

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE CIENCIAS

SECCION DE POSTGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACION PROFESIONAL



"ENFRIAMIENTO RADIATIVO"

TRABAJO PRACTICO

SEGUNDA ESPECIALIZACION PROFESIONAL EN ENERGIA SOLAR

PRESENTADO POR:

ING. RICARDO MOISES CAMPOS MONTES

LIMA-PERU

1998

# INDICE

## ENFRIAMIENTO RADIATIVO

	Pag.
RESUMEN	1
I. INTRODUCCION	2
II. OBJETIVOS	3
III. ENFRIAMIENTO O REFRIGERACION	4
3.1. Finalidad	4
3.2. Alternativas	4
IV. CONCEPTOS COMPLEMENTARIOS BASICOS	8
4.1. Radiación y Espectro Electromagnético	8
4.1.1. Radiación Térmica y Espectro	9
4.1.2. Emisividad, Irradiancia e Intensidad	9
4.1.3. Cuerpo Negro	11
4.1.4. Leyes que Gobiernan la Radiación del Cuerpo Negro	12
4.1.5. Propiedades Ópticas de los Cuerpos	12
4.2. Radiación Solar	15
4.3. Atmósfera	16
4.3.1. Composición	16
4.3.2. Efecto en la Radiación Solar	17
4.3.3. Radiación Atmosférica	18
4.3.4. Carta Psicrométrica	18
4.4. Transferencia de Calor	20
4.4.1. Conducción	20
4.4.2. Convección	21

4.4.3. Radiación	21
V. ENFRIAMIENTO RADIATIVO - INFORMACION DISPONIBLE	22
5.1. Consideraciones Generales	22
5.2. Posibilidad de Enfriamiento de un Cuerpo Negro	22
5.2.1. Modelos de Atmósfera.	23
5.2.2. Fórmulas Empíricas.	26
5.3. Enfriamiento con Superficie Selectiva.	27
5.4. Materiales Para Superficie Selectiva y cubierta protectora.	27
5.5. Potencia de Enfriamiento y Diferencia de Temperatura.	28
5.6. Aplicaciones.	31
VI. SISTEMA PROTOTIPO	32
6.1. Diseño y Construcción	32
6.1.1. Dispositivo Prototipo	32
6.1.2. Instrumentos de Medición.	33
1] Sensores de Temperatura	33
2] Higrómetro	35
3] Anemómetro	35
4] Radiómetro	35
6.1.3. Lectura y Almacenamiento de Datos- EL MODAS 84.	38
6.2. Resultados experimentales.	40
6.3. Analisis y Evaluación de los Resultados.	48
6.3.1. Cálculos para el Enfriamiento Radiativo Nocturno.	48
1] Consideraciones y observaciones	48

2] Parámetros a Calcular.	49
3] Balance Térmico	50
4] Enfriamiento en Función de $\Delta T$	52
6.4. Conclusiones y Sugerencias.	59
6.4.1. Conclusiones	59
6.4.2. Sugerencias	61
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
APENDICE	

## ENFRIAMIENTO RADIATIVO

### RESUMEN

En el presente trabajo se expone la posibilidad de aprovechar el mecanismo de transferencia de calor por radiación para "producir frío", sin uso de energía mecánica. Para tal fin se evalúa el enfriamiento de una superficie alojada en el interior de un dispositivo prototipo.

En la toma y almacenamiento de datos de los parámetros físicos de mayor incidencia, se han empleado sensores especializados que envían señales de entrada a un aparato electrónico (MODAS 84) que registra y muestra instantáneamente los valores medidos.

El MODAS 84 hace uso de un software que procesa la información almacenada y la presenta en forma tabular o gráfica, luego de transferir los datos a una computadora, empleando la interfase correspondiente.

Finalmente se analizan los datos recogidos y se extraen las conclusiones y sugerencias.

## I. INTRODUCCION

La posibilidad del enfriamiento radiativo queda de manifiesto si nos remitimos a los resultados de algunas experiencias, que citaremos brevemente:

- Tromb  en base a sus estudios que datan de aproximadamente 30 años, obtuvo con un simple aparato de laboratorio, en Francia, de 14 C a 30 C por debajo de la temperatura ambiente. [ 1]

Esta experiencia permitió que en el norte de Chile se hicieran experimentos similares, llegándose a conseguir hasta 40 C por debajo de la temperatura ambiente. [ 2]

- Catalanotti, obtiene con un radiador de cubierta selectiva de TEDLAR sobre plancha de Aluminio, potencias de enfriamiento de 50 W/m<sup>2</sup> en la noche y 20 W/m<sup>2</sup> en el día. [ 3]

- Eriksson y Granqvist han calculado para diferentes modelos atmosféricos las relaciones entre la potencia de enfriamiento y el descenso de temperatura, tanto para un cuerpo negro como para una superficie selectiva ideal. [ 4]

## II. OBJETIVOS

Con el desarrollo del presente trabajo se busca alcanzar los siguientes objetivos:

- \* Evaluar el enfriamiento radiativo nocturno de un cuerpo negro.
- \* Registrar datos relativos a:
  - Radiación solar global.
  - Radiación solar difusa.
  - Radiación atmosférica infrarroja.
  - Temperatura Ambiente.
  - Humedad Relativa, y
  - Velocidad del Viento,

mediciones que pueden ser utilizadas en el desarrollo de futuros trabajos.

### III. ENFRIAMIENTO O REFRIGERACION

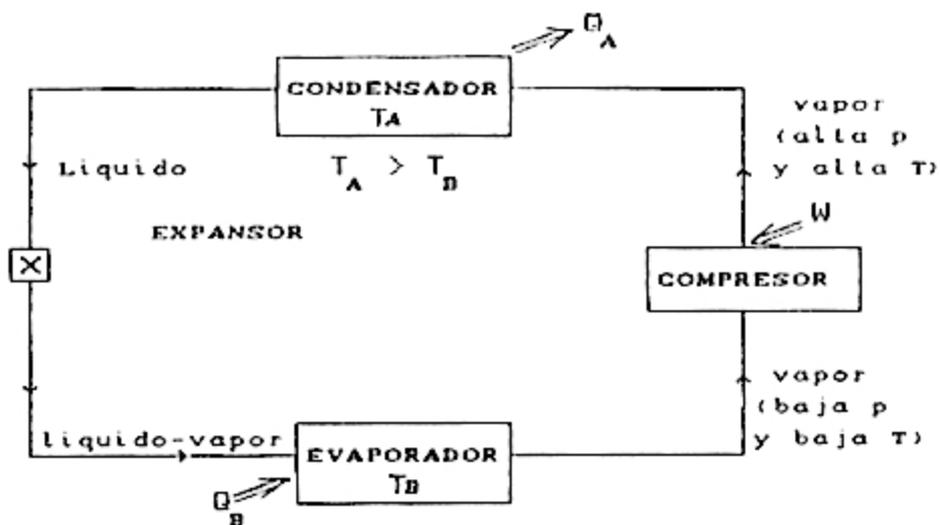
#### 3.1. Finalidad

El objetivo del enfriamiento o refrigeración es reducir la temperatura de un cuerpo por debajo de la que poseen sus alrededores, con fines diversos, tales como:

- Conservación de alimentos.
- Acondicionamiento de aire.
- Procesos industriales, etc.

#### 3.2. Alternativas

La refrigeración por compresión es la más común, la podemos explicar esquematizando la forma en que se interconectan los componentes básicos del sistema, en el cual la sustancia de trabajo (refrigerante) desarrolla un ciclo termodinámico de evaporación-condensación.



*Fig. 1. Sistema de Refrigeración por Compresión*

La refrigeración por absorción es otra posibilidad que se utiliza con frecuencia.

Una versión de este frigorífico se obtiene reemplazando el compresor por un subsistema que comprende: un absorbedor y un regenerador, tal como se muestra:

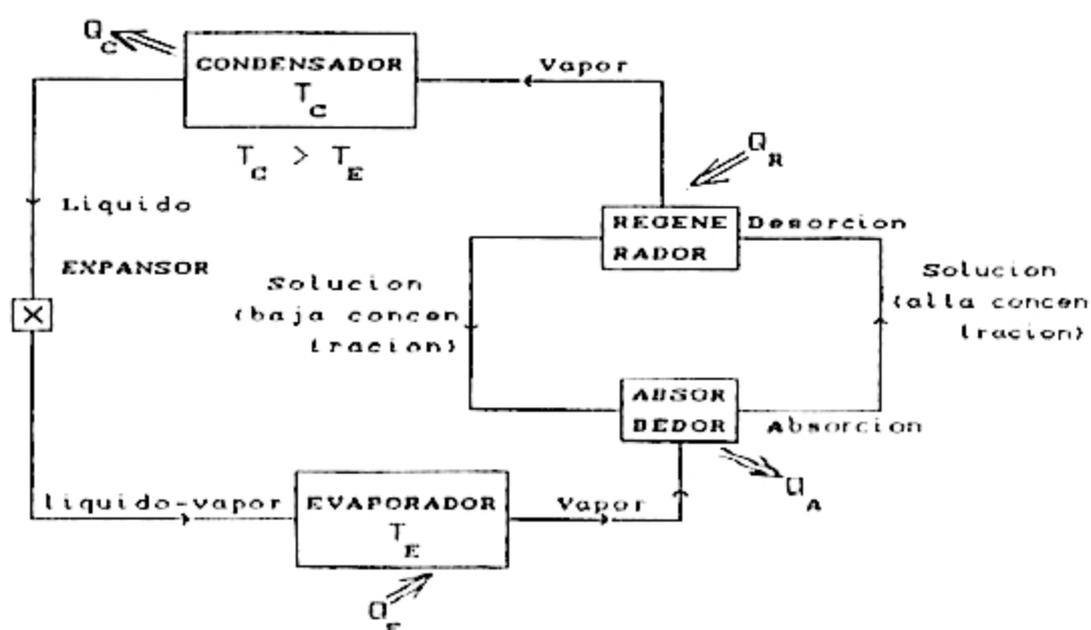
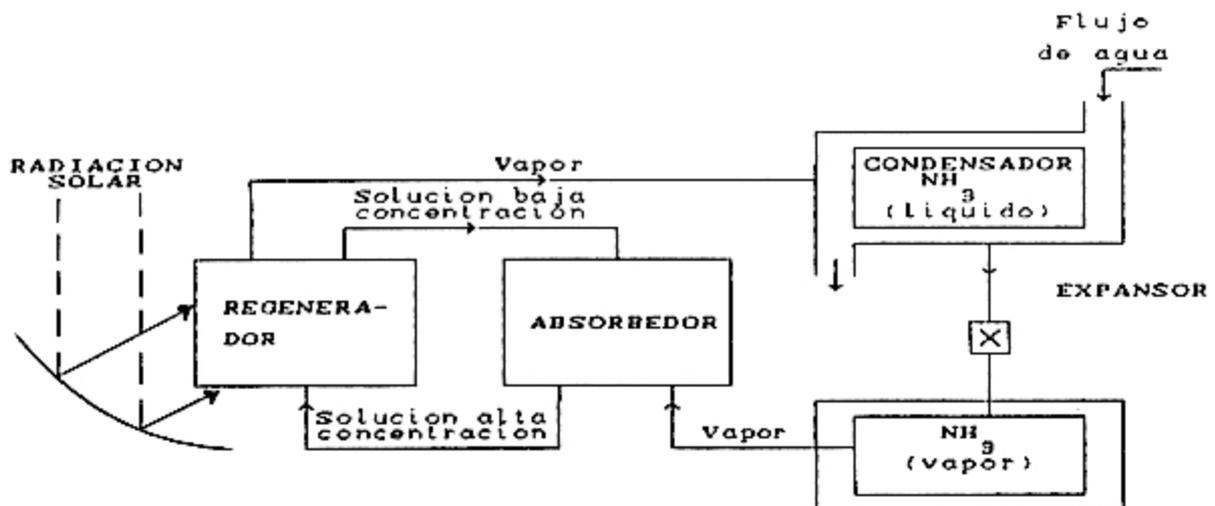


Fig. 2. Sistema de Refrigeración por Absorción

Las muchas aplicaciones del enfriamiento y la necesidad de éste, sobre todo en los países en vías de desarrollo, donde el costo de la electricidad y de los combustibles es elevado, ha despertado el interés por técnicas de refrigeración que utilicen la energía solar para "bombear el calor". Sin embargo los motores solares tienen un rendimiento bajo y normalmente es más sencillo y barato utilizar el sol directamente en un ciclo de absorción-vaporización, como se esquematiza:



*Fig. 3. Refrigeración por Absorción, con Energía Solar.*

Más interesante aún resultan los sistemas de enfriamiento pasivo, que no requieren de una máquina térmica; sin embargo son aplicables sólo bajo determinadas condiciones. Así se tiene:

- El enfriamiento por evaporación de agua.

En climas muy secos, el aire puede enfriarse fácilmente, evaporando el agua de paños húmedos o de bandejas extendidas. El enfriamiento por evaporación de agua se puede aproximar a un proceso de saturación adiabática, facilitándose su interpretación con el uso de la carta psicrométrica.

La evaporación del líquido desde la superficie libre se debe al movimiento térmico de sus moléculas, que al tomar calor del medio circundante escapan en un flujo neto hacia la atmósfera, si el aire no está saturado.

Incluso en los climas calientes y húmedos se puede conseguir un gran enfriamiento, deshumedificando el aire y

seguidamente evaporando agua para devolver parte de la humedad.

La humedad atmosférica se puede eliminar del aire con gel de sílice u otro agente higroscópico, que después se regenera al entregarle calor.

- El enfriamiento radiativo.

En lugares con cielo claro se puede conseguir un enfriamiento importante mediante un radiador de superficie negra, que emite radiación infrarroja hacia el cielo. En el desierto del norte de Chile se ha logrado el congelamiento del agua por este método, cuando la temperatura del aire es muy superior al punto de congelación. [ 5]

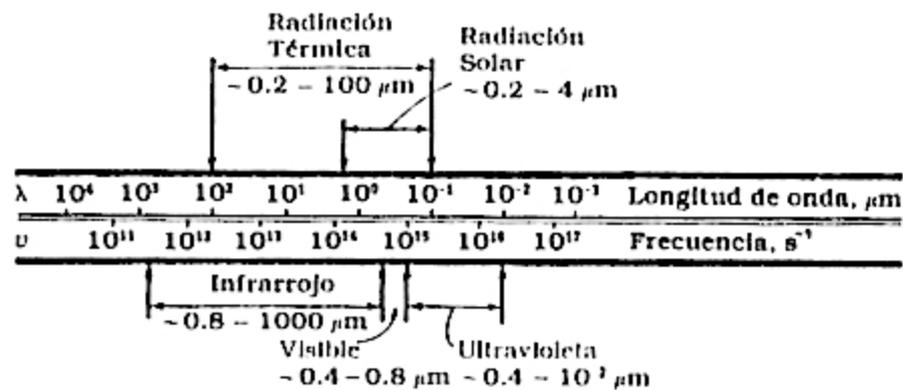
#### IV. CONCEPTOS COMPLEMENTARIOS BASICOS

Para explicarnos la producción de frío por radiación infrarroja hacia el cielo nocturno se precisan conocimientos previos asociados con la radiación, las propiedades del aire húmedo y la transferencia de calor. Seguidamente revisaremos los más importantes de estos conceptos.

