

Carlos de Rosa\*

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda  
Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas  
C.C. 507 - 5500 MENDOZA

( LAHV )  
( IADIZA )

## RESUMEN

El enfriamiento radiante a cielo nocturno constituye una estrategia pasiva de particular interés para regiones de clima seco y noches estivales con cielos diáfanos. Desde el punto de vista del diseño de edificios que utilizan esta estrategia mediante cubiertas radiantes, resulta necesario poder evaluar la incidencia de los aspectos morfológicos y dimensionales del radiador y de su entorno, en la efectividad del mismo para disipar calor hacia la bóveda celeste.

Una serie de parámetros intervienen de manera combinada para definir el potencial de enfriamiento de radiadores a cielo nocturno: la distribución de temperaturas efectivas en el hemisferio de la bóveda celeste, el ángulo de vista con que el radiador ve cada punto del cielo, la diferente combinación de estos valores cuando el radiador tiene una determinada pendiente y por último la configuración de los elementos físicos del entorno circundante, que enmascaran parcialmente la visión de la bóveda.

El trabajo se limita en esta etapa a considerar aquellos parámetros que inciden únicamente en la efectividad del acoplamiento radiante entre el radiador y el cielo. El resultado principal es la proposición de una "herramienta de diseño" que permite cuantificar la variación del potencial de enfriamiento del radiador según su pendiente y la configuración de los elementos circundantes que obstruyen parcialmente la porción de cielo vista por el radiador. La metodología utilizada parte de los trabajos de Clark (1) y Berdahl y Fromberg (2) que permiten determinar teóricamente la variación de las temperaturas de cielo sobre la bóveda, en función del ángulo de cenit. El radiador ve los diferentes puntos del cielo según distintos ángulos de vista que condicionan la cantidad de energía disipada hacia la atmósfera. Temperaturas de cielo y ángulos de vista se combinan sobre la bóveda para cada punto o sector de la misma, con distintos valores según varía la pendiente del radiador. Por último los elementos opacos del entorno bloquean parcialmente la visión del cielo, en función de su forma, dimensiones y distancia de la cubierta radiante.

Las "cartillas de potencia" de enfriamiento

radiante combinan estos grupos de variables para distintos casos de pendiente de un radiador plano, permitiendo determinar sobre las mismas el enmascaramiento debido a los elementos del entorno, y la consecuente disminución del potencial.

El trabajo constituye una aproximación teórica al tema y posibilita su posterior perfeccionamiento mediante metodologías matemáticas más precisas, la implementación de modelos computacionales y la verificación experimental de algunos parámetros: en particular, la distribución de temperaturas efectivas del cielo y la energía intercambiada por radiadores en función de sus características superficiales y el ángulo de vista.

## 1. INTRODUCCION

El cielo nocturno es generalmente el absorbente de calor natural más poderoso. Los efectos de las bajas temperaturas del cielo en el enfriamiento de los elementos situados sobre la corteza terrestre son bien conocidos. Desde épocas remotas al hombre ha utilizado este recurso natural para temperar los rigores del verano en su arquitectura vernácula de zonas desérticas; o en algunos casos, para aplicaciones más específicas como la producción de hielo.

El potencial del cielo nocturno como absorbente de calor varía considerablemente según las condiciones atmosféricas. La temperatura del espacio más allá de la atmósfera es muy cercana a la del cero absoluto, aproximadamente 4°K. La atmósfera, sin embargo, actúa a manera de tamiz entre la superficie terrestre y la bóveda celeste. Sus componentes principales, nitrógeno (aprox. 78%) y oxígeno (aprox. 21%), no absorben ni emiten radiación de onda larga, son por lo tanto transparentes en esta banda del espectro de radiación. El resto de los componentes atmosféricos (aproximadamente 1%) está constituido por vapor de agua, dióxido de carbono y polvo en suspensión. Estos elementos absorben energía radiante y la emiten hacia la tierra, de manera que contrarrestan parcialmente el flujo radiante emitido hacia el cielo por edificios o radiadores especializados (3). Dado que la cantidad de CO<sub>2</sub> es aproximadamente constante, el factor de variación más importante en la energía irradiada por la atmósfera hacia la tierra es la cantidad de vapor de agua contenida en la misma, es decir: la humedad absoluta.

\* Arq.-M.A. Invest. Independ. CONICET

Las condiciones de cielo claro, la emisión atmosférica tiene una buena correlación con la humedad absoluta del aire (1), presentando picos de radiación en las longitudes de onda de 7 a 15  $\mu$ m. En el rango entre los 8 y 13  $\mu$ m, sin embargo, se produce una sensible caída de la emisión de la atmósfera. A este efecto se le denomina "ventana atmosférica" y constituye la parte sustancial del recurso climático. Al aumentar el contenido de humedad y la nubosidad, aumenta también la radiación en dicha banda. La "ventana atmosférica" quedará totalmente bloqueada en condiciones de nubosidad espesa. Por esta razón, el enfriamiento radiante a cielo nocturno aparece como una estrategia de enfriamiento particularmente atractiva en zonas áridas, en las que los contenidos de humedad de la atmósfera son bajos y los cielos nocturnos de verano presentan escasa nubosidad.

La cantidad de radiación que puede absorber un cielo nocturno sin nubes varía considerablemente según su ángulo de cenit, desde un máximo posible en el cenit a un mínimo en el horizonte. Esto implica una variación proporcional de las temperaturas efectivas del cielo, en los distintos puntos de la bóveda celeste. Dado que en este trabajo solo se considerarán magnitudes relativas de la depresión de temperaturas de cielo en función de ángulos de cenit, con respecto a la depresión máxima en el cenit, quedará excluida la consideración de las variables debidas al contenido de humedad de la atmósfera. Así mismo, a efectos de mantener el problema dentro de sus términos más simples, no se incluirán los aspectos que determinan la temperatura de trabajo del radiador y su efectiva tasa de enfriamiento: intercambio convectivo con el aire circundante, emisividad del radiador y acople térmico con el resto del sistema.

