

Análisis Comparativo de Ganancias de Calor en Techos: Aislamiento Térmico vs. Superficie de Baja Absortancia.

M. en C. Odón de Buen R.
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería, UNAM

Ing. Jorge Montaña
Centro de Investigación y Desarrollo de los Recursos Naturales de Sonora (CIDESON)
Hermosillo, Sonora

Resumen

La importancia del sector residencial como consumidor de energía eléctrica ha ido en aumento en México. De este sector son los usuarios en regiones de clima cálido quienes hoy realizan la mayor parte de ese consumo y tienen mayores consumos unitarios. Esto se debe a que estos usuarios hacen uso de la electricidad para enfriar sus hogares. La necesidad de enfriar esta fuertemente determinada por las características físicas de las construcciones. El techo es uno de los elementos por donde se gana la mayor parte del calor a extraer. En este documento realizamos una comparación de dos alternativas para disminuir las ganancias térmicas que se pueden tener a través del techo, una (el aislamiento) reduce la conducción y la otra (pintura de baja absortancia) evita el calentamiento solar del techo. Por medio de una simulación dinámica en base a funciones de transferencia demostramos teóricamente que, para ciertas condiciones iniciales del techo, es más rentable el uso de las superficies de baja absortancia que el uso de aislamiento térmico.

I. Antecedentes.

La importancia del sector residencial como consumidor de energía eléctrica ha ido en aumento en México. En poco más de diez años ha pasado de consumir el 20.3% (1982) al 25.2% (1993) del consumo final de energía eléctrica en el país. De este sector, los usuarios ubicados en regiones de clima cálido han sido los de mayor crecimiento, ya que en el mismo período (1982 a 1993) pasaron de representar el 10.0 % al 12.8%. del total nacional.

El crecimiento del consumo correspondiente a los usuarios ubicados en regiones de clima cálido (Tarifas 1A, 1B, 1C y 1D) se debió una tasa anual de crecimiento más alta del consumo (7% vs 6.4%) y del número de usuarios (6% vs. 4.5%) respecto del de los usuarios en clima templado (Tarifa 1). Al finalizar 1993, los usuarios ubicados en regiones de clima cálido sumaron 6,554,812 y compraron 12,933 GWh de electricidad, lo que resulta en un consumo promedio de 1.97 MWh/usuario (CFE 1994).

Los usuarios en tarifas de clima cálido ubicados en los estados fronterizos del norte de México son especialmente importantes por sus niveles de consumo de electricidad. El consumo de estos usuarios representó en 1993 el 6.8% del consumo final nacional de electricidad, 26.8% del consumo nacional de los usuarios residenciales y el 53% del consumo de los usuarios en clima cálido a nivel nacional (CFE 1994). En todos estos estados, la participación de estos usuarios en el consumo total para el estado fue de más del 15%, llegando, como en el caso de Tamaulipas, al 30.5% del total estatal.

Los consumos promedios de los usuarios en tarifas de clima cálido ubicados en los estados fronterizos son más altos que en el resto de la república. En promedio por usuario, los usuarios en clima cálido de la región consumieron en 1993 68% más que el promedio nacional (2.61 MWh/año) y llegaron a tener niveles de 3.33 MWh/año para Sonora y de 5.2 MWh/año para Baja California Norte (CFE 1994). Estos (relativamente) altos niveles de consumo son resultado de que el uso de equipos de aire acondicionado es muy común en la región, llegando a representar más de la mitad del consumo eléctrico anual del consumo total de los usuarios del sector en ciudades como Mexicali (de Buen 1993).