##### 4.1.- Radiación y Espectro Electromagnético

La radiación puede considerarse desde dos puntos de vista: como ondas electromagnéticas o como un flujo de fotones que viajan por el vacío a la velocidad de la luz.

El espectro de radiación electromagnética es una representación lineal de las distintas bandas o intervalos de longitudes de onda que caracterizan (aproximadamente) los fenómenos físicos asociados con la radiación.



*Fig. 4. Espectro electromagnético*

#### 4.1.1. Radiación Térmica y Espectro

La radiación térmica es la energía electromagnética que una muestra de materia a cierta temperatura (T) emite, a consecuencia de la agitación térmica de sus partículas constituyentes.

Al graficar la distribución de dicha energía con respecto a la longitud de onda, se obtiene el espectro de radiación térmica, cuya explicación física se fundamenta en el concepto de cuerpo negro (C.N).

#### 4.1.2. Emisividad, Irradiancia, e Intensidad

##### - Emisividad

Es la potencia por unidad de área que un cuerpo emite en todas las direcciones.

La emisividad se denomina espectral o monocromática ( $E_{\lambda}$ ), si la potencia se refiere a una determinada longitud de onda; en cambio si se tiene en cuenta todas ellas, la emisividad será total (E).

##### - Irradiancia o Irradiación

Se define como la potencia por unidad de área que incide sobre una superficie. La potencia procede de todo el espacio hemisférico que rodea a la superficie. En base al mismo criterio utilizado para la emisividad, la irradiancia puede ser: monocromática ( $G_{\lambda}$ ) o total (G).

##### - Intensidad

Para tener en cuenta la dirección de emisión o irradiación de la energía, se define la intensidad

(I). Esta es la potencia (por unidad de área efectiva) delimitada por un  $\angle$  sólido unitario, generado en el entorno de la dirección de interés.

El área efectiva corresponde a una superficie perpendicular a la dirección en la que se desea hallar la intensidad.

Es decir, para la emisión de energía:

$$dE = I \cos(\theta) d\Omega$$

donde:

- dE : diferencial de emisividad (W/m<sup>2</sup>)
- I : Intensidad (W/m<sup>2</sup>Sr)
- dΩ :  $\angle$  sólido diferencial (Sr)
- $\theta$  :  $\angle$  entre la dirección de emisión y la  $\perp$  a la superficie emisora (unidad de  $\angle$ )

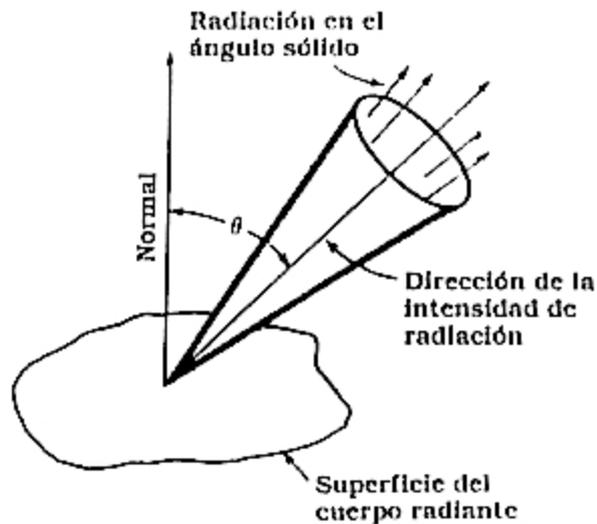


Fig. 5. Intensidad de la Radiación

### 4.1.3. Cuerpo Negro

Un cuerpo negro se caracteriza por que al ser irradiado absorbe por completo la irradiancia, sea esta total o monocromática a cualquier longitud de onda.

Además (en cumplimiento a la 2<sup>da</sup> ley de la termodinámica) el C.N. a una determinada temperatura tiene, con relación a cualquier otro cuerpo, la mayor emisividad monocromática y total.

El espectro de radiación del C.N. es continuo y la longitud de onda que corresponde a la potencia emitida máxima, se desplaza hacia longitudes de ondas mas cortas, conforme crece la temperatura.

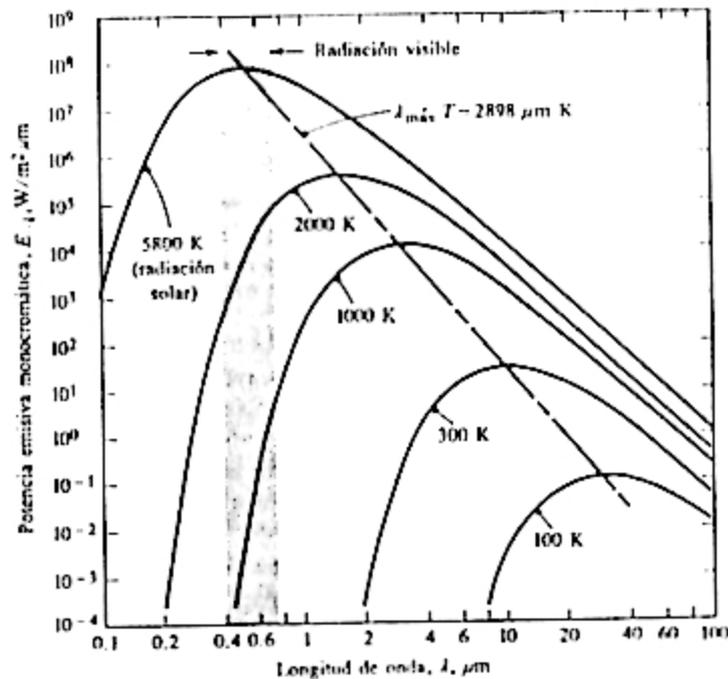


Fig. 6. Emisividad Monocromática de un C.N. según la Ley de Planck.

#### 4.1.4. Leyes que Gobiernan la Radiación del Cuerpo Negro

La emisividad espectral o monocromática del C.N., puede evaluarse mediante la ley de radiación de Planck:

$$E_{N\lambda} = \frac{A}{\lambda^5 (e^{B/\lambda T} - 1)} \quad [10] \quad (4.1.41)$$

donde:

$E_{N\lambda}$  : emisividad espectral del C.N. (W/m<sup>2</sup>·μm)

$\lambda$  : longitud de onda (μm)

T : temperatura termodinámica del C.N. (K)

A : 3,742·10<sup>8</sup> (W(μm)<sup>5</sup>/m<sup>2</sup>)

B : 1.4389·10<sup>4</sup> (μmK)

e : base del logaritmo neperiano. (-)

La emisividad total del C.N. ( $E_N$ ) viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E_N = \sigma T^4 \quad (4.1.42)$$

donde:

$\sigma$  : 5,67·10<sup>-8</sup> (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

La longitud de onda en que ocurre la máxima emisividad monocromática ( $\lambda_{max}$ ) se expresa mediante la ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2897,8 \quad (4.1.43)$$

donde:  $\lambda_{max}$  (μm); T (K)

#### 4.1.5. Propiedades Ópticas de los Cuerpos

La energía radiante puede estar referida a una determinada longitud de onda, o a todas ellas. Por

tal razón, cuando un cuerpo radia energía, se define:

- Emitancia hemisférica monocromática ( $\epsilon_\lambda$ ).

Es la razón de la emisividad espectral del cuerpo en estudio y del C.N., tomados a la misma longitud de onda y temperatura.

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{N\lambda}} \quad (4.1.51)$$

- Emitancia hemisférica total ( $\epsilon$ ).

Es la razón de la radiación total emitida por el cuerpo, a la que emitiría el C.N. a igual temperatura.

$$\epsilon = \frac{E}{E_N} \rightarrow \epsilon = \frac{\int_0^\infty E_\lambda d\lambda}{\sigma T^4} \quad (4.1.52)$$

Además, la energía radiante que incide sobre un cuerpo puede ser en parte absorbida, reflejada y transmitida, de allí que se defina:

- Absortancia hemisférica monocromática ( $\alpha_\lambda$ ).

Es la fracción de irradiancia espectral que absorbe el cuerpo, para cierta longitud de onda y temperatura.

$$\alpha_\lambda = \frac{\text{Potencia absorbida/área}\lambda}{G_\lambda} \quad (4.1.53)$$

- Absortancia hemisférica total ( $\alpha$ ).

Representa la fracción de irradiancia total que absorbe el cuerpo.

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} \quad (4.1.54)$$

Análogamente se tiene:

- Reflectancia hemisférica monocromática ( $R_{\lambda}$ )

$$R_{\lambda} = \frac{\text{Potencia reflejada/área}\lambda}{G_{\lambda}} \quad (4.1.55)$$

- Reflectancia hemisférica total (R)

$$R = \frac{\int_0^{\infty} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} \quad (4.1.56)$$

- Transmitancia hemisférica monocromática ( $\tau_{\lambda}$ )

$$\tau_{\lambda} = \frac{\text{Potencia transmitida/área}\lambda}{G_{\lambda}} \quad (4.1.57)$$

- Transmitancia hemisférica total ( $\tau$ )

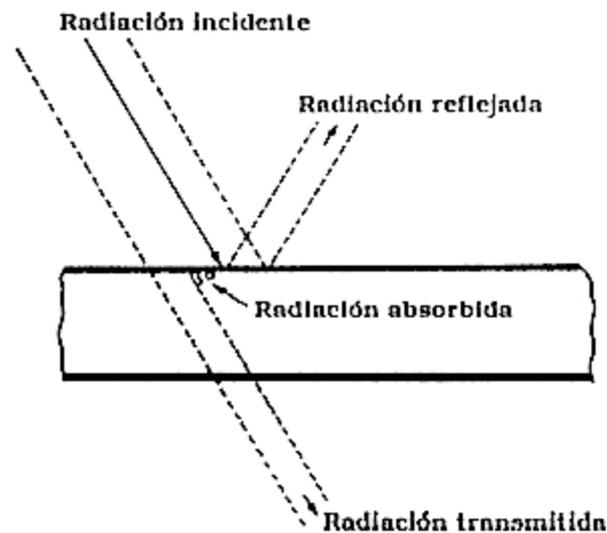
$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} \quad (4.1.58)$$

Por la primera ley de la termodinámica, se cumple:

$$\alpha_{\lambda} + R_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad ; \quad \alpha + R + \tau = 1 \quad (4.1.59)$$

Además, la ley de Kirchhoff establece la igualdad de la absorptancia y la emitancia para la radiación monocromática de cualquier cuerpo. Esta igualdad se cumple solo en ciertos casos para la radiación global (ejemplo cuerpos grises)\* .Por lo tanto:

$$\boxed{\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda} : \quad \boxed{\alpha = \varepsilon} * \quad (4.1.70)$$



*Fig. 7. Radiación Incidente sobre una Superficie*

#### 4.2. Radiación Solar

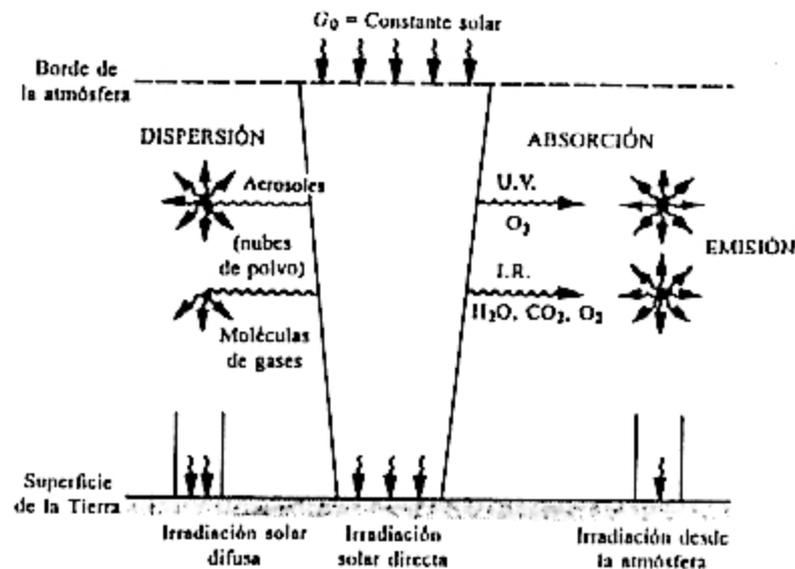
La radiación solar es esencialmente radiación térmica, con una distribución espectral que corresponde a la de un C.N. a 6 000 K. La intensidad solar que llega a la tierra, justo antes de pasar la atmósfera, se denomina constante solar, y su valor (promedio anual) es de  $1\,367\text{ W/m}^2$ . [ 6]

La presencia de la atmósfera da lugar a que en la superficie terrestre se puedan medir tres tipos de radiación solar:

- Radiación directa, es aquella que proviene directamente de los rayos solares.
- Radiación difusa, tiene como origen las múltiples reflexiones y dispersiones de la energía solar, en la atmósfera y en el entorno en general.

- Radiación global, se obtiene al sumar la radiación directa y la radiación difusa.

Tanto la radiación directa como la difusa (y en consecuencia la radiación global) tienen el mismo rango espectral, de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $3 \mu\text{m}$ . [ 7]



*Fig. 8. Absorción y Dispersión de Radiación Solar que Incide Sobre la Superficie de la Tierra.*

### 4.3. Atmósfera

#### 4.3.1. Composición

La atmósfera o aire atmosférico es una mezcla de gases y vapor de agua. El aire seco es aquel que no contiene vapor de agua y que a nivel del mar está constituido aproximadamente por 78,03% de Nitrógeno, 20,99% de Oxígeno, 0,94% de Argón y 0,03% de Bióxido de Carbono, en volumen; el 0,01% restante está formado por Hidrógeno, Xenón, Criptón y otros gases. [ 8] . El vapor de agua que contiene la atmósfera se encuentra concentrado en las proximidades de la super

ficie terrestre, con el 95% del total entre 0 y 5 000 m de altura. [ 9]

#### 4.3.2. Efectos en la Radiación Solar

Los constituyentes del aire dispersan la radiación solar de todas las longitudes de onda y absorben sólo en ciertos rangos espectrales de dicha radiación.

