Se espera que bajo condiciones climáticas más favorables (climas secos) los prototipos demuestren un mayor potencial de enfriamiento.

Técnicas como el uso del polietileno demostraron tener gran utilidad para el desempeño de los prototipos ya que se observo un mayor enfriamiento. Estrategias como la anterior son sencillas de utilizar además de económicas.

La última prueba tuvo como propósito final extraer el frio alcanzado por los radiadores y observar cuanto de este frio alcanzado puede ser recuperado para diferentes propósitos. La cantidad de agua que se pretendió enfriar, las condiciones climáticas, las dimensiones del radiador y la velocidad en el flujo del fluido dieron como resultado un enfriamiento de 5⁰C en el agua del tanque, sin embargo estudios posteriores podrían pretender la optimización del proceso con la intención de alcanzar mayor potencial.

Finalmente, a través de las pruebas y observaciones hechas durante el desarrollo del presente trabajo es posible afirmar que el fenómeno radiativo aprovechado por sistemas de enfriamiento podría ser una alternativa viable para diversas aplicaciones y necesidades. Sin embargo, será necesario continuar investigando y estudiando sobre este tema para comprender mejor los mecanismos del fenómeno y desarrollar con ello más tecnologías que lo aprovechen de una manera eficaz y económica.

BIBLIOGRAFIA.

- 1) Al-Nimr MA, Kodah Z, Nassar B. Theoretical and experimental investigation of a radiative cooling system. *Solar Energy* 1998.
- 2) Benlattar M, Oualim EM, Mouhib T. Thin cadmium sulphide film for radiative cooling application. *Opt Commun* 2000.
- 3) B R. Bannister, D. G. Whitenhead. *Instrumentación Transductores e Interfaces*. Ed. Iberoamericana. 2009.
- 4) Erell Evyatar, Etzion Yair. Heating experiments with a radiative cooling system. *Build Environ* 1996.
- 5) Incropera, Frank P. *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta Ed. Prentice Hall México 1999.
- 6) Kablan MM. Forecasting the demand on solar water heating systems and their energy savings potential during the period 2001–2005 in Jordan. *Energy Convers Manage* 2003.
- 7) Kishore, V. V. N. *Renewable energy engineering and technology :principles and practice*. Editor. 2009. Pag. 2-4.
- 8) Lang SiWei. Energy efficiency in buildings – an important strategy for sustainable development. *Refrig Technol* 2004.
- 9) Mahanta DK, Saha Samir Kumar. Internal irreversibility in a water heating solar flat plate collector. *Energy Convers Manage* 2002.
- 10) M. Al-Nimr *, M. Tahat, M. Al-Rashdan. A night cold storage system enhanced by radiative cooling. *Australian cooling system*.
- 11) Mechanical Engineering Department, Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan 4 October 1998.
- 12) Miura N. Studies of radiative cooling systems for storing thermal energy. *ASME J Sol Energy Eng* 1989.
- 13) Mofreh R. Zaghloul. Emissivity and radiative cooling of weakly non-ideal high-temperature Flibe gas. *Science Direct* 30 october 2008.

14) R. Belarbi *, F. Allard. Development of feasibility approaches for studying the behavior of passive cooling systems in buildings. *Renewable Energy* 22 2001.

15) Sadooghi Parham, Aghanajafi Cyrus. Thermal analysis for transient radiative cooling of a conducting semitransparent layer of ceramic in high-temperature applications. *Infrared Phys Technol* 2006.

16) Santamouris M, Papanikolaou N, Livada I, Koronakis I, Georgakis C, Argiriou A, et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Sol Energy* 2001.

17) William D. Cooper, Albert D. Heifrick. *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición*. Prentice Hall 2009.

18) Yong Li, Sumathy K. Modeling and simulation of a solar powered two bed adsorption air conditioning system. *Energy Convers Manage* 2004.