Un radiador horizontal presenta siempre un máximo potencial de enfriamiento, para condiciones atmosféricas constantes y un determinado sistema. Esto se debe a que el radiador ve el total de la bóveda celeste y que su emisión máxima de energía, en el sentido normal al mismo, es coincidente con la mínima emisión de la atmósfera hacia abajo, en el cenit. A medida que su pendiente se incrementa con respecto al plano de horizonte, el radiador comienza a ver los elementos opacos de su entorno, fundamentalmente el suelo y las estructuras circundantes, cuyas temperaturas superficiales serán generalmente superiores a la temperatura ambiente. Por otra parte, los ángulos con que el radiador ve los distintos puntos del cielo varían, alejándose de la combinación óptima descrita para el radiador horizontal.

El interés fundamental de este trabajo es cuantificar en forma teórica la disminución del potencial de enfriamiento para radiadores en pendiente, cuya visión del cielo se encuentre parcialmente obstruida por los elementos fis-

sicos de su entorno. Esta disminución puede alcanzar valores críticos en entornos urbanos de cierta densidad, indicando al diseñador la conveniencia o no de la aplicación de la estrategia.

## 2. DETERMINACION DEL "COEFICIENTE DE CIELO"

Los valores del "coeficiente de cielo", en función del ángulo de cenit ( $\alpha$ ), determinados en este trabajo, intentan expresar en forma directa el potencial de enfriamiento del cielo nocturno en distintos puntos de la bóveda celeste. En condiciones de cielo sin nubes, la temperatura del mismo es función del contenido de humedad de la atmósfera y de la temperatura del aire cerca del suelo. El gradiente de distribución de temperaturas sobre la bóveda es independiente del ángulo de azimut y presenta una marcada variación según el ángulo de cenit.

La "temperatura efectiva" del cielo nocturno es la temperatura más baja que puede alcanzar un radiador horizontal de emisividad cercana a la del cuerpo negro, que intercambia radiación con la bóveda celeste solamente, en ausencia de todo intercambio conductivo y convectivo con su entorno. No tiene relación con la temperatura real de la atmósfera a cualquier altitud excepto por casualidad (1). Su valor es mínimo en el cenit ( $T_{90}$ ) y máximo en el horizonte ( $T_{90}$ ), en que es prácticamente coincidente con la temperatura ambiente ( $T_a$ ) cerca de la tierra. La distribución de temperaturas entre ambos extremos puede determinarse a partir de la radiación infrarroja emitida por la atmósfera en distintos puntos de la bóveda celeste, en función de  $\alpha$ . Ha sido estudiada por varios autores (2) y constituye el punto de partida para la determinación de los valores de  $T_{\alpha}$  en este trabajo. La "depresión de temperatura de cielo", en un punto dado de la bóveda celeste, definida por su ángulo de cenit ( $\alpha$ ), es la diferencia entre la temperatura efectiva del cielo en el horizonte ( $T_{90}$ ) y la correspondiente a dicho punto ( $T_{\alpha}$ ).

$$\Delta T = T_{90} - T_{\alpha}$$

Este valor es máximo en el cenit ( $T_{90} - T_0$ ) y nulo en el horizonte ( $T_{90} - T_{90}$ ).

El "coeficiente de cielo" ( $C_{\text{ciel}\alpha}$ ) expresará la relación de depresiones de temperatura en  $\alpha$  ( $T_{90} - T_{\alpha}$ ) con respecto a la depresión máxima en el cenit ( $T_{90} - T_0$ ). La ecuación correspondiente es:

$$C_{\text{ciel}\alpha} = P_T = \frac{T_{90} - T_{\alpha}}{T_{90} - T_0} \quad (2)$$

Para determinar los valores de  $P_{T\alpha}$  para distintos ángulos de cenit, se ha partido de los trabajos realizados por Berdahl y Frumberg (2) y Clark (3), en los cuales se ha estudiado

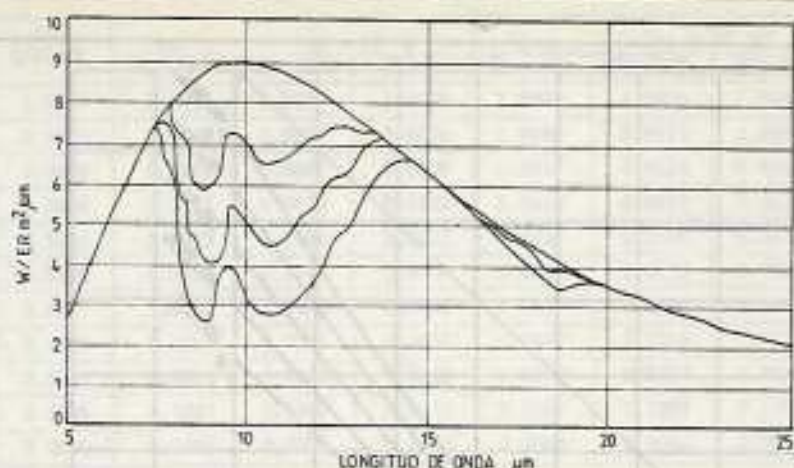


Fig. 1: Radiación espectral de cielo sin nubes, para distintos ángulos de cenit, según Berdahl y Fromberg (2).

do la variación de la energía emitida por distintos puntos de la bóveda celeste en función de un ángulo de cenit. Berdahl y Fromberg han simulado la emisión atmosférica con el programa LOWTRAN 3B, para cuatro ángulos de cenit: 0 - 60 - 75 y 90°, en condiciones "típicas" de cielo estival sin nubes (TBS = 21°C y TPR=16°C cerca del suelo) (Fig. 1).