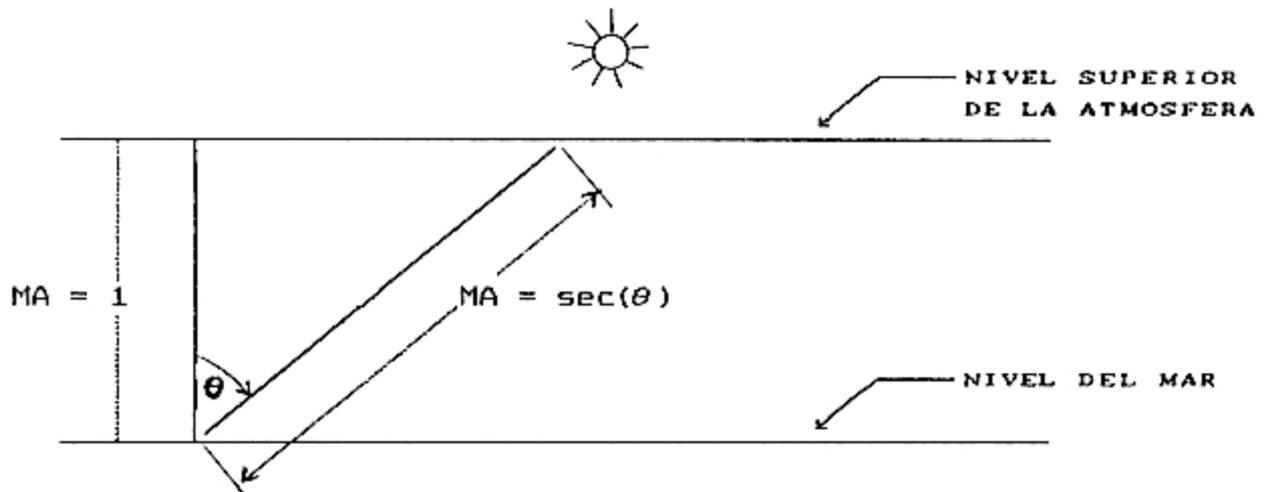
Los absorbedores más importantes son el ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono, en los rangos del ultravioleta ( $\lambda < 0,35 \mu\text{m}$ ) e infrarrojo (sobre todo para  $\lambda > 2,3 \mu\text{m}$ ), respectivamente. [ 9]

La atenuación que experimenta la radiación solar a través de la atmósfera depende de la masa de aire (MA), que es igual a la unidad, a nivel del mar y cuando la trayectoria que sigue la radiación es vertical ( $\angle$  cenital  $\theta = 0^\circ$ ). Para un ángulo cenital cualquiera  $\theta$ , la masa de aire se puede estimar con la

relación:

$$\text{MA} = \sec(\theta)$$

(4.3.21)



*Fig. 9. Masa e Aire*

#### 4.3.3. Radiación Atmosférica

Los componentes de la atmósfera, principalmente el vapor de agua y el dióxido de carbono, no sólo absorben la radiación solar sino que también absorben la radiación proveniente de la superficie de la tierra. En consecuencia la atmósfera emite radiación en las longitudes de onda principalmente de  $5\mu\text{m}$  a  $8\mu\text{m}$  y superiores a  $13\mu\text{m}$ , es decir en la banda infraroja. [ 10] .

El vapor de agua es el único componente de la atmósfera cuya proporción puede variar, influyendo notablemente en las "condiciones del tiempo" y el comportamiento radiativo de la atmósfera.

#### 4.3.4. Carta Psicrométrica

La Psicrometría estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo. La representación gráfica de dichas propiedades a una determinada presión barométrica (comúnmente una atmósfera), se conoce como carta psicrométrica.

Los conceptos básicos usados en Psicrometría son:

- Aire saturado, es una mezcla de aire seco y vapor saturado.
- Aire no saturado, está formado por aire seco y vapor sobrecalentado.
- Presión parcial de vapor ( $p_v$ ), es la componente de presión barométrica debida al vapor de agua contenido en la atmósfera.

- Humedad absoluta ( $Y$ ), es la razón entre la masa de vapor y la masa de aire seco, contenidos en la unidad de volumen.
- Humedad relativa ( $\phi$ ), es la razón de la presión parcial del vapor, a la presión de saturación, para la misma temperatura.
- Punto de rocío ( $t_r$ ), es la temperatura de saturación correspondiente a la presión parcial del vapor.
- Temperatura de bulbo seco ( $t_d$ ), es la temperatura de equilibrio del aire húmedo. Se mide con un termómetro ordinario.
- Temperatura de bulbo húmedo ( $t_w$ ), es aquella indicada por un termómetro, cuyo elemento sensible a la temperatura (bulbo) está cubierto de una gasa bañada en agua.

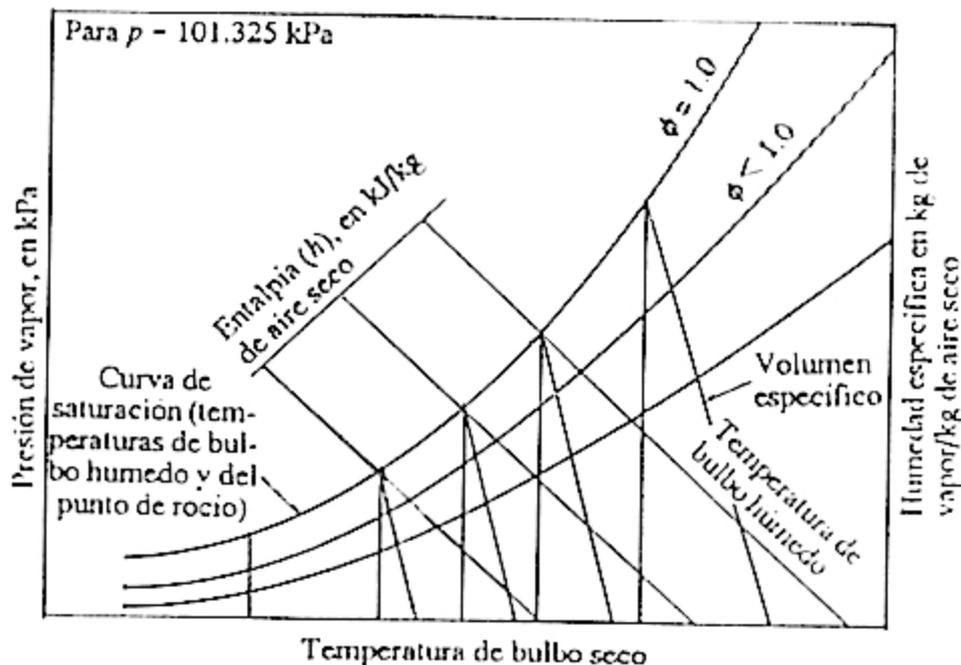


Fig. 10. Carta Psicrométrica

#### 4.4. Transferencia de Calor

En los procesos de transferencia de calor, se pueden distinguir tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación.

##### 4.4.1. Conducción

Mediante la conducción el calor se transmite a través de un cuerpo de molécula a molécula sin desplazamiento visible de sus partículas. Esto ocurre generalmente a través de cuerpos sólidos, pero también predomina cuando se tienen espacios de pequeño espesor, llenos totalmente de un líquido o de un gas sin movimiento.

La ecuación de Fourier describe matemáticamente el mecanismo de la transferencia de calor por conducción:

$$q = -k\nabla T \quad (4.4.11)$$

donde:

$q$  = flujo de calor por unidad de área, a través de una superficie  $\perp$  a la dirección del flujo. ( $W/m^2$ )

$k$  = conductividad térmica del medio que transmite el calor ( $W/mK$ )

$\nabla T$  = gradiente de temperatura ( $K/m$ )

Para el caso especial de una pared plana de espesor  $d$ , a través de la cual se transfiere calor entre sus caras paralelas a las temperaturas  $T_2$  y  $T_1$  respectivamente ( $T_2 > T_1$ ), se tiene:

$$q = k \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (4.4.12)$$

donde:  $\Delta T = T_2 - T_1$

#### 4.4.2. Convección

En la convección se transfiere calor desde una superficie hacia un fluido en movimiento o viceversa. Si el movimiento del fluido se debe enteramente a las diferentes densidades originadas por la variación de temperatura, se dice que la convección es natural; cuando se activa mecánicamente el movimiento, se tiene la convección forzada.

La transferencia de calor por convección se evalúa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h\Delta T \quad (4.4.21)$$

donde:

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección  $(W/m^2K)$

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre la superficie  $(T_s)$  y el fluido  $(T)$   $(K)$

#### 4.4.3. Radiación

El calor transmitido de este modo no necesita de un medio material como vehículo, por que todo cuerpo a una determinada temperatura absoluta  $(T)$ , emite calor en todas las direcciones en forma de energía radiante que se expresa con la siguiente relación:

$$q = \epsilon\sigma T^4 \quad (4.4.31)$$

donde:

$\epsilon$  = emitancia del cuerpo emisor  $(-)$

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann  $(W/m^2K^4)$

## V. ENFRIAMIENTO RADIATIVO-INFORMACION DISPONIBLE

### 5.1. Consideraciones Generales

El enfriamiento radiativo tendrá lugar, siempre y cuando la radiación térmica (infraroja) emitida por la atmósfera y absorbida por un cuerpo a temperatura ambiente, sea menor que la radiación emitida por dicho cuerpo hacia el cielo, resultando una pérdida neta de calor por parte del cuerpo.

Esto es posible gracias a que el cielo claro es transparente en el espectro infrarojo de longitudes de onda de 8 a 13  $\mu\text{m}$  ("ventana atmosférica").

### 5.2. Posibilidad de Enfriamiento de un Cuerpo Negro

Para evaluar el posible enfriamiento radiativo, es fundamental conocer el espectro e intensidad de la radiación atmosférica. Esta radiación es muy compleja y depende de diferentes parámetros geográficos y atmosféricos, sobre todo porque el vapor de agua y el dióxido de carbono muestran importantes bandas de absorción en el infrarojo térmico (3 a 100  $\mu\text{m}$ ).

Sin embargo se ha verificado mediante numerosas mediciones, dos importantes características de la radiación atmosférica:

- La radiación espectral tiene un mínimo en el intervalo de 8 a 13  $\mu\text{m}$  que es la banda de mayor absorción del vapor de agua y del dióxido de carbono. [ 11]
- El espectro de radiación depende mayormente de las

condiciones climáticas, particularmente de la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera.

En base a estas observaciones se han desarrollado dos técnicas de evaluación que seguidamente se explican en 5.2.1 y 5.2.2.

#### 5.2.1. Modelos de Atmósfera

Se puede simular mediante un programa de computadora, el espectro de radiación para modelos de atmósfera despejada, libre de nubes, como los que se muestran en la Fig. 11 que además cuenta con el espectro de radiación del C.N. para la temperatura ambiente  $T_a$ . [ 4 ] .

Dichos gráficos permiten apreciar que a mayor contenido de humedad (clima tropical), la "ventana atmosférica" se cierra al paso de radiación térmica, dificultando el enfriamiento (radiativo).

En la evaluación de este recurso es importante tener en cuenta la dependencia angular de la radiación (atmosférica), en el rango de longitudes de onda de la "ventana atmosférica". En la fig. 12 se dispone de información correspondiente a un modelo particular de atmósfera (U.S.A. STANDARD 1 962) y cuatro ángulos cenitales diferentes. [ 11]

El resultado es un incremento de dicha radiación, al crecer el ángulo cenital.

Podemos decir que para grandes ángulos cenitales la

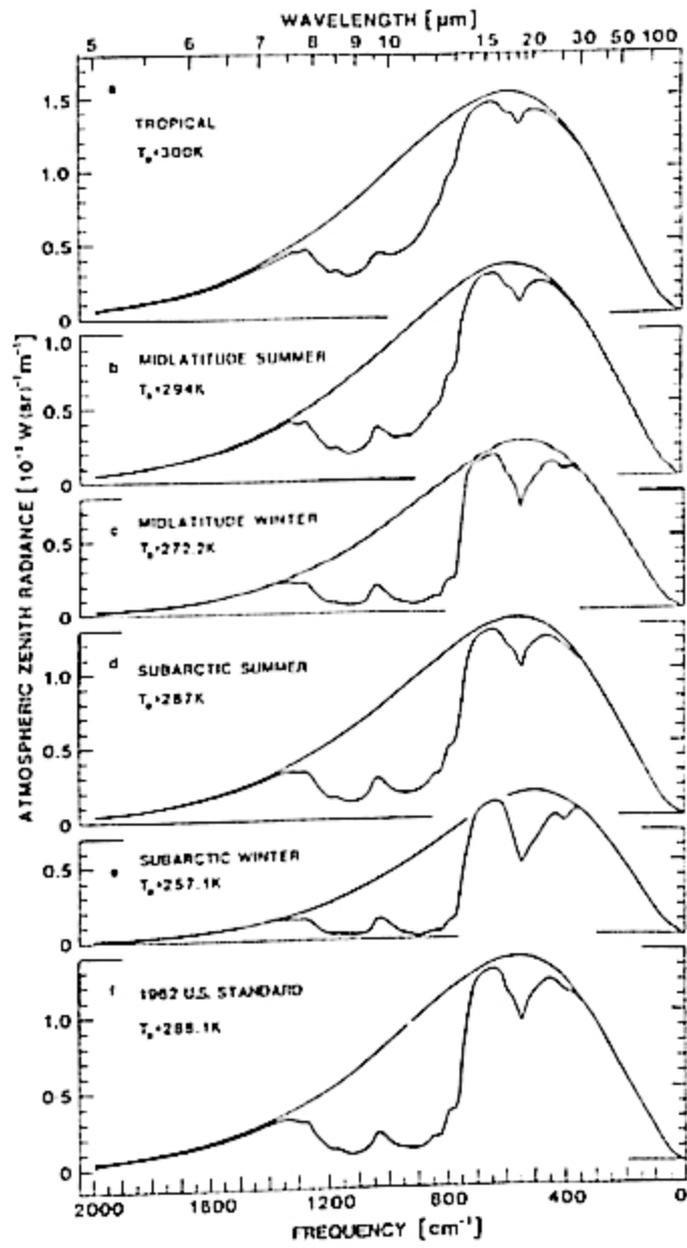
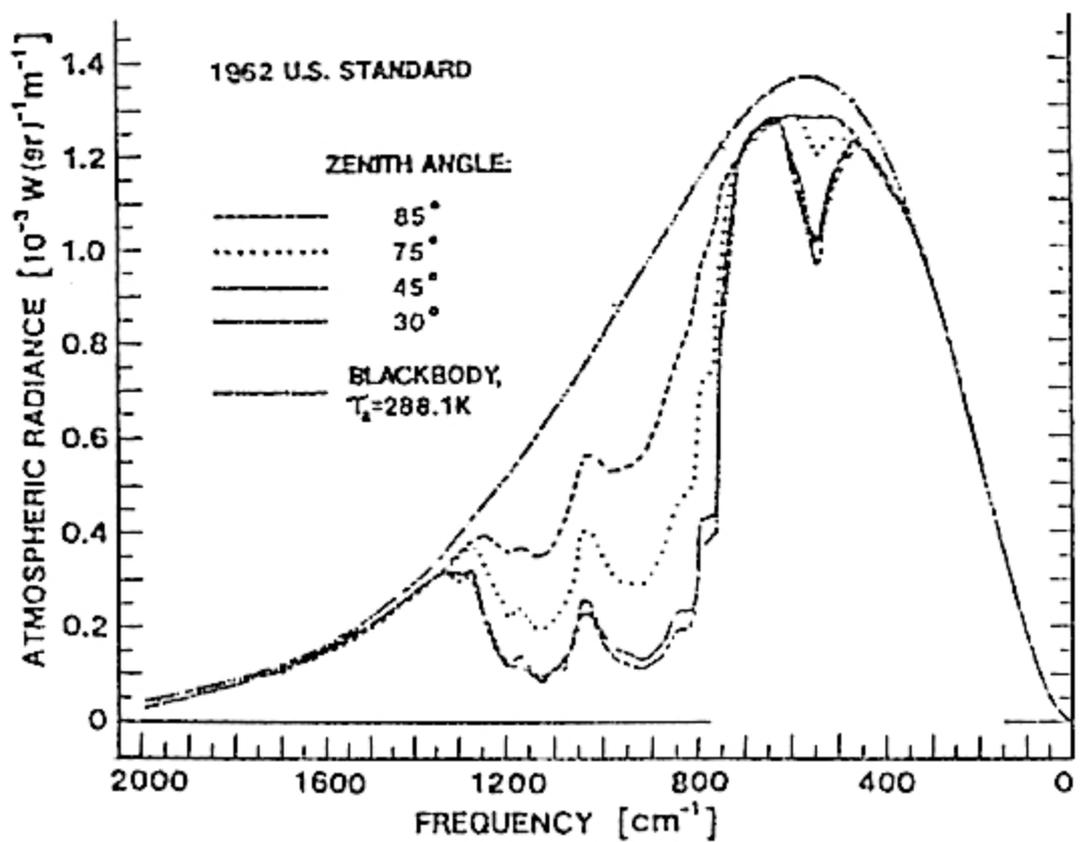


Fig 11. Modelos de Atmósfera. [ 4 ]



*Fig. 12. Variación de la Radiación Atmosférica con el ángulo cenital. [ 11]*

"ventana atmosférica" gradualmente empieza a cerrarse.