El consumo de electricidad para acondicionar las casas tiene impactos considerables a todos niveles. Para los usuarios que hacen uso de equipos eléctricos para este propósito, los altos consumos representan un impacto muy importante en sus gastos, llegando a representar hasta 20% de los ingresos de una familia en algunos sectores de la población (de Buen 1993). Para la empresa eléctrica el uso del aire acondicionado implica presiones para el crecimiento del sistema porque su uso ocurre al mismo tiempo que la demanda máxima del sistema, como se manifiesta en las divisiones Norte, Noreste, Noroeste y Baja California Norte de la Comisión Federal de Electricidad (Figura 1). Juntas, las demandas máximas coincidentes anuales de estas divisiones (que ocurren en verano) representaron, en 1993, 7,400 GW; para las tres regiones que forman parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN) (Norte, Noreste y Noroeste), sus demandas máximas coincidentes representaron el 35% del total del SIN (CFE 1994).

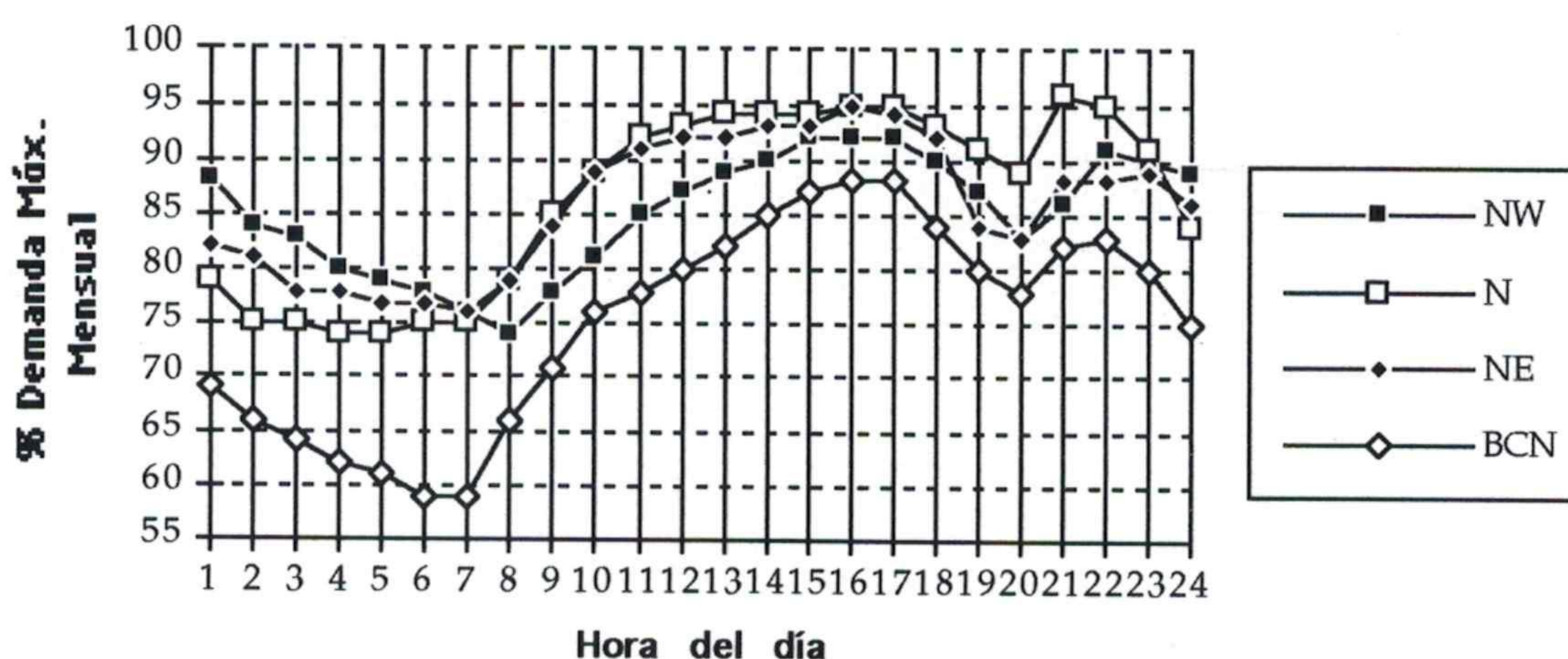


Figura 1. Perfiles de demanda coincidente para días miércoles del mes de julio en las regiones Noreste, Norte, Noroeste y Baja California Norte de la CFE (Fuente: CFE, Subdirección de Programación, 1993)