A partir de la integración de los valores de radiación espectral de estas cuatro curvas, Clark ha derivado un polinomio de ajuste que permite calcular la radiación emitida por un elemento de cielo, según su ángulo de cenit ( $\alpha$ ), expresado en radianes (1).

$$R_{\alpha} = 1 + 0.126(\alpha) - 0.325(\alpha)^2 + 0.278(\alpha)^3 \quad (3)$$

Donde  $R_{\alpha}$  es la radiación infrarroja emitida por un elemento del cielo en  $W/ER \cdot m^2$ . Conocidos los valores de  $R_{\alpha}$ , es posible calcular las correspondientes temperaturas efectivas de cielo ( $T_{\alpha}$ ) según el siguiente método:

1. Cálculo de radiación emitida por la bóveda celeste según su ángulo de cenit. Se ilustran los valores de  $R_{\alpha}$  en los ángulos considerados por Clark.

$$\begin{aligned} R_0 &= 1.0000 \text{ W/ER} \cdot m^2 \\ R_{60} &= 1.0947 \text{ W/ER} \cdot m^2 \\ R_{75} &= 1.2315 \text{ W/ER} \cdot m^2 \\ R_{90} &= 1.4735 \text{ W/ER} \cdot m^2 \end{aligned}$$

ER\* estereo-radián. Unidad de medida de un ángulo sólido con su vértice en el centro de una esfera que determina sobre la superficie de la misma, un cuadrado cuyos lados son iguales al radio.

2. A partir de estos valores se calcula la proporción de la radiación ( $P_{R\alpha}$ ) aplicando la fórmula:

$$P_{R\alpha} = \frac{R_{90} - R_{\alpha}}{R_{90} - R_0} \quad (4)$$

resultando:

$$\begin{aligned} P_{R0} &= 1.0000 \\ P_{R60} &= 0.8000 \\ P_{R75} &= 0.5111 \\ P_{R90} &= 0.0000 \end{aligned}$$

3. Los coeficientes de proporcionalidad de la radiación ( $P_{R\alpha}$ ) permiten calcular las temperaturas efectivas de cielo en  $\alpha$  ( $T_{\alpha}$ ) y las correspondientes proporcionalidades ( $P_{T\alpha}$ ), según el procedimiento siguiente:

- Dado que las "depressiones de temperaturas de cielo" dependen de los valores de la temperatura ambiente ( $T_a \approx T_{g0}$ ) y de los contenidos de humedad del aire, expresados como humedades relativas (HR) o temperaturas de punto de rocío (TPR), se han determinado sus valores para un rango amplio de  $T_a$  (15 - 20 - 25 - 30 - y 35°C) y el rango total de HR (0 - 25 - 50 - 75 y 100%) y sus correspondientes TPR, sobre la carta psicrométrica.
- Para el cálculo de las depressiones de temperatura en el cenit ( $T_{g0} - T_0$ ), se utilizó la fórmula derivada de Givoni (3).

$$\Delta T_{g0} - T_0 = 19 - 0.36 \text{ TPR} \quad (5)$$

Los valores determinados se tabularon y graficaron para los rangos mencionados en 3a, para  $T_a$  y HR (Fig. 2)

c) Con los coeficientes de proporcionalidad de

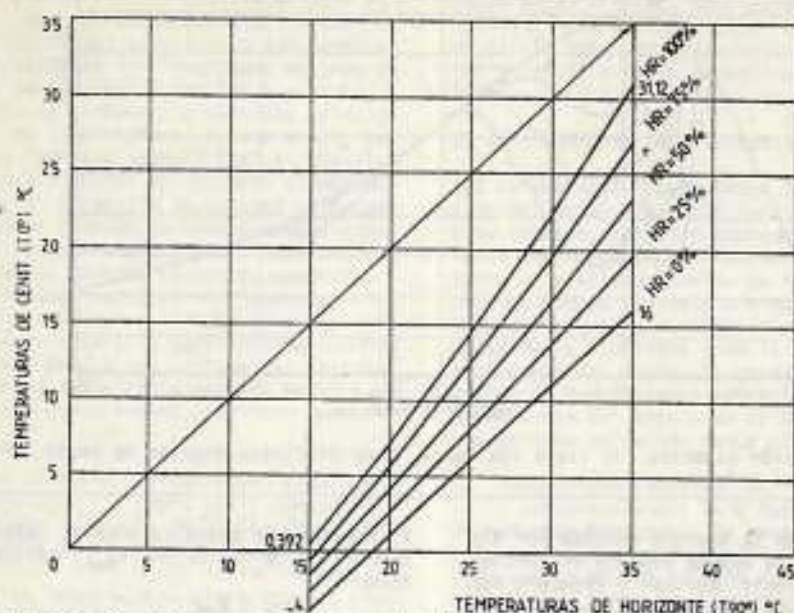


Fig. 2: Variación de temperaturas de cenit ( $T_0$ ), para distintas temperaturas de horizonte ( $T_{90}$ ) y humedades relativas del aire (HR), según Givoni.

radiación ( $P_{R\alpha}$ ) calculados previamente (2), se determinaron los valores de temperaturas de cielo ( $T_{c\alpha}$ ) y las proporciones respectivas ( $P_{T\alpha}$ ). El procedimiento se repitió para los valores mínimos y máximos del rango  $T_0$  elegido (15 y 35°C) y los extremos de rango HR (0 y 100%), de la siguiente forma:

$$P_{R\alpha} = \frac{R_{90} - R_{\alpha}}{R_{90} - R_0} \quad (4)$$

Reemplazando en la expresión  $R_c$  por su equivalente (suponiendo la emisividad del cielo  $\epsilon_{\text{ciel}} = 1$ ):

$$R_{\text{ciel}} = \frac{\sigma T_{\text{ciel}}^4}{\sigma T_{90}^4 - \sigma T_{\alpha}^4} \quad (6)$$

$$P_{R\alpha} = \frac{\sigma T_{90}^4 - \sigma T_{\alpha}^4}{\sigma T_{90}^4 - \sigma T_0^4} \quad (7)$$

Eliminando la constante de Stephan-Boltzman ( $\sigma$ ):

$$P_{R\alpha} = \frac{T_{90}^4 - T_{\alpha}^4}{T_{90}^4 - T_0^4} \quad (8)$$

Despejando  $T_{\alpha}$ :

$$T_{\alpha} = \sqrt[4]{T_{90}^4 - P_{R\alpha}(T_{90}^4 - T_0^4)} \quad (9)$$

d) Para cada ángulo de cenit la operación se repite según los límites fijados de  $T_{90}$  y HR:

1.  $T_{90} = 15^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 0.00\%$ :  $T_{\text{mín}} = -4.00^\circ\text{C}$
2.  $T_{90} = 15^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 100.00\%$ :  $T_{\text{máx}} = 0.30^\circ\text{C}$
3.  $T_{90} = 35^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 0.00\%$ :  $T_{\text{mín}} = 16.00^\circ\text{C}$
4.  $T_{90} = 35^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 100.00\%$ :  $T_{\text{máx}} = 31.12^\circ\text{C}$

Con los valores obtenidos se calculan los coeficientes de proporcionalidad de depresiones de temperaturas de cielo ( $P_{T\alpha}$ )

$$P_{T\alpha} = \frac{T_{90} - T_{\alpha}}{T_{90} - T_0} \quad (1)$$

A partir de los cuatro valores de  $P_{T\alpha}$ , se calculan las medias para  $T_{90} = 15^\circ\text{C}$  y  $35^\circ\text{C}$ , y posteriormente las medias absolutas para los rangos de temperatura y humedad, que se ilustran en forma tabulada para los ángulos de cenit a utilizar en los cálculos posteriores (Fig. 3).