### 5.2.2. Fórmulas Empíricas

La radiación atmosférica se puede tratar como una fracción de la radiación del C.N. a la temperatura ambiente  $T_a$  (en Kelvin).

En este caso se estima una emitancia efectiva ( $\epsilon_a$ ) y la potencia (por unidad de área) emitida por la atmósfera será:

$$\boxed{P_a = \epsilon_a \sigma T_a^4} \quad (5.2.21)$$

Si la atmósfera intercambia calor radiativo con un cuerpo negro, cuya temperatura en estado estacionario es  $T_N$  (en Kelvin), se cumple:

$$P_a = P_N$$

$$\boxed{\epsilon_a \sigma T_a^4 = \sigma T_N^4} \quad \rightarrow \quad \boxed{T_N = \epsilon_a^{1/4} T_a} \quad (5.2.22)$$

De este resultado se concluye:

- Si  $\epsilon_a = 1$ , no hay posibilidad de enfriamiento radiativo.
- Si  $\epsilon_a < 1$ , el C.N. se enfria ya que:  $T_N < T_a$

Para facilitar el cálculo de la emitancia atmosférica, se han propuesto fórmulas empíricas en base a parámetros accesibles, como la temperatura del punto de rocío ( $t_R$ ) y la presión atmosférica local ( $p$ ). Así se tiene:

a) Fórmula de Berdahl y Fromberg. [ 12]

$$\boxed{\epsilon_a = 0,741 + 0,0062t_R} \quad (5.2.23)$$

b) Fórmula de Martin y Berdahl. [13]

$$\epsilon_a = 0.711 + 0.56 \cdot \frac{t_R}{100} + 0.73 \left( \frac{t_R}{100} \right)^2 + 0.0012(p-10^3)$$

(5.2.23')

donde:  $t_R$  está dado en °C, y p en mbar.

Estas fórmulas son muy útiles para determinar el enfriamiento radiativo del C.N..

### 5.3. Enfriamiento con Superficie Selectiva

Se puede mejorar las condiciones para el enfriamiento radiativo, utilizando superficies que emiten selectivamente, con elevada emitancia en el rango de 8 a 13  $\mu\text{m}$  y baja absorción para otras longitudes de onda.

Se logra este propósito cubriendo la superficie del cuerpo emisor con una película delgada de un material apropiado.

Además se debe utilizar un bloqueador o protector de transferencia de calor por convección, transparente a las longitudes de onda de la "ventana atmosférica" (8 a 13  $\mu\text{m}$ ), que refleje o absorba la radiación que no corresponda a dichas longitudes de onda.

### 5.4. Materiales Para Superficie Selectiva y Cubierta

#### Protectora

Las superficies selectivas que se utilizaron durante los primeros experimentos para aprovechar el enfriamiento radiativo, se construyeron a base de láminas de polímeros metalizados, PVC y TEDLAR, sobre aluminio. Actual

mente se han obtenido resultados bastante satisfactorios con óxidos de silicio nitrogenado ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ) depositados sobre sustratos de aluminio.

Sin embargo, las técnicas de fabricación actual (principalmente tecnología de vacío), obtienen estas películas delgadas a costos muy elevados, por lo cual se busca implementar técnicas más económicas y eficientes. Las alternativas más importantes son:

- Deposición de productos químicos, y
- Rociado pirolítico.

Apropiadas particularmente para aplicaciones a grandes áreas.

La cubierta protectora se elabora desde los primeros experimentos de Trombé en base a láminas de Polietileno, transparente en la "ventana atmosférica" (8 a 13  $\mu\text{m}$ ), que al ser pigmentadas con ZnS reflejan fuertemente las longitudes de onda corta de la radiación solar, favoreciendo el enfriamiento durante el día. [14]

### 5.5. Potencia de Enfriamiento y Diferencia de Temperatura

Si en una primera aproximación sólo se considera la transferencia de calor por radiación entre la atmósfera y la superficie a enfriar, entonces la potencia de enfriamiento radiativo ( $P_{\text{rad}}$ ) dependerá de la diferencia ( $\Delta T$ ) entre la temperatura ambiente ( $T_a$ ) y la temperatura de la superficie ( $T_s$ ).

Sin embargo,  $\Delta T = T_a - T_s$  (5.51)

está asociada con el flujo de calor no radiativo transferido de los alrededores hacia la superficie a enfriar. Esto limita la potencia de enfriamiento útil ( $P_u$ )

según la relación: 
$$P_u = P_{rad} - h_c \Delta T \quad (5.52)$$

En la cual  $h_c$  representa el coeficiente de pérdidas, cuyo valor se considera de  $1W/m^2K$  [4].

La potencia de enfriamiento radiativo puede expresarse gráficamente según el modelo de atmósfera y el tipo de superficie expuesta, observándose que decrece monótonamente con el incremento de  $\Delta T$ . El decrecimiento es más rápido para superficies de C.N. que para superficies de selectividad infrarrojo. (Ver fig. 13).

Si sólo se considera la transferencia radiativa de calor, la diferencia de temperatura está entre los  $14^\circ C$  y  $26^\circ C$  o entre los  $27^\circ C$  y  $62^\circ C$ , respectivamente según sea el tipo de superficie elegida (C.N. o superficie selectiva) [4]. Mientras que a temperatura ambiente ( $T_a$ ), la potencia de enfriamiento radiativo se encuentra entre  $71$  y  $113 w/m^2$  para un C.N. y entre  $58$  y  $93 w/m^2$  para superficies de selectividad infrarroja. [4].

Estos resultados se han obtenido de las gráficas que muestran la potencia radiativa  $P_{rad}$  en función de la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ).

Dichas gráficas han sido construidas para seis modelos atmosféricos y los dos tipos de superficies ya citadas.

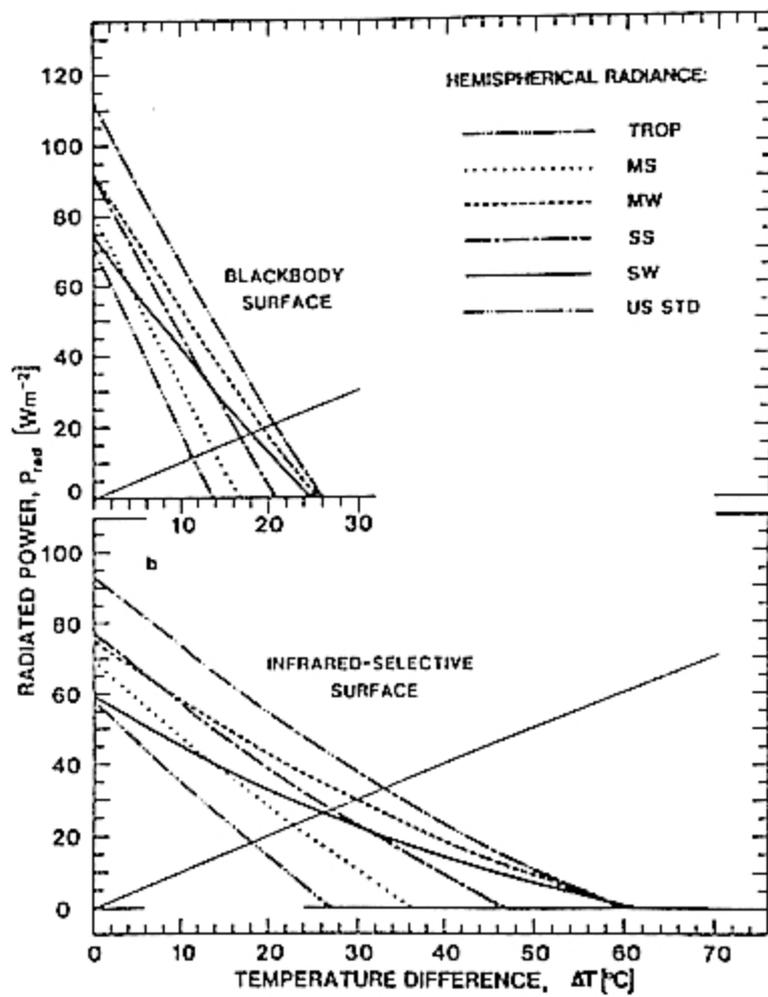


Fig 13. Variación de la Potencia Radiativa con  $\Delta T$ . [ 4]

Se observa que para ambas corresponden valores altos de  $P_{rad}$  y  $\Delta T$  si la atmósfera es U.S.A. STANDARD y valores bajos si la atmósfera es tipo Tropical. (Ver fig. 13).

#### 5.6. Aplicaciones

El enfriamiento radiativo tiene varias potenciales aplicaciones, tales como:

- Climatización de edificios.
- Conservación de alimentos, semillas y medicina.
- Condensación de la humedad atmosférica.
- Desalinación de agua por condensación o congelamiento.

El enfriamiento radiativo aplicado a la condensación de vapor, tiene la ventaja de permitir una condensación eficiente a temperatura ambiente elevada, que caracteriza a las zonas desérticas. En este caso, los métodos convencionales de enfriamiento por evaporación- condensación de las sustancias refrigerantes, presenta el inconveniente de requerir presiones altas para condensar el vapor.

## VI. SISTEMA PROTOTIPO

En nuestro caso se evaluará la posibilidad del enfriamiento radiativo nocturno de un sistema prototipo que tiene como elemento " generador de frio ", una placa metálica cuya superficie transfiere calor por radiación como si fuera un C.N.

### 6.1. Diseño y Construcción

El diseño del sistema prototipo se fundamenta en la necesidad de monitoriar, procesar y analizar los parámetros de mayor incidencia en la evaluación del enfriamiento radiativo.

Los elementos que conforman dicho sistema han sido interconectados para que funcionen como un todo. Estos elementos son:

- Dispositivo prototipo (caja que contiene la placa "generadora de frio")
- Instrumentos de medición.
- Elementos de lectura, almacenamiento y procesamiento de datos (MODAS 84 y PC) con sus correspondientes fuentes de energía.

#### 6.1.1. Dispositivo Prototipo

Este elemento ha sido construido a semejanza de un colector solar plano, con los siguientes componentes:

- a.- Caja de madera de 1,00m x 1,00m x 0,15m
- b.- Aislamiento térmico de poliuretano de 0,05m de espesor.

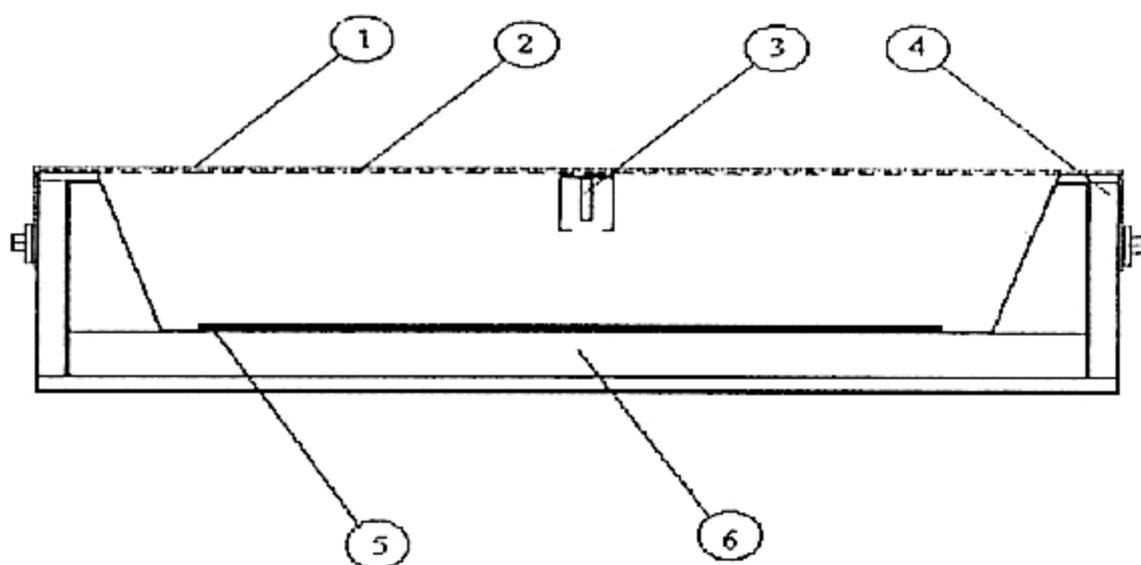
- c.- Placa de aluminio pintada de negro mate, de 0,80m x 0,80m y 1/32 pulg. de espesor.
- d.- Cobertor o bloqueador de convección simple de polietileno, con alta transmitancia en el infrarrojo y capaz de soportar exposiciones prolongadas a la radiación ultravioleta.
- e.- Sensores de temperatura localizados en la placa de enfriamiento y en el aire interior del dispositivo prototipo. (Ver fig. 14).

#### 6.1.2. Instrumentos de Medición.

Los instrumentos utilizados en la toma de datos, comprende:

##### 1] Sensores de temperatura

Se hizo uso de sensores metálicos de platino (PT100) para medir la temperatura ambiente y la temperatura en puntos interiores del dispositivo prototipo. Estos termómetros tienen una variación de la resistencia eléctrica con la temperatura casi lineal, en el rango de  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . [ 7 ] , y su sensibilidad está alrededor de unos  $0,39 \Omega/^{\circ}\text{C}$ . [ 16 ] . Además se midió la temperatura del cobertor con sensores LM335, cuyas curvas de calibración y características técnicas más importantes se muestran en el apéndice A.2 y A.3.