Reconociendo la importancia del aire acondicionado dentro del consumo total de usuarios residenciales en clima cálido, la CFE ha realizado un amplio programa de aislamiento térmico de techos en el municipio de Mexicali, Baja California. En este programa se han dado préstamos sin intereses a más de 40,000 usuarios con consumos de más de 1,000 kWh/mes en el verano. Estos préstamos, de hasta de N\$ 4,000 sin intereses y pagable en 36 meses por medio de la factura eléctrica, han sido para la compra e instalación de aislamiento térmico en techos y paredes. De acuerdo a la CFE, esta medida de ahorro permite reducciones en el consumo de hasta 30% en los meses de verano.

A la fecha el programa ha sido exitoso en muchos sentidos y la CFE ha manifestado interés en ampliarlo más allá de Mexicali. El programa, sin embargo, es una alternativa entre

muchas otras que no han sido exploradas. Una de estas alternativas, el uso de pinturas de baja absorptancia, es la que se discute a continuación.

II. Parámetros determinantes del consumo de energía eléctrica para enfriamiento de edificaciones.

De manera general, el clima es el principal determinante de la necesidad de uso de equipos de acondicionamiento ambiental¹. Dentro de lo que compone a lo que entendemos como "el clima", la temperatura y humedad de aire, la radiación solar y la velocidad y dirección del viento son sus componentes más importantes.

Aparte del clima, existen factores propios de la instalación que influyen en la cantidad de energía que se utiliza para mantener el confort dentro de un espacio. De manera general, estos factores pueden caer dentro de dos categorías: (a) equipos de acondicionamiento ambiental y (b) envolvente.

II.a Los equipos

Los equipos de aire acondicionado afectan a los niveles de consumo de energía de un edificio de varias maneras. En primer lugar, las características de eficiencia del equipo son determinantes de la cantidad de energía que utilicen: un equipo de baja eficiencia consumirá más electricidad para dar el mismo servicio que uno de eficiencia mayor. En segundo lugar, un equipo mal instalado puede consumir energía de manera ineficiente. Ejemplos de esto son los equipos sobredimensionados que desperdician energía arrancando y apagando en exceso y los equipos instalados con bordes que permiten fugas de aire enfriado. Finalmente, la mala operación y mantenimiento de los equipos resulta también en una operación ineficiente. Como ejemplo de esto último están los equipos que operan con volúmenes de refrigerante por abajo de los que el equipo requiere (lo que disminuye la eficiencia) o los que operan con filtros sucios (lo que afecta el flujo de aire a través de los serpentines de enfriamiento).

II.b La envolvente

A los elementos de la envolvente de una edificación los podemos definir, en función de su transmitividad solar, en opacos y translúcidos. En general, los elementos opacos operan como absorbedores de calor solar y como conductores y almacenes de este calor (y del que resulta de la diferencia de temperaturas entre los dos lados del elemento). Los translúcidos, además de tener capacidad de absorción y conducción, tienen capacidad de transmisión de la radiación solar y tienen poca capacidad de almacenamiento del calor que absorben.

Es ampliamente reconocido que uno de los elementos constructivos por donde penetra la mayor cantidad de calor en edificaciones de tipo residencial unifamiliar en regiones de clima cálido es el techo. Esto se debe a que, generalmente, el techo es el plano donde la radiación solar incide con mayor intensidad y a que a él corresponde una fracción importante del área expuesta a la temperatura ambiente. Son precisamente dos alternativas de atenuación de las ganancias de calor a través del techo (aislamiento y superficie de baja absorptancia) lo que se analiza a continuación.