Los valores tabulados de  $P_{R\alpha}$  y  $P_{T\alpha}$  se grafican comparativamente. Las curvas resultantes son muy próximas, coincidiendo en sus extremos ( $\alpha = 0^\circ$  y  $90^\circ$ ) y presentando un error porcentual máximo para  $\alpha = 85^\circ$ , del orden de  $(P_{T\alpha} - P_{R\alpha})/P_{R\alpha} \times 100 = -5.6812\%$  (Fig. 4)

El error porcentual medio para el conjunto de valores es de -1.3158. Si bien sería, a los efectos del cálculo de potencia, más adecuado trabajar con proporciones de radiación; se ha optado en el desarrollo posterior del trabajo, por hacerlo con proporciones de temperatura.

Esto se justifica por varias razones: una ma-

ANGULO DE CENIT $\alpha^\circ$	$P_{R\alpha}$ S/CLARK	$T_{g0} = 15^\circ\text{C}$			$T_{g0} = 35^\circ\text{C}$			$P_{T\alpha}$ MED B-35
		$P_{T\alpha}$ HR = 0%	HR = 100%	MED $5^\circ\text{C}$	$P_{T\alpha}$ HR = 0%	HR = 100%	MED $5^\circ\text{C}$	
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.9879	0.9863	0.9870	0.9866	0.9868	0.9871	0.9869	0.9867
15	0.9668	0.9632	0.9644	0.9638	0.9637	0.9665	0.9651	0.9644
25	0.9658	0.9621	0.9630	0.9625	0.9626	0.9639	0.9632	0.9628
35	0.9597	0.9553	0.9569	0.9561	0.9558	0.9588	0.9573	0.9567
45	0.9299	0.9626	0.9247	0.9236	0.9232	0.9278	0.9255	0.9245
55	0.8577	0.8447	0.8480	0.8463	0.8453	0.8557	0.8505	0.8484
65	0.7244	0.7032	0.7084	0.7058	0.7047	0.7216	0.7131	0.7049
75	0.5111	0.4863	0.4921	0.4892	0.4879	0.5077	0.4978	0.4935
85	0.1989	0.1837	0.1868	0.1852	0.1842	0.1959	0.1900	0.1876
90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fig. 3: Tabla comparativa de valores de  $P_{R\alpha}$ , según Clark y valores obtenidos de  $P_{T\alpha}$ , para  $T_{g0}$ : 15 y  $35^\circ\text{C}$  y HR 0 y 100%, medias parciales y totales.

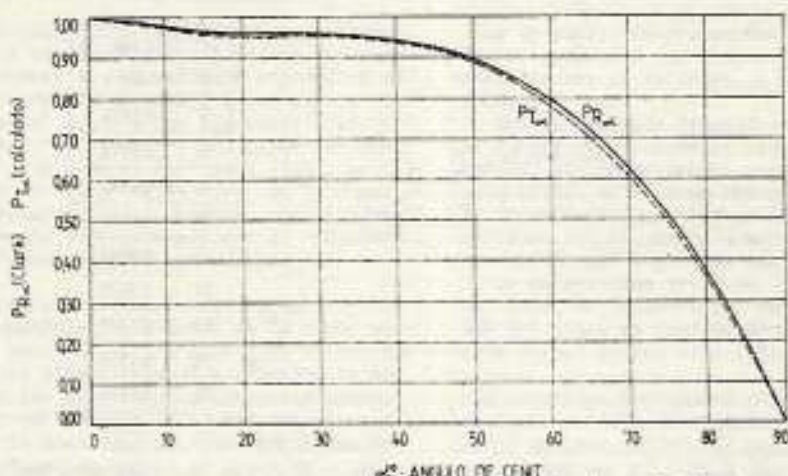


Fig. 4: Variación de proporción de la radiación de cielo ( $P_{R\alpha}$ ), según Clark, y proporción de Temperaturas de cielo calculadas ( $P_{T\alpha}$ ), para distintos ángulos de cenit ( $\alpha$ ).

por simplicidad en el manejo de los valores, un error pequeño en la aproximación numérica, que por ser negativo configura una situación conservativa y finalmente que el error presenta los valores más altos para potenciales más bajos.

Dado que las curvas resultantes calculadas a partir del polinomio derivado por Clark presentan inflexiones que no deberían registrarse, suponiendo una variación armónica de temperaturas efectivas de cielo entre el cenit y el horizonte, se ha derivado una nueva función polinómica por el método de mínimos cuadrados, tomando como fijos los valores calculados de  $P_{T\alpha}$  para  $\alpha = 0 - 60 - 75$  y  $90^\circ$ , utilizados por Clark.