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCION
1	Cubierta de polietileno
2	Hilo templador
3	Sensor de temperatura
4	Marco de madera
5	Placa de aluminio
6	Aislamiento de poliuretano

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE CIENCIAS - SEPES	
VISTA FRONTAL EN CORTE ENFRIAMIENTO RADIATIVO - PROTOTIPO	
ESCALA : S/E	<b>ES /01</b> REVISO : M. H.
FECHA : ABRIL DE 1998	
ELABORO : R. M. C. M.	

*Fig. 14. Dispositivo Prototipo*

## 2) Higrómetro

Para medir la humedad relativa se ha utilizado un higrómetro de pelos, cuyo funcionamiento se basa en la propiedad que muestran los cabellos de expandirse o contraerse según aumente o disminuya la humedad respectivamente. Este tipo de higrómetro aprovecha el movimiento que experimenta una banda de pelos a consecuencia del cambio de humedad, para accionar un potenciómetro que al ser energizado proporciona la señal necesaria al equipo de medición y registro. El higrómetro y el sensor de temperatura ambiente, están incorporados en una misma estructura conformando una sola unidad de medición.

## 3) Anemómetro

El anemómetro que hemos utilizado para medir la velocidad del viento es del tipo más común, que consta de tres cazoletas semiesféricas situadas en los extremos de brazos horizontales que parten de un eje vertical, capaz de girar. Mediante un dispositivo consistente en un generador eléctrico tipo magneto, se transforma el movimiento giratorio en un voltaje eléctrico a través de una resistencia. Dicho voltaje constituye la señal de entrada al MODAS 84.

## 4) Radiómetro

Se han tomado mediciones de la radiación solar global, de la radiación solar difusa y de la radiación

térmica atmosférica.

Para tales efectos, hemos utilizado:

- Un radiómetro o piranómetro KIPP y ZONNEN de radiación global con una sensibilidad de  $4,92 \times 10^{-6} \frac{V}{W/m^2}$ .

- Un radiómetro de radiación difusa, que no es sino un piranómetro al cual se le ha suprimido la radiación directa incidente mediante una banda metálica.

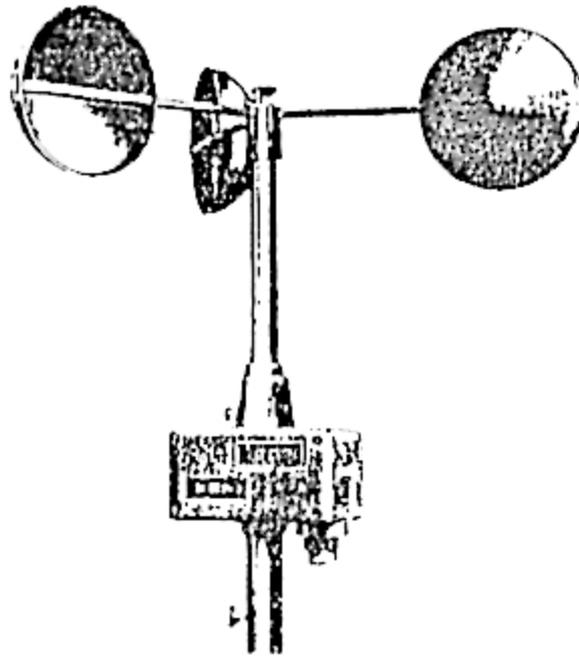
Su instalación requiere que el ángulo entre el plano de la banda y un plano vertical (orientado según la dirección este-oeste), sea igual a la latitud del lugar donde se efectúa la medición.

El radiómetro utilizado en nuestras mediciones es de la marca KIPP y ZONNEN con una sensibilidad de  $5,27 \times 10^{-6} \frac{V}{W/m^2}$ .

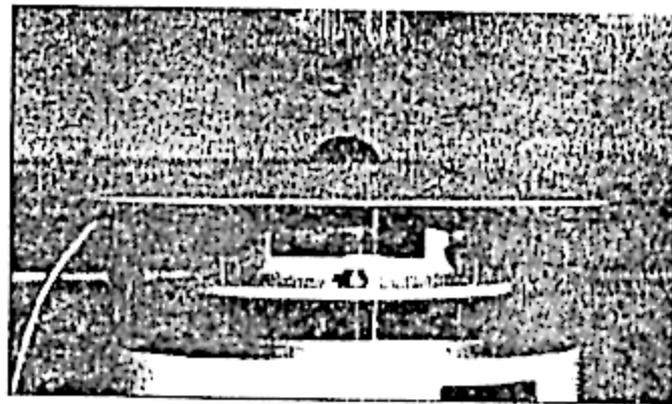
- Un radiómetro infrarrojo o pirgeómetro de precisión (PIR), marca EPPLEY que es sensible a las longitudes de onda en el rango de 3 a 50  $\mu m$ , con lo cual se cubren los valores de temperatura esperados desde la tierra y la atmósfera. El PIR mide la radiación global térmica infrarroja con una sensibilidad de

$4,08 \times 10^{-6} \frac{V}{W/m^2}$ .

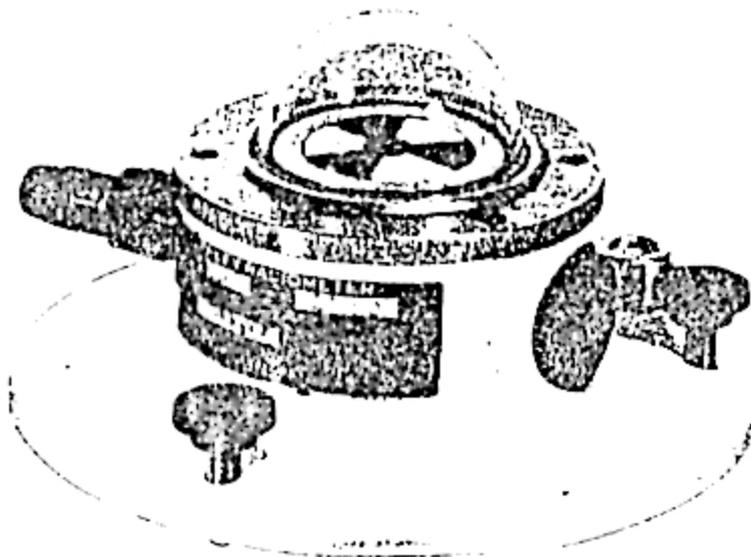
En la fig. 15 se muestran los sensores de velocidad del viento, de radiación infrarroja y de radiación solar.



ANEMOMETRO



RADIOMETRO  
PIRANOMETRO  
(PIR)



RADIOMETRO  
O  
PIRANOMETRO

Fig. 15 *Sensores de velocidad del viento y de radiacion*

### 6.1.3. Lectura y Almacenamiento de Datos-El MODAS 84

El MODAS 84 es un dispositivo electrónico portátil de toma y almacenamiento de datos; tiene capacidad para cuatro canales con resolución de 8 bits.

Puede mostrar los valores de medición, en una pantalla de cristal líquido y almacenar mas de 7 400 datos en memoria.

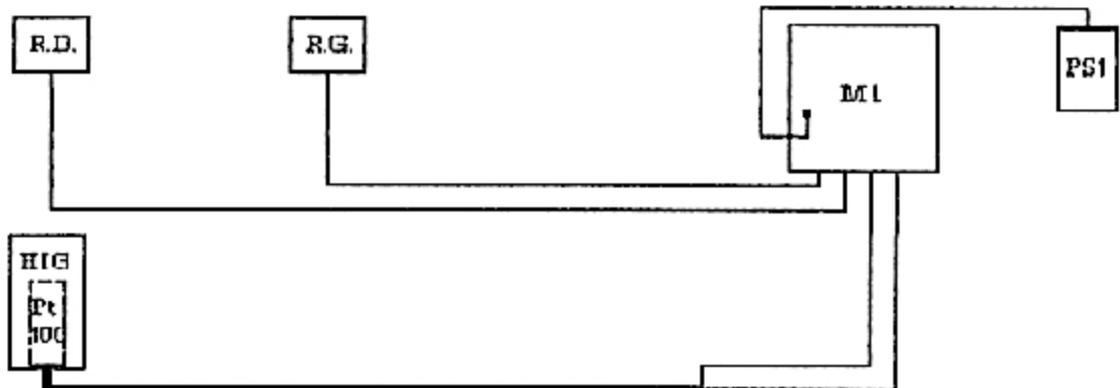
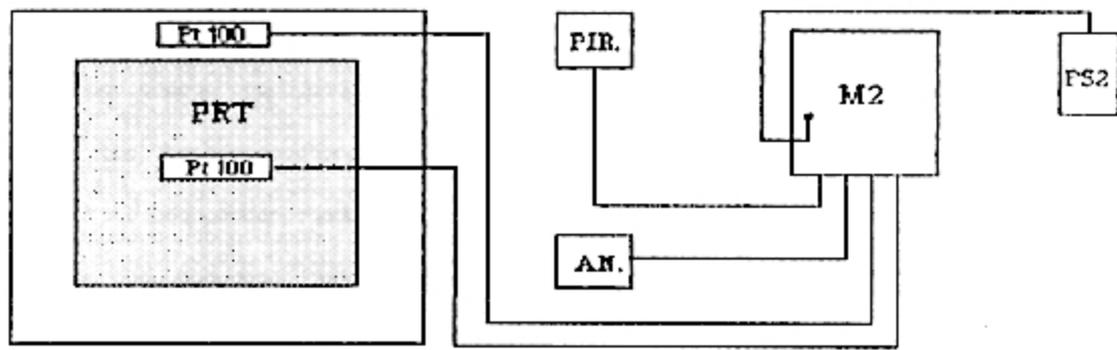
Estos datos se transfieren a un computador portátil (Epson Hx20 o T100 Toshiba Lap Top) empleando la interfase RS 232/V24.

El MODAS 84 trae incorporado módulos externos adaptados a sensores standards, según el parámetro físico a medir.

El consumo máximo de potencia es de solamente 60 mW, suministrados por baterías de níquel-cadmio de 0,5 Ah, recargables por fuentes de 12 Vdc o panel solar de 18V y 2 a 5 W<sub>p</sub>, para operar independientemente en el campo.

Se le puede programar mediante un teclado para la toma de datos sobre un periodo establecido que tiene como mínimo y máximo, los valores de 1 y 60 minutos respectivamente.

El sistema prototipo ha sido instalado en la azotea del edificio de la Facultad de Ciencias de la UNI en los ambientes que corresponden a las prácticas experimentales con energía solar, y la forma en que han sido interconectados sus componentes se muestra en la Fig 16.



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCION
AN	ANEMOMETRO
HIC	HIGROMETRO
PIR	RADIOMETRO INFRAROJO.
PS1, PS2	PANEL SOLAR
M1, M2	REGISTRADOR DE DATOS (MODAS-84)
RO	RADIOMETRO(red global)
RD	RADIOMETRO(red difusa)
PRT	PROTOTIPO
Pt100	SENSOR DE TEMPERATURA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE CIENCIAS - SEPEs	
ESQUEMA DE INSTALACION ENfriAMIENTO RADIATIVO - PROTOTIPO	
ESCALA : SE	ES / 02
FECHA : ABRIL DE 1998	
ELABORO : R. M. C. M.	REVISO : M. H.

Fig. 16. Instalación del Sistema Prototipo

## 6.2. Resultados experimentales

Las mediciones que se relacionan con los parámetros necesarios para calcular la emitancia atmosférica y el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) durante el enfriamiento radiativo nocturno, (desde las 18 horas hasta las 06 horas) han sido registrados en el cuadro C1, el cual muestra los datos que corresponden a los 15 primeros días del mes de marzo del presente año 1998. Solamente se indican los valores medios, durante la noche.

A partir del cuadro C1 se ha elaborado el cuadro C2 para contar con los valores promedio nocturno, de temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento.

El cuadro C3 registra los valores, nocturnos (desde las 18 horas hasta las 06 horas) de temperatura medidos en el medio ambiente ( $t_a$ ), en la placa de enfriamiento ( $t_p$ ) y en el aire interior del prototipo ( $t_{ai}$ ). Sus correspondientes valores promedio se muestran en el cuadro C4.

Las mediciones relativas a la temperatura ambiente, y la temperatura en la superficie exterior ( $T_{ec}$ ) e interior ( $T_{ic}$ ) del cobertor (desde las 19 horas del 25-03-98) a las 06 horas del 26-03-98, se han representado gráficamente y sus valores promedio se muestran en el cuadro C5.

**CUADRO C1**  
**MEDICIONES DE**

**TEMPERATURA AMBIENTE, HUMEDAD RELATIVA Y VELOCIDAD DEL VIENTO**

DIA DEL MES DE MARZO DEL AÑO 1998									
	01			02			03		
Hor	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v$ ( $\frac{m}{s}$ )	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v$ ( $\frac{m}{s}$ )	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v$ ( $\frac{m}{s}$ )
01	24,2	86,8	1,4	25,0	80	1,0	24,6	81,6	0,3
02	24,4	86,0	0,9	24,0	82	1,0	24,6	80,4	0,3
03	24,2	85,2	0,9	24,0	86	1,0	24,4	80,8	0,9
04	24,0	85,6	0,6	24,0	88	1,0	24,2	82,4	0,6
05	24,2	85,2	0,1	24,0	86	1,0	24,2	84,8	0,6
06	24,2	85,6	0,2	24,0	83	1,0	24,2	85,6	0,8
19	25,4	67,6	0,6	26,0	76	1,0	26,2	61,2	1,7
20	25,2	69,2	0,4	25,0	77	1,0	25,8	64,0	1,3
21	25,0	72,0	0,8	25,0	79	1,0	25,2	71,6	1,3
22	25,0	76,0	0,5	25,0	80	1,0	24,8	77,2	1,1
23	24,8	78,4	1,0	25,0	81	1,0	24,6	76,8	1,0
24	24,8	80,0	0,8	25,0	82	1,0	24,4	77,2	0,7

	04			05			06		
Hor	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v$ ( $\frac{m}{s}$ )	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v$ ( $\frac{m}{s}$ )	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v$ ( $\frac{m}{s}$ )
01	24,4	76	1,2	24,0	72,8	0,9	23,8	78,8	0,7
02	24,2	78	0,8	24,0	73,6	0,9	23,8	81,2	0,3
03	24,2	79	0,8	24,0	76,0	1,0	23,6	84,0	0,5
04	24,2	78	0,9	24,0	78,0	1,1	23,4	83,6	0,4
05	24,2	78	0,3	24,0	78,8	0,8	23,6	83,6	0,3
06	24	78	0,1	24,0	80,8	1,3	23,6	85,2	0,5
19	25,2	66	1,6	25,0	71,6	1,2	24,6	74,4	1,2
20	24,8	70	1,3	24,0	76,0	1,6	24,6	76,8	0,8
21	24,6	73	1,4	24,0	78,0	1,5	24,4	79,6	0,5
22	24,6	74	0,9	24,0	77,6	0,9	24,4	80,8	0,6
23	24,6	74	0,7	24,0	77,2	1,0	24,2	84,4	0,5
24	24,6	74	0,5	24,0	78,0	0,6	24,2	84,8	0,4

Hor	07			08			09		
	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$
01	24,0	84,8	0,4	24,0	83,6	0,5	25,0	80,4	0,4
02	24,0	87,6	0,7	24,0	86,0	0,6	25,0	82,0	0,2
03	24,0	87,2	0,7	24,0	87,6	0,5	24,0	84,4	0,5
04	24,0	87,6	0,6	24,0	86,4	0,2	24,0	86,4	0,1
05	24,0	88,0	1,1	24,0	85,6	0,1	24,0	86,8	0,2
06	24,0	87,6	1,1	24,0	85,2	0,0	24,0	90,8	0,2
19	26,0	61,6	0,9	26,0	64,4	0,5	25,0	78,4	1,8
20	26,0	61,2	1,0	26,0	63,6	0,3	25,0	79,2	1,0
21	26,0	57,6	0,9	26,0	60,8	0,2	25,0	80,8	1,6
22	26,0	59,2	1,0	26,0	69,2	0,6	24,0	82,4	1,3
23	25,0	72,0	0,7	25,0	77,2	0,7	24,0	83,2	1,6
24	24,0	79,6	0,4	25,0	78,0	0,9	24,0	83,0	1,3

Hor	10			11			12		
	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$
01	24,2	84,0	1,1	24,8	80,4	0,7	24,6	85,2	0,8
02	24,0	84,4	0,9	24,4	84,8	0,5	24,6	85,6	0,3
03	23,8	85,2	0,3	24,2	85,6	0,3	24,8	85,6	0,4
04	23,8	87,6	0,3	24,4	85,2	0,1	24,8	85,6	0,4
05	24,2	86,4	0,3	24,2	87,2	0,1	24,4	87,6	0,1
06	24,0	86,0	0,3	24,2	87,6	0,2	24,0	90,4	0,5
19	25,8	70,0	1,8	25,6	78,8	0,5	27,8	53,2	0,8
20	25,2	76,4	1,4	26,0	75,2	0,6	28,0	51,6	0,4
21	25,2	74,0	1,8	26,2	72,8	0,9	27,0	57,2	0,6
22	25,4	72,4	1,1	26,2	72,0	1,0	25,6	68,0	0,7
23	25,2	74,0	0,9	25,0	79,6	0,7	25,0	77,2	0,5
24	25,3	74,0	0,9	24,6	84,0	0,9	24,8	80,8	0,7

Hor	13			14			15		
	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$	$t_a$ (°C)	$\phi$ (%)	$v(\frac{m}{s})$
01	24,6	83	0,3	24,4	85,2	0,5	24,6	78,0	0,7
02	24,6	85	0,7	24,8	82,8	0,4	24,8	77,6	0,4
03	24	89	1,1	24,0	88,4	0,4	24,8	75,6	0,5
04	24	90	0,5	24,0	90,4	0,1	24,4	74,0	0,7
05	24	90	0,2	23,8	92,0	0,2	24,2	78,4	0,4
06	24	90	0,0	23,4	93,6	0,3	23,8	81,6	0,7
19	26,4	65	2,3	25,2	72,4	1,6	26,2	60,4	0,8
20	26,8	62	1,5	25,0	74,0	1,5	25,8	70,4	1,3
21	26,6	63	1,3	25,2	72,0	1,2	25,2	67,2	1,0
22	25,4	72	1,3	25,0	72,0	1,1	25,2	70,8	0,6
23	25	78	1,4	24,8	75,2	0,8	25,0	72,8	1,4
24	24,4	84	1,1	24,8	75,6	0,7	24,2	83,2	1,2

CUADRO C2

VALORES MEDIO DEL 01-03-98 al 15-03-98

NOCTURNO (Desde las 18 horas hasta las 06 horas)

$\bar{t}_a$ (°C)	$\bar{\phi}$ (%)	$\bar{v}(\frac{m}{s})$
24,67	78,58	0,78

CUADRO C3  
MEDICIONES DE  
 TEMPERATURAS (°C) AMBIENTE, EN LA PLACA Y EN EL AIRE INTERIOR

DIA DEL MES DE MARZO DEL AÑO 1998									
	01			02			03		
Hor	$t_a$	$t_p$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_p$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_p$	$t_{ai}$
01	24,2	23,0	22,4	25,0	22,8	22,6	24,6	23,2	22,8
02	24,4	23,2	22,8	24,0	22,8	22,4	24,6	23,2	22,8
03	24,2	23,2	22,6	24,0	22,8	22,4	24,4	22,8	22,2
04	24,0	23,0	22,4	24,0	22,6	22,2	24,2	23,0	22,4
05	24,2	23,0	22,2	24,0	22,6	22,2	24,2	23,0	22,4
06	24,2	23,0	22,4	24,0	22,0	21,6	24,2	23,2	22,6
19	25,4	23,6	23,8	26,0	22,8	23,4	26,2	23,4	24,0
20	25,2	22,6	22,6	25,0	22,4	22,8	25,8	22,2	22,6
21	25,0	22,8	22,6	25,0	22,4	22,6	25,2	21,4	21,8
22	25,0	23,0	22,8	25,0	22,4	22,4	24,8	21,4	21,6
23	24,8	23,0	22,8	25,0	22,2	22,2	24,6	22,0	21,8
24	24,8	23,0	22,8	25,0	22,8	22,4	24,4	22,4	22,0

	04			05			06		
Hor	$t_a$	$t_p$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_p$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_p$	$t_{ai}$
01	24,4	23,0	22,6	24,0	21,0	20,6	23,8	21,8	21,4
02	24,2	22,8	22,4	24,0	20,8	20,4	23,8	21,8	21,4
03	24,2	22,6	22,2	24,0	21,2	20,8	23,6	22,0	21,6
04	24,2	22,2	21,8	24,0	22,0	21,6	23,4	22,4	21,8
05	24,2	22,0	21,4	24,0	22,2	21,6	23,6	22,4	21,8
06	24,0	20,4	20,0	24,0	22,4	21,8	23,6	22,4	21,8
19	25,2	22,6	23,4	25,0	21,0	21,6	24,6	22,8	23,4
20	24,8	22,2	22,6	24,0	21,0	21,4	24,6	22,4	22,4
21	24,6	21,6	21,8	24,0	22,4	22,4	24,4	22,4	22,2
22	24,6	21,6	21,6	24,0	21,0	21,2	24,4	21,2	21,2
23	24,6	21,8	21,6	24,0	20,4	20,6	24,2	22,0	21,6
24	24,6	21,4	21,0	24,0	21,8	21,4	24,2	22,8	22,4

	07			08			09		
Hor	$t_a$	$t_n$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_n$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_n$	$t_{ai}$
01	24,0	22,8	22,4	24,0	20,6	20,6	25,0	22,0	22,0
02	24,0	22,4	22,2	24,0	19,6	19,8	25,0	21,0	20,8
03	24,0	21,2	21,4	24,0	19,2	19,4	24,0	20,6	20,0
04	24,0	20,0	20,2	24,0	19,2	19,2	24,0	20,8	20,2
05	24,0	21,4	21,2	24,0	19,0	18,8	24,0	21,2	20,4
06	24,0	22,8	22,2	24,0	19,6	19,0	24,0	21,4	20,6
19	26,0	21,8	22,6	26,0	22,0	22,6	25,0	21,6	22,6
20	26,0	21,4	22,0	26,0	22,4	22,4	25,0	21,8	22,2
21	26,0	21,6	22,0	26,0	23,0	23,0	25,0	21,4	21,8
22	26,0	21,4	21,4	26,0	22,6	22,4	24,0	21,4	21,4
23	25,0	20,4	20,4	25,0	22,4	22,6	24,0	22,2	22,0
24	24,0	20,2	20,2	25,0	22,2	22,2	24,0	22,6	22,2

	10			11			12		
Hor	$t_a$	$t_n$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_n$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_n$	$t_{ai}$
01	24,2	22,6	22,0	24,8	21,6	21,6	24,6	20,8	20,4
02	24,0	21,4	21,0	24,4	21,2	21,2	24,6	21,6	20,8
03	23,8	20,2	20,0	24,2	19,8	19,8	24,8	20,8	20,2
04	23,8	21,0	20,4	24,4	19,6	19,2	24,8	20,2	19,6
05	24,2	21,2	20,6	24,2	20,2	19,6	24,4	20,0	19,4
06	24,0	22,2	21,0	24,2	21,2	20,2	24,0	21,8	20,2
19	25,8	22,4	23,2	25,6	22,4	22,6	27,8	24,0	24,0
20	25,2	23,0	23,4	26,0	22,0	21,8	28,0	22,6	22,6
21	26,0	23,6	23,4	26,2	22,6	22,0	27,0	22,0	21,8
22	25,4	23,6	23,2	26,2	22,2	21,8	25,6	21,2	21,4
23	25,2	23,0	22,8	25,0	22,0	21,8	25,0	21,0	20,8
24	25,2	21,8	21,6	24,6	21,8	21,6	24,8	21,2	20,8

Hor	13			14			15		
	$t_a$	$t_b$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_b$	$t_{ai}$	$t_a$	$t_b$	$t_{ai}$
01	24,6	21,2	20,8	24,4	22,0	21,6	24,6	21,4	21,0
02	24,6	21,0	20,4	24,8	22,0	21,6	24,8	21,8	21,4
03	24,0	21,4	20,8	24,0	21,8	21,0	24,8	22,4	21,8
04	24,0	22,0	21,0	24,0	21,8	21,0	24,4	22,4	21,8
05	24,0	21,2	20,2	23,8	22,0	21,2	24,2	22,0	21,4
06	24,0	19,4	18,4	23,4	21,6	21,0	23,8	21,2	20,6
19	26,4	26,4	26,0	25,2	24,4	24,6	26,2	25,0	25,4
20	26,8	23,2	23,4	25,0	22,0	22,6	25,8	22,8	23,2
21	26,6	23,0	23,0	26,2	21,2	21,6	25,2	22,4	22,6
22	25,4	22,6	22,6	26,0	21,4	21,4	25,2	22,2	22,2
23	25,0	22,6	22,6	24,8	21,0	21,0	25,0	21,2	21,4
24	24,4	22,2	22,0	24,8	20,6	20,4	24,2	20,6	20,8

CUADRO C4

VALORES MEDIO DEL 01-03-98 al 15-03-98

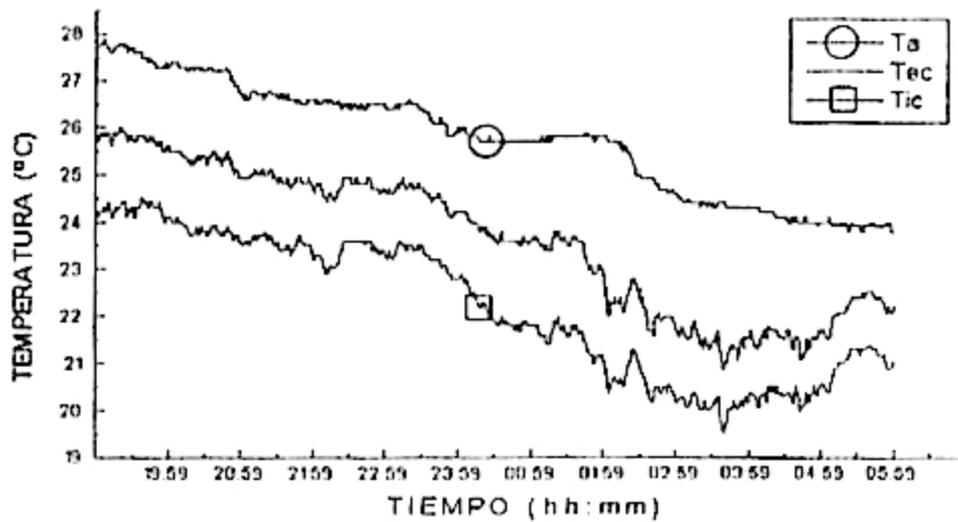
NOCTURNO (Desde las 18 horas hasta las 06 horas)

$\bar{t}_a$ (°C)	$\bar{t}_b$ (°C)	$\bar{t}_{ai}$ (°C)
24,67	21,92	21,72

Ver también anexo A7

**TEMPERATURA DEL COBERTOR Y DEL AMBIENTE  
EN FUNCION DEL TIEMPO**

Inicio: FECHA : 25-03-98 HORA : 19:00:00  
Fin : FECHA : 26-03-98 HORA : 06:00:00



**CUADRO C5**

**VALORES PROMEDIO PARA TODAS LAS MEDICIONES TOMADAS**

**CADA MINUTO**

$\bar{T}_a$	$\bar{T}_{ec}$	$\bar{T}_{ic}$	$(\bar{T}_{ec} + \bar{T}_{ic})/2$
25,75	23,62	22,18	22,90

### 6.3. Análisis y Evaluación de los Resultados

#### 6.3.1. Cálculos para el Enfriamiento Radiativo Nocturno

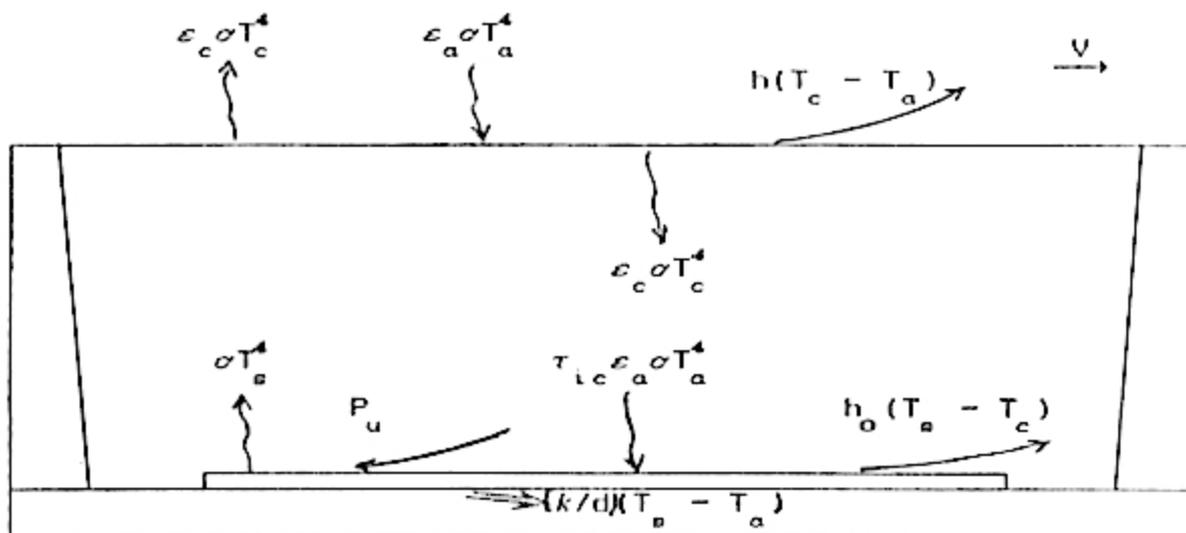


Fig. 17. Balance Térmico

donde:

$\epsilon_a, \epsilon_c, \epsilon_b$ .- emitancias: atmosférica, del cobertor y de la superficie a enfriar respectivamente.