La nueva ecuación es:

$$P_{T\alpha} = \text{Cos}(0.0000003 + 0.1748982 (\alpha) + 0.0046278 (\alpha)^2 + 0.0000504 (\alpha)^3) \quad (10)$$

La graficación comparativa de ambas curvas muestra las diferencias en su configuración (Fig. 5). El error medio es de 8.56%.

e) Se adoptan como "coeficientes de cielo" los valores resultantes del cálculo de  $P_{T\alpha}$  corregidos. Dividiendo la bóveda celeste en franjas horizontales, según incrementos de  $10^\circ$  de ángulo de cenit y determinado los correspondientes al paralelo medio de cada franja. (Fig. 6)

### 3. DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE VISTA

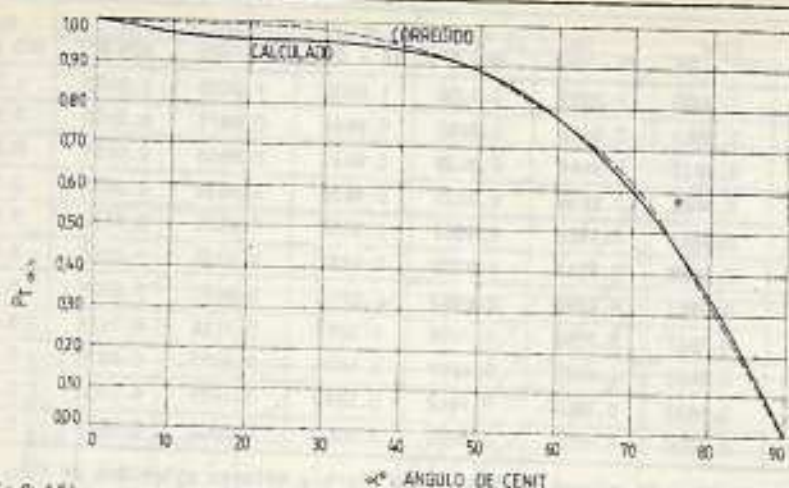


Fig. 5: Gráfica comparativa de la proporción de temperatura de cielo ( $P_T$ ), calculada y corregida para una variación armónica según el ángulo de cenit ( $\theta$ ).

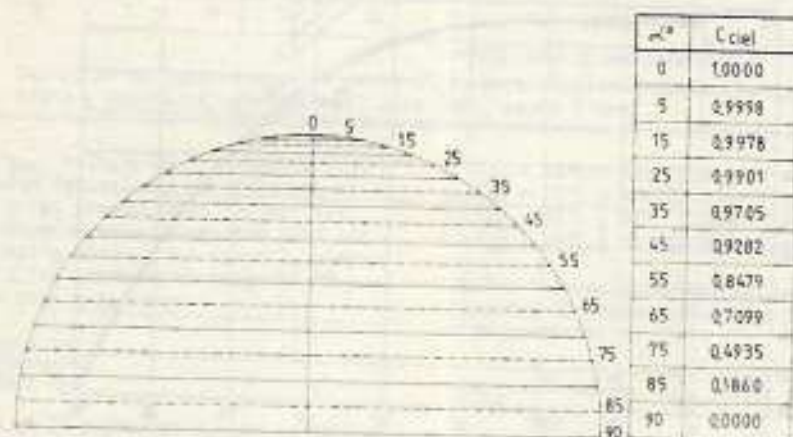


Fig. 6: Valores adoptados para el coeficiente de cielo ( $C_{\text{ciel}}$ ), en los paralelos medios de las franjas consideradas y su distribución en la bóveda celeste.

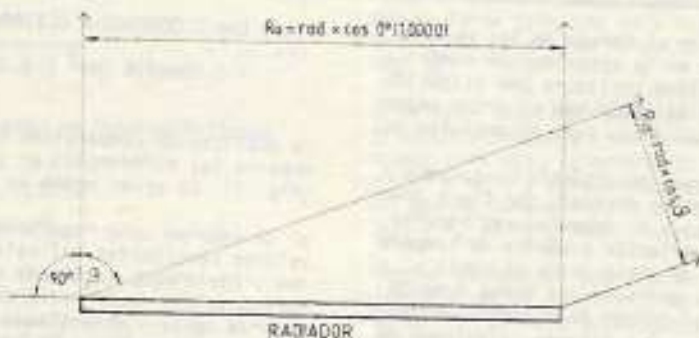


Fig. 7: Variación de la cantidad de energía ( $R_\theta$ ) para un radiador plano y homogéneo, en el sentido normal al mismo y con un ángulo respecto a la normal.

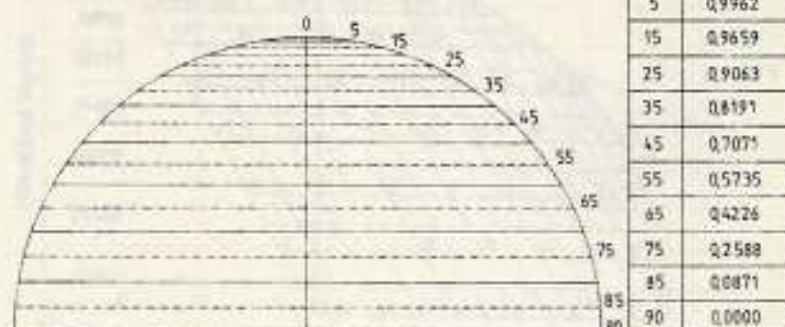


Fig. 8: Valores adoptados para el coeficiente de vista ( $C_{vist}$ ), en los paralelos medios de las franjas consideradas y su distribución en el campo de vista hemisférico de un radiador plano.

Un radiador horizontal tendrá una exposición máxima a la bóveda celeste. A medida que cambia su inclinación, el radiador disminuirá su visión del cielo y comenzará a ver partes de su entorno: el suelo y los elementos físicos circundantes, cuya temperatura puede ser mayor que la del cielo en el horizonte ( $T_{00}$ ), particularmente en las primeras horas de la noche. En este trabajo no se considera, por el momento, la energía intercambiada por el radiador con los elementos opacos circundantes.

Si suponemos el radiador como una superficie plana y homogénea, cada punto de la misma absorberá y emitirá energía con igual intensidad en todas las direcciones. Sin embargo, la sumatoria de los intercambios puntuales estará en función del "ángulo de vista" del plano del radiador. Es decir que el intercambio máximo será en el sentido normal al plano del radiador y nulo en el mismo. La variación entre ambos extremos puede suponerse como ajustada al coseno del ángulo ( $\beta$ ), entre la normal a la superficie y un rayo emitido en una dirección dada (Fig. 7).

Se adopta por lo tanto, como "coeficiente de vista", el valor del coseno del ángulo  $\beta$ , calculado y tabulado para los paralelos medios de las franjas resultantes de dividir el campo de vista hemisférico de un radiador plano, según planos paralelos al mismo, con incrementos angulares de  $\beta$  de  $10^\circ$  (Fig. 8).