$T_a, T_c, T_b$ .- temperaturas absolutas: atmosférica, del cobertor y de la superficie a enfriar respectivamente.

$h$ .- coeficiente de transferencia de calor por convección entre el cobertor y la atmósfera.

$h_o$ .- coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa y el cobertor.

$k$ .- conductividad térmica del poliuretano.

$d$ .- espesor del aislante térmico.

$V$ .- velocidad del viento.

#### 1] Consideraciones y observaciones

- La transmitancia infraroja de la cubierta de polietileno

no ( $\tau_{ic}$ ), se considera: 0,82. [ 15]

- La atmósfera irradia energía con una emitancia  $\varepsilon_a$ , que se debe calcular a partir de las fórmulas empíricas propuestas: 5.2.23. y 5.2.23'.
- La cubierta no refleja la radiación infraroja; es decir:  $\alpha_{ic} = 1 - \tau_{ic}$
- La cubierta emite radiación infraroja hacia el aire atmosférico, y hacia el aire interior del prototipo con una emitancia:  $\varepsilon_c = \alpha_{ic}$ .
- La placa de enfriamiento emite y absorbe radiación térmica, como si fuera una superficie negra.
- El área de la placa, del cobertor y del fondo del prototipo, se consideran iguales.
- Los cálculos se efectuarán considerando un cobertor ideal ( $\tau_{ic} = 1$ ) y el cobertor real disponible ( $\tau_{ic} = 0,82$ ).
- Para facilitar los cálculos, se omitirán las unidades teniendo en cuenta que todas ellas se expresan en el SI.

## 2] Parámetros a calcular

### \* Emitancia atmosférica ( $\varepsilon_a$ )

a) De cuadro C.2:  $\bar{t}_a = 25^\circ\text{C}$ ;  $\bar{\phi} = 79\%$

b) De la carta psicrométrica: ( $p = 1,013 \text{ Bar}$ )

Con los valores de  $\bar{\phi}$  y  $\bar{t}_a$ , se determina:

$$\boxed{t_R = 21,5^\circ\text{C}} \quad (\text{ver apéndice A.6})$$

c) De las ecuaciones 5.2.23 y 5.2.23' :

$$\epsilon_a = 0,741 + 0,0062 t_R \longrightarrow \boxed{\epsilon_a = 0,87}$$

$$\epsilon_a = 0,711 + 0,56 \cdot \frac{t_R}{100} + 0,73 \left( \frac{t_R}{100} \right)^2 + 0,0012(p-10^3)$$

$$\longrightarrow \boxed{\epsilon_a = 0,88}$$

se ha tomado:  $\boxed{\epsilon_a = 0,87}$

• Coefficiente h

Según relación empírica de McAdams [ 9]

$$h = 5,7 + 3,8\bar{V} \longrightarrow \boxed{h = 8,66 \cdot \frac{W}{m^2 K}}$$

• Coefficiente h<sub>o</sub>

Por corresponder a un volumen de aire que se encuentra inmóvil, se tiene típicamente:

$$\boxed{h_o = 3 \cdot \frac{W}{m^2 K}} \quad [ 10-16]$$

3) Balance térmico según fig. 17

• Se tiene de 1] y 2] en 6.3.1:

$$\epsilon_a = 0,87; \quad \epsilon_c = 0,18; \quad \epsilon_o = 1,00$$

$$h = 8,66 \cdot \frac{W}{m^2 K}; \quad h_o = 3 \cdot \frac{W}{m^2 K}; \quad k = 0,026 \cdot \frac{W}{mK} \quad [ 10]$$

$$T_a \approx \text{cte} \rightarrow T_a = 298K \text{ (cuadro C.2);}$$

$$T_c = ?; \quad T_o = ?$$

• En el estado estacionario:

Se considera la energía calorífica por unidad de tiempo, a través de una superficie de área unitaria.

Luego:

a) Cobertor

Flujo de energía que recibe el cobertor	=	Flujo de energía que cede el cobertor
---	---	---

$$\dot{q}_{RC} = \dot{q}_{CC}$$

$$\alpha_c \epsilon_a \sigma T_a^4 + \alpha_c \sigma T_s^4 + h_o (T_s - T_c) = 2\epsilon_c \sigma T_c^4 + h(T_c - T_a)$$

$$2\epsilon_c \sigma T_c^4 + (h + h_o) T_c = \alpha_c \epsilon_a \sigma T_a^4 + \alpha_c \sigma T_s^4 + h T_a + h_o T_s$$

$$\frac{2\epsilon_c \sigma}{h + h_o} T_c^4 + T_c = \frac{\alpha_c \epsilon_a \sigma}{h + h_o} (T_a^4 + \frac{1}{\epsilon_a} T_s^4) + \frac{h T_a + h_o T_s}{h + h_o} \dots (A)$$

b) Superficie de enfriamiento (placa)

Flujo de energía que recibe la placa	=	Flujo de energía que cede la placa
--	---	--

$$\dot{q}_{RS} = \dot{q}_{CS}$$

$$\tau_{ic} \epsilon_a \sigma T_a^4 + \epsilon_c \sigma T_c^4 + P_u = \sigma T_s^4 + h_o (T_s - T_c) + \frac{k}{d} (T_s - T_a)$$

donde:

$P_u$ , es la potencia útil de enfriamiento que puede producir cada unidad de área de la placa.

Luego:

$$P_u = (\sigma T_s^4 - \tau_{ic} \epsilon_a \sigma T_a^4) - [\epsilon_c \sigma T_c^4 + h_o (T_c - T_s) + \frac{k}{d} (T_s - T_a)] \dots (B)$$

$$P_u = P_{rad} - P_{per} \dots (C)$$

siendo:

$$P_{rad} = (\sigma T_s^4 - \tau_{ic} \epsilon_a \sigma T_a^4) \dots (\text{potencia radiativa}) \dots (D)$$

$$P_{per} = [\epsilon_c \sigma T_c^4 + h_o (T_c - T_s) + \frac{k}{d} (T_s - T_a)] (\text{pérdidas}) \dots (E)$$

#### 4) Enfriamiento en función de $\Delta T$

La potencia útil ( $P_u$ ) debe decrecer con  $\Delta T$  según la información disponible en 5.5, por que las "pérdidas de frío" se incrementan. A partir de las Ecs. (A) y (B) de 3], se obtendrá  $P_u$  vs  $\Delta T$ .

\* Se tiene:

$\alpha_c = \varepsilon_c$  ... por Ley de Kirchhoff

$T_c = T_a - \Delta T$  ... ec. 5.51

$k = 0,026 \frac{W}{mK}$  ;  $d = 0,05$  m

$T_a = 298$  (cuadro C.2)

\* Sustituyendo datos en Ecs. (A) y (B) de 3] en 6.3.1

Ambas Ecs. se expresan en función de  $\Delta T$ , manteniéndose los parámetros  $\varepsilon_c$  y  $\tau_{ic}$  cuyos valores corresponderán a un cobertor ideal ( $\varepsilon_c = 0$ ,  $\tau_{ic} = 1$ ) o real ( $\varepsilon_c = 0,18$ ,  $\tau_{ic} = 0,82$ ).

De Ec. (A) se obtiene:

$$0,97\varepsilon_c \left[ \frac{T_c}{100} \right]^4 + T_c = 0,42\varepsilon_c \left[ 78,86 + 1,15 \left( \frac{298 - \Delta T}{100} \right)^4 \right] - 0,26\Delta t + 298. \quad \dots \quad (I)$$

De Ec. (B) se obtiene:

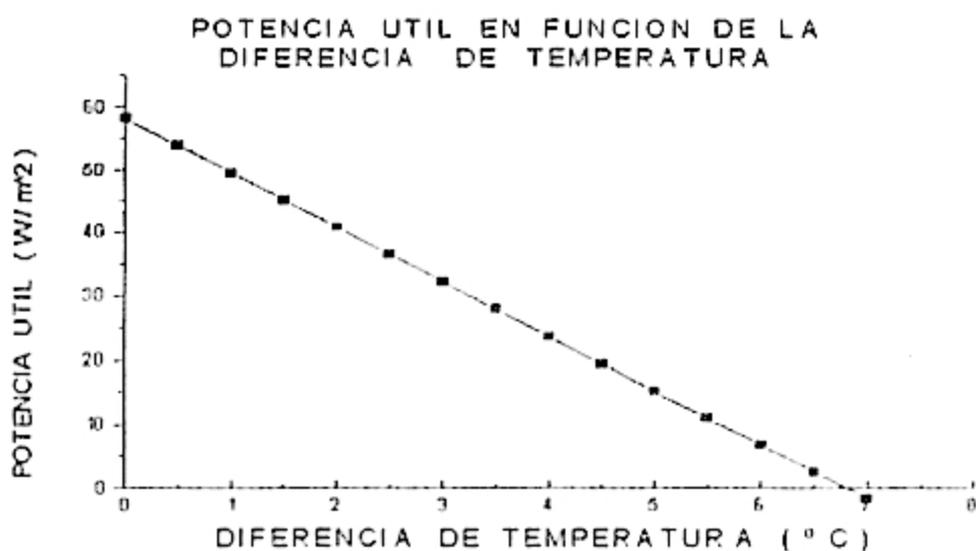
$$P_u = \left[ 5,67 \left( \frac{298 - \Delta T}{100} \right)^4 - 389,02\tau_{ic} \right] - \left[ 5,67\varepsilon_c \left[ \frac{T_c}{100} \right]^4 + 3(T_c - 298) + 3,52\Delta T \right] \dots (II)$$

De Ec. (I) se determina  $T_c$  para cada  $\Delta T$  y se reemplaza en Ec. (II), obteniéndose  $P_u$  vs  $\Delta T$  para los dos tipos de cobertor considerados. Así se tiene:

a) Cálculo de potencia útil, en función de  $\Delta T$  suponiendo un cobertor ideal ( $\tau_{ic} = 1$ )

**Tabla de Valores**

T-1		
$\Delta T(^{\circ}C)$	$T_c$ (K)	$P_U$ ( $W/m^2$ )
0	298.0	58.1
0.5	297.9	53.8
1.0	297.7	49.4
1.5	297.6	45.1
2.0	297.5	40.8
2.5	297.4	36.5
3.0	297.2	32.2
3.5	297.1	27.9
4.0	296.9	23.6
4.5	296.8	19.4
5.0	296.7	15.2
5.5	296.6	10.9
6.0	296.4	6.7
6.5	296.3	2.6



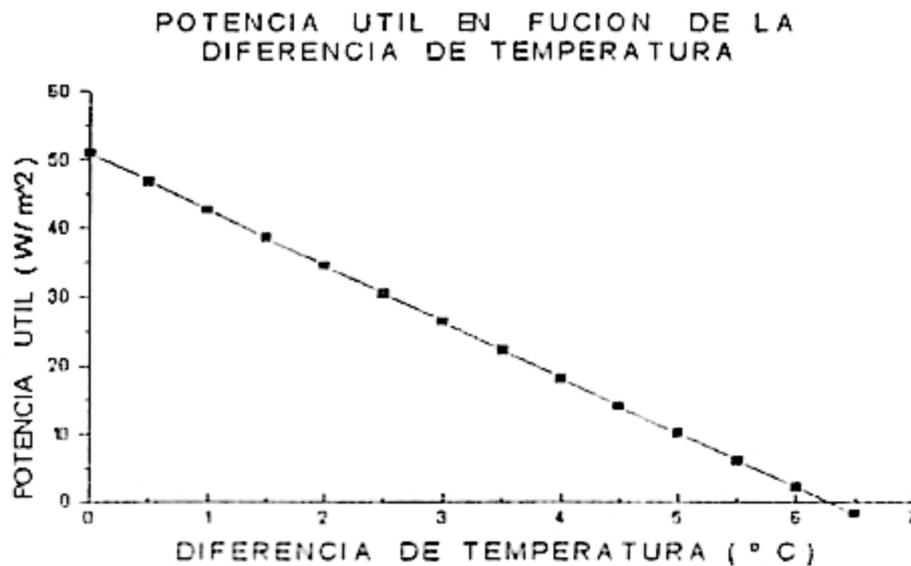
Temperatura de máximo enfriamiento  $\Delta T = 6,8^{\circ}C$ .

Potencia máxima de enfriamiento ( para  $\Delta T = 0$  ),  $P_m = 58,1 W/m^2$

b) Cálculo de potencia útil en función de  $\Delta T$ , suponiendo un cobertor real ( $\tau_{ir} = 0.82$ )

Tabla de Valores

T-2		
$\Delta T$ (°C)	$T_c$ (K)	$P_U$ (W / m <sup>2</sup> )
0	297.2	50.9
0.5	297.0	46.8
1.0	296.9	42.7
1.5	296.7	38.5
2.0	296.6	34.4
2.5	296.5	30.3
3.0	296.3	26.3
3.5	296.2	22.2
4.0	296.0	18.1
4.5	295.9	14.1
5.0	295.7	10.1
5.5	295.6	6.1
6.0	295.4	2.1



Temperatura de máximo enfriamiento  $\Delta T = 6,3$  °C .

Potencia máxima de enfriamiento ( para  $\Delta T = 0$  ),  $P_m = 50,9$  W/m<sup>2</sup>.

\* Interpretación de las Ecs. (D) y (E) de 3] en 6.3.1

a) Potencia radiativa ( $P_{rad}$ )

$$P_{rad} = \sigma T_p^4 - \tau_{ic} \epsilon_a \sigma T_a^4$$

esta Ec. corresponde a la potencia útil si sólo consideramos la interacción radiativa entre la placa y la atmósfera.

Si además:  $\tau_{ic} = 1 \rightarrow$  se obtiene la Ec. 5.2.22

por que:  $P_{rad} = 0 \dots$  (estado estacionario)

entonces:  $\sigma T_p^4 = \epsilon_a \sigma T_a^4 \rightarrow \boxed{T_p = \epsilon_a^{1/4} \times T_a}$  \*

\* En este caso  $T_p$  es la mínima temperatura que puede alcanzar la placa.

b) Pérdidas ( $P_{per}$ )

$$P_{per} = \epsilon_c \sigma T_c^4 + h_o (T_c - T_a) + \frac{k}{d} (T_a - T_p)$$

Las pérdidas (de frío) tienen lugar, por que la placa "absorbe calor" del medio que lo rodea por los mecanismos de:

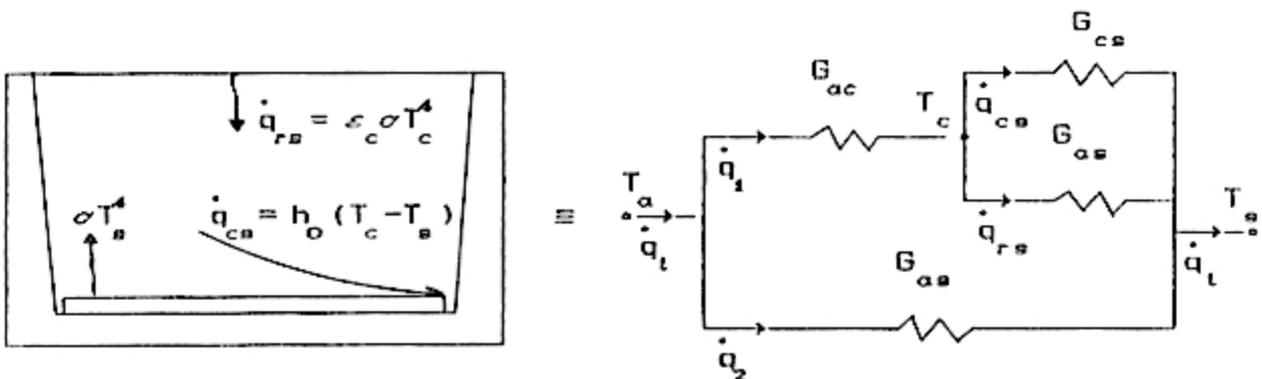
Radiación:  $\epsilon_c \sigma T_c^4$

Convección:  $h_o (T_c - T_a)$

Conducción:  $\frac{k}{d} (T_a - T_p)$

\* Cálculo del coeficiente total de pérdidas ( $h_t$ )

a) Circuito y conductancias térmicas (G)



b) Se tiene:

$$T_c = 295,9 \text{ K} \quad \dots \text{ (Tabla T-2)}$$

$$\Delta T = T_a - T_b = 4,5 \text{ K} \quad \dots \text{ (Tabla T-2)}$$

$$T_a - T_c = 2,85 \text{ K} \quad \dots \text{ (Cuadro C 5)}$$

$$T_c - T_b = (T_a - T_b) - (T_a - T_c) = 1,65 \text{ K}$$

$$\epsilon_c = 0,18 \quad \dots \text{ (cobert real)}$$

c) Del circuito térmico (pérdidas por unidad de área)

$$\dot{q}_{cb} = h_o (T_c - T_b) = G_{cb} (T_c - T_b) \rightarrow G_{cb} = h_o$$

$$G_{cb} = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\dot{q}_{re} = \epsilon_c \sigma T_c^4 - \alpha_c \sigma T_b^4 \cong \epsilon_c \sigma (4T_m^3) (T_c - T_b)$$

$$\text{donde: } T_m = (T_c + T_b)/2 = 295,08 \text{ K}$$

$$\text{entonces: } \dot{q}_{re} = G_{re} (T_c - T_b) \rightarrow G_{re} = 1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

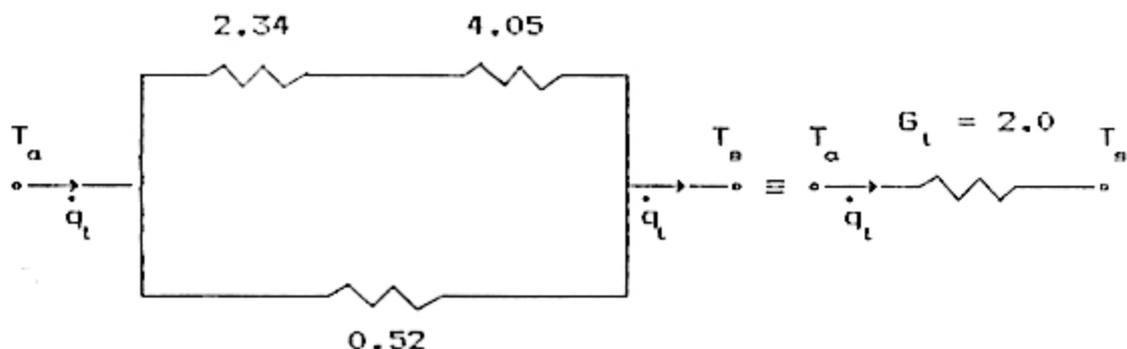
Luego:

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_{cb} + \dot{q}_{re} = G_{ac} (T_a - T_c) \rightarrow G_{ac} = 2,34 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Además:

$$\dot{q}_2 = \frac{k}{d} (T_a - T_b) = G_{ab} (T_a - T_b) \rightarrow G_{ab} = 0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$$

d) Circuito equivalente y  $h_t$



$$\text{Por lo tanto: } \dot{q}_t = h_t (T_a - T_b) = G_t (T_a - T_b) \rightarrow h_t = G_t$$

$$h_t = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

• Margen de error debido al MODAS 84

Observación:

El registrador electrónico de datos tiene una resolución de 8 bits.

a) Temperatura ambiente y de la placa (Pt-100)

Rango: de 0 °C a 50 °C

$$\bar{T}_a = 298 \text{ K}; \quad \Delta\bar{T}_a = \pm \frac{50}{2^8} \rightarrow \boxed{\Delta\bar{T}_a = \pm 0,2 \text{ K}}$$

$$\bar{T}_s = 294,25 \text{ K}; \quad \Delta\bar{T}_s = \Delta\bar{T}_a \rightarrow \boxed{\Delta\bar{T}_s = \pm 0,2 \text{ K}}$$

b) Velocidad del viento (de 0 a 30 m/s)

$$\bar{V} = 0,78 \text{ m/s}; \quad \Delta\bar{V} = \pm \frac{30}{2^8} \rightarrow \boxed{\Delta\bar{V} = \pm 0,1 \text{ m/s}}$$

c) Humedad relativa (de 0 a 100%)

$$\bar{\phi} = 78,56 \text{ \%}; \quad \Delta\bar{\phi} = \pm \frac{100}{2^8} \rightarrow \boxed{\Delta\bar{\phi} = \pm 0,4\%}$$

d) Temperatura del cobertor (LM 335)

Rango: de -40 °C a 100 °C

$$\bar{T}_c = 295,9 \text{ K}; \quad \Delta\bar{T}_c = \pm \frac{140}{2^8} \rightarrow \boxed{\Delta\bar{T}_c = \pm 0,5 \text{ K}}$$

e) Coefficiente h y h<sub>o</sub>

$$h = 5,7 + 3,8 \bar{V}; \quad \Delta h = 3,8 \Delta V \rightarrow \boxed{\Delta h = \pm 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}}$$

$$h_o = 3; \quad \boxed{\Delta h_o = \pm 0,5}$$

f) Emitancia atmosférica y del cobertor

$$\varepsilon_a = 0,87; \quad \varepsilon_a = 0,741 + 0,0062 t_R$$

$$\Delta\varepsilon_a = 0,062 \Delta t_R \rightarrow \boxed{\Delta\varepsilon_a = \pm 0,0012}$$

$$\varepsilon_c = 0,18; \quad \boxed{\Delta\varepsilon_c = \pm 0,005}$$

q) Otros parámetros

$$\tau_{ic} = 0,82; \quad \Delta\tau_{ic} = \pm 0,005$$

$$k = 0,026; \quad \Delta k = \pm 0,0005$$

$$d = 0,05; \quad \Delta d = \pm 0,005$$

h) De ecuación (B)

$$P_u = (\sigma T_a^4 - \tau_{ic} \epsilon_a \sigma T_a^4) - [\epsilon_c \sigma T_c^4 + h_o (T_c - T_a) + \frac{k}{d} (T_a - T_a)]$$

$$\begin{aligned} \Delta P_u = & 4\sigma T_a^3 \Delta T_a - 4\tau_{ic} \epsilon_a \sigma T_a^3 \Delta T_a - \epsilon_a \sigma T_a^4 \Delta \tau_{ic} - \tau_{ic} \sigma T_a^4 \Delta \epsilon_a \\ & - 4\epsilon_c \sigma T_c^3 \Delta T_c - \sigma T_c^4 \Delta \epsilon_c - (T_c - T_a) \Delta h_o - h_o \Delta T_c \\ & + h_o \Delta T_a - \frac{1}{d} (T_a - T_a) \Delta k + \frac{k}{d^2} (T_a - T_a) \Delta d \end{aligned}$$

Reemplazando valores:

$$\Delta \bar{P}_u = \pm 10,3 \text{ W/m}^2; \quad \bar{P}_u = 26,3 \text{ W/m}^2 \text{ (tabla T-2)}$$

Luego:

$$\frac{\Delta \bar{P}_u}{\bar{P}_u} = \pm 0,39$$

## 6.4. Conclusiones y Sugerencias

### 6.4.1. Conclusiones

1. De la tabla de valores T-1, T-2 y las representaciones gráficas correspondientes, se aprecia que la potencia útil máxima, se obtiene cuando la temperatura de la placa es igual a la temperatura ambiente.
2. Los valores de potencia útil calculados, se aproximan a los que se obtendrían para un modelo de Atmósfera Tropical, según la información disponible (Ver fig 13)
3. Como era de esperar, debido al alto contenido de humedad del aire, que se presenta en la ciudad de Lima, la potencia de enfriamiento útil es pequeña. Para los días de evaluación (desde 01-03-98 hasta el 15-03-98) se obtiene un enfriamiento nocturno máximo de 6,3 °C (con cobertor real) y una potencia útil de enfriamiento máximo de 50.9 W/m<sup>2</sup>. Por ejemplo, si se tiene agua, ésta sólo se puede enfriar hasta 6,3 °C por debajo de la temperatura ambiente.

Por otro lado el tiempo ( $\Delta t$ ) necesario para enfriar un litro de agua, 3 °C, con una placa de un metro cuadrado de área, se obtiene a partir del siguiente balance de energía:

$$P_u \cdot (1m^2) = M \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \longrightarrow \Delta t = M \cdot \frac{c}{P_u (1m^2)} \cdot \Delta T$$

$$\Delta t = 1 \text{ kg} \cdot \frac{4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}}{26.4 \text{ W}} \cdot 3^\circ\text{C} \rightarrow \Delta t = 475 \text{ s}$$

$$\Delta t = 7.92 \text{ min}$$

donde: M es la masa (kg) de agua.

c, es el calor específico del agua (4,18 kJ/kg·°C)

4. En el cuadro C4, se esperaba tener:  $t_a > t_{ai} > t_e$ ; sin embargo las mediciones tomadas arrojan:  $t_a > t_e > t_{ai}$ . Si bien es cierto que  $t_e > t_{ai}$ , la diferencia (en promedio) es bastante pequeña, 0,2°C, y puede deberse a que el sensor de platino utilizado para medir  $t_{ai}$ , se conectó al MODAS 84, a través de un módulo de temperatura que pertenece a otro registrador de datos tipo MODAS 84.
5. De acuerdo con los cálculos realizados, el dispositivo prototipo presenta un coeficiente total de pérdida ( $h_t = 2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) que resulta ser el doble del coeficiente ( $h_c = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) considerado en la referencia [4].  
Además dicha referencia muestra en la figura 13 la representación gráfica de las pérdidas, mediante una recta que pasa por el origen de coordenadas y tiene pendiente igual a  $h_c$ , de acuerdo con la relación:  $P_{\text{per}} = h_c \Delta T$ .
6. El margen de error que se ha determinado para la potencia útil media ( $\bar{P}_u$ ) a consecuencia de las limitaciones del equipo registrador de datos, es de aproximadamente 39%, lo cual nuevamente

conduce a resultados que se aproximan a los evaluados para un modelo de Atmósfera Tropical, según figura 13.

Comentario:

Se han continuado con las mediciones, utilizando un equipo de registro y almacenamiento de datos de mayor sensibilidad, el MODAS 1217. Los resultados para  $t_a$ ,  $t_{ai}$  y  $t_e$  se muestran gráficamente en el apéndice A.7, en el cual se puede apreciar como difieren dichas temperaturas a lo largo de las doce horas comprendidas desde las 19: 00 (horas) del 29-06-98 hasta las 07: 00 (horas) del 30-06-98.

**6.4.2. Sugerencias**

1. Se debe procurar la verificación del buen estado de los sensores conectados al equipo de medición, ajustando sus sensibilidades con el recalibrado mediante patrones standards.
2. Elaborar Manuales y Guías de utilización de los sensores que faciliten su empleo en forma correcta y eficiente.
3. Buscar una mayor difusión de la "generación de frío" por medios pasivos, tratando el tema con mayor amplitud en los cursos de la SEPES, por que el enfriamiento radiativo puede tener aplicaciones prácticas en muchas regiones de nuestro país.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. F. TROMBE "Exploitation Du Rayonnement Des Corps Terrestres Pour Produire De Froid dans Les Pays A Ciel Clair" Bull De L'Inst. Int. Du Froid, PP 301-308. (1964)
2. G. CASTELLANOS "Refroidissement D'un Corps Noir Irradiant En Direction De L'Espace Dans Le Desert D'Atacama(Chile)".Int Solar Congress, Paris, PP E20.(1973)
- F. FOURNIER
3. S. CATALANOTTI "The Radiative Cooling of Selective Surfaces"
- V. CUOMO Solar Energy 17,83-89 (1975)
- G. PIRO
- D. RUGGI
- V. SILVESTRINI
- G. TROISE
4. C.G. GRANQVIST "Spectrally Selective Surfaces for Heating and Cooling Applications" Royd F. Potter, Series Editor (1989)
5. FARRINGTON DANIELS "Uso Directo de la Energía Solar" H. Blume Ediciones (1982)
6. ANIBAL VALERA "Optica Física" Editorial Hozlo S.R.L. (1997)
- CARMEN EYZAGUIRRE
7. ANIBAL VALERA "Energía Solar I" Editor: Victor Lopez Guzman (1993)
8. BURGESS H. JENNINGS "Aire Acondicionado y Refrigeración" SAMUEL R. LEWIS Compañía Editorial Continental(1985)

9. JOSE A. MANRIQUE "Energía Solar"  
Harla S.A. (1984)
10. A.F. MILLS "Transferencia de Calor"  
McGraw Hill/Irwin (1997)
11. C.G. GRANDVIST "Materials Science For Solar Energy  
Conversion Systems"  
Pergamon Press. (1990)
12. P. BERDHAL "The Thermal Radiance Of Clear Sky"  
R. FRONBERG Solar Energy 29, PP 299-314 (1982)
13. M. MARTIN "Summary Of Results From The  
P. BERDHAL Spectral And Angular Sky Radiation  
Measurement Program"  
Solar Energy 33, PP 321 (1984)
14. T. NILSSON "A Solar Reflecting Material For  
G. NIKLASSON Radiative Cooling Application: Z<sub>n</sub>S  
C.G. GRANDVIST Pigmented Polyethylene"  
Solar Energy Materials And Solar  
Cells 28, 175-193 (1992)
15. J.A. RABBAT "Medición y Cálculo de la Transmi-  
tancia de Diferentes Materiales Uti-  
lizados en el Aprovechamiento de la  
Energía Solar y Variación de la  
Transmitancia en Función de Diversos  
Parámetros".  
Tesis Para Optar el Grado de Magister  
en Física-UNI-CIENCIAS (1981)

16. DANIEL CABRERA      "Sistemas Solares Para el Calenta-  
                                 miento de Agua"  
                                 PROPER - Bolivia 1996.