#### 4. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ENFRIAMIENTO DE RADIADORES PLANOS SEGUN SU PENDIENTE

A todo radiador plano de una pendiente conocida correspondarán dos series de coeficientes: de cielo ( $C_{ce}$ ) ( $\alpha$ ) y de vista ( $C_{vist}$ ) ( $\beta$ ), cuyos valores se distribuyen según paralelos sobre superficies semiesféricas. Igualando los ra-

dios de ambas, se producirán intersecciones de dichos paralelos que fragmentarán las superficies comunes en sectores. A cada sector correspondará:

1. Una determinada fracción de superficie de la esfera que, cuando el radio es igual a la unidad, son coincidentes con el valor de su ángulo sólido en estereo-radianes (ER).
2. Un determinado valor de "coeficiente de cielo" dado por el paralelo medio de cada sector en función del ángulo de cenit ( $\alpha$ ) (Fig. 7).
3. Un determinado valor de "coeficiente de vista" dado, de igual forma, por el paralelo medio del mismo en función de su ángulo respecto a la normal al radiador ( $\beta$ ) (Fig. 9).

Los paralelos correspondientes a los valores de cielo y vista se intersectan en el punto medio de cada sector. El producto de ambos coeficientes por el área o ángulo sólido correspondiente, es expresión directa del potencial de enfriamiento radiante del sector. La sumatoria de los valores sectoriales así obtenidos para la fracción del cielo vista por el radiador expresará el potencial de enfriamiento del mismo en función de su pendiente.

Para el caso de un radiador horizontal, los coeficientes de cielo y vista máximos son coincidentes, además de que el radiador ve el total de la bóveda celeste. Es obvio, por lo tanto, que el potencial de enfriamiento es máximo en esta situación y podemos considerarla como el 100.00% de referencia, para calificar el potencial de radiadores con pendientes ( $\beta$ ) entre el 0 y  $90^\circ$ ; tanto para el valor total (sumatoria de sectores) como para el unitario correspondiente a cada sector o franja.

Se ha calculado mediante este procedimiento el potencial de enfriamiento radiante para cuatro

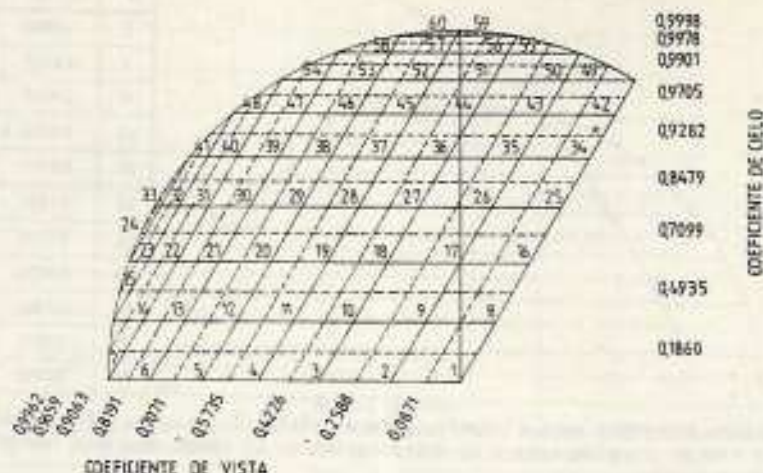


Fig. 9: Sectorización de la mitad de la fracción de cielo vista por un radiador plano, con pendiente de 60°, según sus coeficientes de cielo y vista.

FRANJA N	SECTOR K	C <sub>ciel</sub>	C <sub>vista</sub>	Coef. Comb.	Angulo Sólido Sector	Angulo Sólido Franja	Angulo Sólido x C.C.	Sumato ria Franja	Potenc. Sector %	Potenc. Franja %
	1	0.1860	0.0871	0.0162	0.0351		0.0006		0.0434	
	2	"	0.2588	0.0481	0.0351		0.0017		0.1229	
	3	"	0.4226	0.0786	0.0355		0.0028		0.2024	
	4	"	0.5735	0.1067	0.0366		0.0039		0.2819	
	5	"	0.7071	0.1315	0.0391		0.0051		0.3687	
	6	"	0.8191	0.1523	0.0472		0.0072		0.5205	
	7	"	0.9063	0.1686	0.0534		0.0090		0.6507	
1						0.2840		0.0303		2.1906

(Tabla 1)

Pendiente de radiador $\delta$	Fracción de la bóveda vista por el radiador	Potencial de enfriamiento radiante (%) Prad $\delta$
0°	1.0000	100.0000
30°	0.8333	85.9600
60°	0.6567	62.6374
90°	0.5000	36.1119

(Tabla 2)

casos de pendiente del radiador: 0° (horizontal), 30°, 60° y 90° (vertical). Ejemplificando para el caso de 60°, se divide la fracción de bóveda celeste vista por el radiador según los sistemas de paralelos de cielo y vista, en 60 sectores para medio cielo, siendo la otra mitad simétrica en todas las magnitudes. (Fig. 9)

Los valores de cada uno de los sectores, dados por el producto de ambos coeficientes por el

ángulo sólido correspondiente, sus sumatorias parciales por franja y las totales para medio cielo, son magnitudes que adquieren significación al asignarles cantidades porcentuales con respecto al potencial de enfriamiento total de un radiador horizontal. Así por ejemplo, para el caso del radiador a 60° de pendiente, el cálculo para la franja horizontal inferior, compuesta por los sectores 1 a 7, arroja los siguientes valores: (Tabla 1).



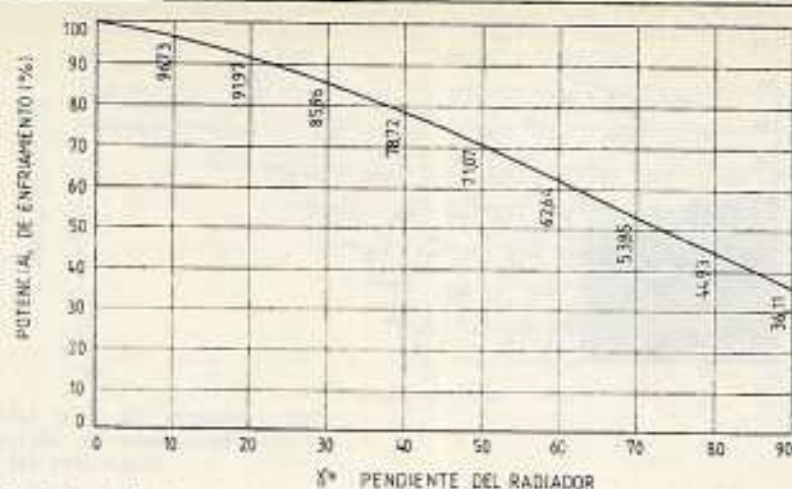


Fig. 10: Variación del potencial de enfriamiento de un radiador plano, según su pendiente, con referencia al valor de un radiador horizontal.

La sumatoria de las nueve franjas con un total de 60 sectores, resulta en los siguientes valores para medio cielo:

Sumatoria ángulos sólidos: 2.0927 ER

Sumatoria ángulos sólidos por coeficientes combinados: 0.8664 (ER x C.C.)

Potencial total de enfriamiento respecto de un radiador horizontal: ( $P_{rad 60}$ ): 62.6374%

Al potencial total de enfriamiento radiante para los cuatro casos de pendiente del radiador calculados, para la fracción de la bóveda celeste vista por el radiador en cada caso, corresponden las siguientes magnitudes (Tabla 2).

Con los cuatro valores obtenidos se ha derivado, por el método de mínimos cuadrados, un polinomio de tercer grado que permite calcular el potencial de enfriamiento de un radiador ( $P_{rad X}$ ), que intercambia energía radiante solamente con la bóveda celeste, para cualquier pendiente del mismo, entre 0° y 90°; en función de su pendiente ( $X$ ) con respecto al plano horizontal, en ausencia de todo enmascaramiento:

$$P_{rad X} = 100.0000 - 0.2457(X) - 0.0085(X)^2 + 0.00003752(X)^3 \quad (11)$$

Calculando los valores cada 10° y graficando: (Fig. 10)

##### 5. DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE DISEÑO

El objetivo primario de la herramienta de diseño que se propone, es cuantificar el enmascaramiento parcial de la bóveda celeste por elementos opacos de su entorno, y la consecuente disminución porcentual del potencial de enfriamiento radiante, para radiadores con pen-

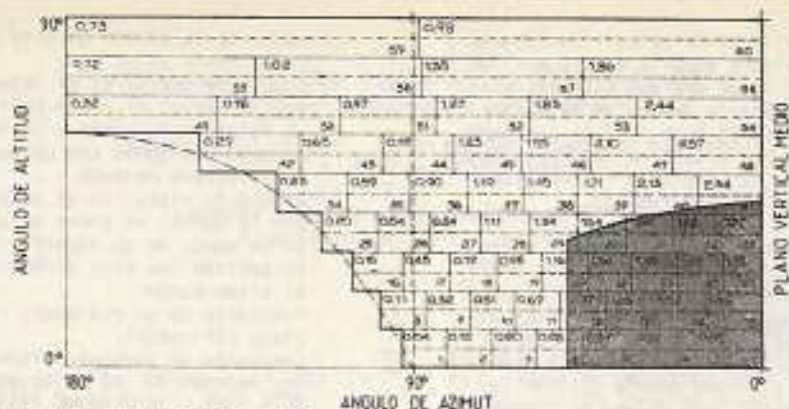
dientes dadas entre 0° y 90°.

La herramienta toma el formato de una "cartilla de potencial", debiendo desarrollarse una gráfica para cada caso de pendiente del radiador. En una primera etapa se desarrollarán para radiadores con incrementos de pendiente de 10° entre 0° y 90°. Cada cartilla representa en forma plana la bóveda celeste, dividida en franjas y sectores sobre los cuales consta el potencial de enfriamiento de cada sector con respecto al potencial total de un radiador horizontal que ve toda la bóveda celeste, es decir, sin enmascaramientos parciales. La delimitación de los sectores toma la forma de curvas sobre la cartilla. A efectos de simplificar la gráfica y su utilización, se han reemplazado las curvas por rectas verticales, coincidentes con la intersección de la curva en el paralelo medio del sector.

Los triángulos definidos entre las verticales y las curvas compensan aproximadamente sus áreas o ángulos sólidos.

Todo objeto opaco que bloquee parcialmente la visión del cielo de un radiador de pendiente conocida, podrá trasladarse sobre la cartilla según las coordenadas angulares, azimut y altitud, de los puntos determinantes de su perfil, consideradas a partir del punto medio del radiador. En el desarrollo de las cartillas, se presentan dos alternativas según se tome como referencia el plano del radiador, o el plano del horizonte. Si bien los sectores que no "ven" el cielo son los mismos en ambas situaciones y la disminución del potencial por enmascaramiento es también idéntica, existen ventajas e inconvenientes de orden práctico en uno y otro caso.

Ejemplificando nuevamente para un radiador con



Potencial total del radiador a 60°: 62.6374 %  
 Disminución por enmascaramiento: 17.3396 %  
 Potencial resultante: 45.2978 %

Fig. 12: "Cartilla de potencial" de enfriamiento radiante con enmascaramiento parcial según el ejemplo (Fig.11), para un radiador con pendiente de 60°, tomando como plano de referencia el del horizonte.



Potencial total del radiador a 60°: 62.6374 %  
 Disminución por enmascaramiento: 17.3396 %  
 Potencial resultante: 45.2978 %

Fig. 13: "Cartilla de potencial" de enfriamiento radiante con enmascaramiento parcial según el ejemplo (Fig.11), para un radiador con pendiente de 60°, tomando como plano de referencia el del radiador.

ta en ambos casos son coincidentes. La alternativa uno, plano de referencia horizontal, presenta la ventaja práctica de que las líneas verticales del perfil de enmascaramiento se trasladan como verticales a la cartilla. La segunda alternativa, si bien presenta una mayor dificultad en la determinación de los perfiles sobre la cartilla, permitiría evaluar la incidencia negativa en el potencial de enfriamiento del radiador, de las superficies opacas, fundamentalmente el suelo, vistas por el mismo, cuando las temperaturas superficiales de éstas sean superiores a  $T_{g0}$ .

En esta etapa, se completará el desarrollo de las cartillas para la primera alternativa, limitando la determinación de la disminución del potencial de enfriamiento exclusivamente al enmascaramiento parcial de la bóveda. El método permite en etapas futuras su perfeccionamiento mediante procedimientos de integración numérica, llegando a su culminación con el desarrollo de un modelo computacional que calcule el potencial de enfriamiento de radiadores planos con cualquier pendiente, según configuraciones y temperaturas superficiales de los elementos de su entorno.

Desde el punto de vista de la utilización efectiva de la herramienta durante el proceso de diseño de edificios que empleen esta estrategia, conviene mantenerla dentro de la máxima simplicidad posible. En este caso se limitaría a la optimización del diseño de las cartillas y su método de uso, a partir de los resultados a que se llega en este trabajo.

Futuros desarrollos podrían incorporar a los modelos computacionales el resto de las variables fundamentales involucradas en el cálculo: temperatura y humedad del aire, velocidad del viento, emisividad y superficie del radiador, etc., lo que permitiría cuantificar la cantidad de calor que el mismo podría disipar hacia el cielo nocturno, por unidad de tiempo o ciclo de enfriamiento, para un sistema definido

## 6. RECONOCIMIENTOS

La mayor parte de los métodos matemáticos utilizados en el desarrollo del trabajo han sido realizados con el asesoramiento permanente y la generosa colaboración del Dr. Ricardo Leiva, perteneciente al Grupo de Estadística del Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Mendoza (CRICYTME).

## 7. NOMENCLATURA

- $C_{\text{cielo}\alpha}$  : "Coeficiente de cielo", para un ángulo de cenit ( $\alpha$ ) expresa la relación entre la depresión de temperatura de cielo en  $\alpha$ , respecto a la depresión máxima en el cenit ( $\alpha = 0^\circ$ ).
- $C_{\text{vista}\beta}$  : "Coeficiente de vista" para un ángulo  $\beta$  entre la normal a un radiador y un rayo emitido con otra inclinación. Expresa la relación entre la cantidad de energía emitida por el radiador en la dirección  $\beta$ , respecto a la emisión máxima en sentido normal al radiador ( $\beta = 0^\circ$ ).
- HR : Humedad relativa del aire.
- $P_{\text{rad}\delta}$  : Potencial de enfriamiento radiante de un radiador según su pendiente ( $\delta$ ).
- $P_{\text{R}\alpha}$  : Proporcionalidad de las diferencias de radiación emitidas por la bóveda celeste respecto a la emisión en el horizonte, en un ángulo de cenit  $\alpha$  y en el cenit ( $\alpha = 0^\circ$ ).
- $T_{\text{cielo}\alpha}$  : Idem  $C_{\text{cielo}\alpha}$ .
- $R_{\text{cielo}}$  : Radiación infrarroja emitida por la bóveda celeste hacia la tierra.
- $R_{\alpha}$  : Radiación infrarroja emitida por un elemento de cielo, cuyo ángulo de cenit es  $\alpha$ .
- TPR : Temperatura de punto de rocío.
- $T_{\text{ce}\alpha}$  : Temperatura efectiva del cielo, para un ángulo de cenit  $\alpha$ .
- $\Delta T_{\text{ce}\alpha}$  : Depresión de temperatura de cielo en  $\alpha$ . Expresa la diferencia entre la temperatura efectiva de cielo en el horizonte y la correspondiente a un

punto de la bóveda celeste cuyo ángulo de cenit es  $\alpha$ .

- $\alpha$  : Ángulo de cenit. Es el determinado por la normal al plano horizontal en un determinado punto y la recta que conecta ese punto con un punto dado de la bóveda celeste.
- $\beta$  : Angulo de vista. Es el determinado por la normal al plano de un radiador en un punto de su superficie y un rayo emitido con otra dirección desde el mismo punto.
- $\delta$  : Pendiente de un radiador, respecto al plano horizontal.
- $\sigma$  : Constante de Stephan-Boltzman. Su valor depende de las unidades:  
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4)$   
 $\sigma = 4.88 \cdot 10^{-8} \text{ (Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4)$

## 8. REFERENCIAS

- Clark, G. "Passive/Hybrid Comfort Cooling by Thermal Radiation". Actas de la International Passive and Hybrid Cooling Conference AS-ISES, Miami, 1981.
- Berdahl, P.; Fromberg, R. "An Empirical Method for Estimating the Thermal Radiance of Clear Skies". Lawrence Berkeley Report. University of California, Berkeley, 1981.
- Givoni, B. "Cooling by Longwave Radiation. Review and Evaluation". Passive Solar Journal Volumen 1 N°3, 1982.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- Clark, G. "A Radiative Cooling Bibliography". Passive and Hybrid Cooling. Notebook Passive Cooling Conference. AS-ISES, Miami, 1981.
- Yellot, J. "Radiative Cooling and Heating of Buildings". Passive and Hybrid Cooling. Notebook. Passive Cooling Conference. AS-ISES, Miami, 1981.
- Givoni, B. "Experimental Studies on Radiant and Evaporative Cooling of Roofs". Actas de la International Passive and Hybrid Cooling Conference. AS-ISES, Miami, 1981.
- Givoni, B. "Man, Climate and Architecture" 2a Edición. Van Nostrand Reinhold Company Nueva York, 1981.
- Clark, G.; Allen, C. "Estimation of Atmospheric Radiation for Clear and Cloudy Skies". Actas de la Second National Passive Solar Conference. AS-ISES, Filadelfia, 1978.
- Clark, G.; Berdahl, P. "Radiative Cooling Resource and Applications". Actas del Passive Cooling Workshop. Berkeley, 1980.
- Givoni, B. "Cooling Buildings by Passive Systems". Actas de la International Passive and Hybrid Cooling Conference. AS-ISES, Miami, 1981.
- Benedetti, M. "Natural Cooling in Hot Arid Regions", en Solar Energy Applications in Buildings. Academic Press. Nueva York, 1978.