¹ Existen muchas situaciones, particularmente en edificaciones modernas con altas densidades de ocupación humana y de equipos que emiten calor, donde la principal fuente del calor a extraer son precisamente los generados por las personas y los equipos, al grado de tener que utilizar el enfriamiento en temporada de invierno.

III. Metodología de análisis

Para realizar el análisis de las alternativas de atenuación de las ganancias de calor a través del techo hicimos uso del método conocido como de funciones de transferencia propuesto por la American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) (McQuiston y Spitler 1992). Este método permite la concatenación de eventos discretos para determinar el comportamiento térmico-dinámico de elementos estructurales expuestos a variaciones de temperatura y radiación solar.

Para definir la ganancia de calor de un elemento dado (en este caso el techo), el método de funciones de transferencia hace uso de las llamadas funciones de transferencia por conducción. Estas funciones se usan para describir el flujo de calor en el interior de una pared, techo, partición o piso como una función de los valores previos del flujo de calor y valores previos de las temperaturas interior y exterior.

Por este método se obtienen series de tiempo, en este caso una serie de 24 valores que representan los valores de las ganancias de calor a través del elemento en estudio durante las 24 horas de un día. Para definir la serie de tiempo de la ganancia por conducción se realizan una serie de iteraciones para lograr la convergencia de la siguiente ecuación:

$$q_{e,\varnothing} = A * [\sum b_n * (t_{e,\varnothing-n\delta}) - d_n * \{(q_{e,\varnothing-n\delta})/A\} - \sum t_{rc} * c_n] \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

$q_{e,\varnothing}$	=	ganancia térmica en el tiempo \varnothing (Btu/hr)
A	=	area (ft ²)
$t_{e,\varnothing-n\delta}$	=	temperatura sol-aire en el tiempo $\varnothing-n\delta$ (F)
$q_{e,\varnothing-n\delta}$	=	ganancia térmica en el tiempo $\varnothing-n\delta$ (Btu/hr)
t_{rc}	=	temperatura interior constante (F).
b_n, d_n y c_n	=	coeficientes de función de transferencia por conducción.
\varnothing	=	Hora del día
δ	=	Intervalo de tiempo
n	=	Número de intervalo

La temperatura sol-aire se determina a partir de un balance de flujo de conducción de calor hacia una superficie externa expuesta a la radiación solar. La temperatura sol-aire es la temperatura del aire exterior que, en la ausencia de luz solar y de intercambio de radiación en onda larga, y a temperaturas que no sean más que la temperatura del aire, daría un flujo equivalente de calor por conducción.

La temperatura sol-aire para superficies horizontales se define como:

$$t_e = t_o + \text{Alfa} * I_t/h_o - 7.0 \quad (\text{Ec. 2})$$

donde,

t_e	=	temperatura sol-aire (F)
t_o	=	temperatura del aire exterior (F)
I_t	=	radiación total incidente (Btu/hr-ft ²)
h_o	=	coeficiente de transmisión de calor por radiación de onda larga y por convección en la superficie exterior (Btu/hr-ft ² -F)

Para poder determinar los coeficientes de función de transferencia por conducción para un techo se deben especificar los siguientes parámetros: (a) rango del valor de la resistencia térmica del techo, (b) material del techo, (c) localización de la masa y (d) el tipo de techo (con o sin plafón). Estos valores se obtienen de una base de datos desarrollada por ASHRAE a partir de experimentaciones con modelos físicos de un conjunto de ensambles de techos típicos (McQuiston y Spitler 1992).

IV. Análisis Térmico

El análisis que aquí se presenta se realizó con datos obtenidos a partir de mediciones hechas en la ciudad de Hermosillo, Sonora por personal del Grupo de Energía de la Universidad de Sonora. Los datos que se utilizaron son los correspondientes a la insolación en el plano horizontal y temperatura de aire exterior para el día 27 de julio de 1993. En la Figura 2 se muestra el perfil de insolación que se utilizó y que corresponde a un día claro.

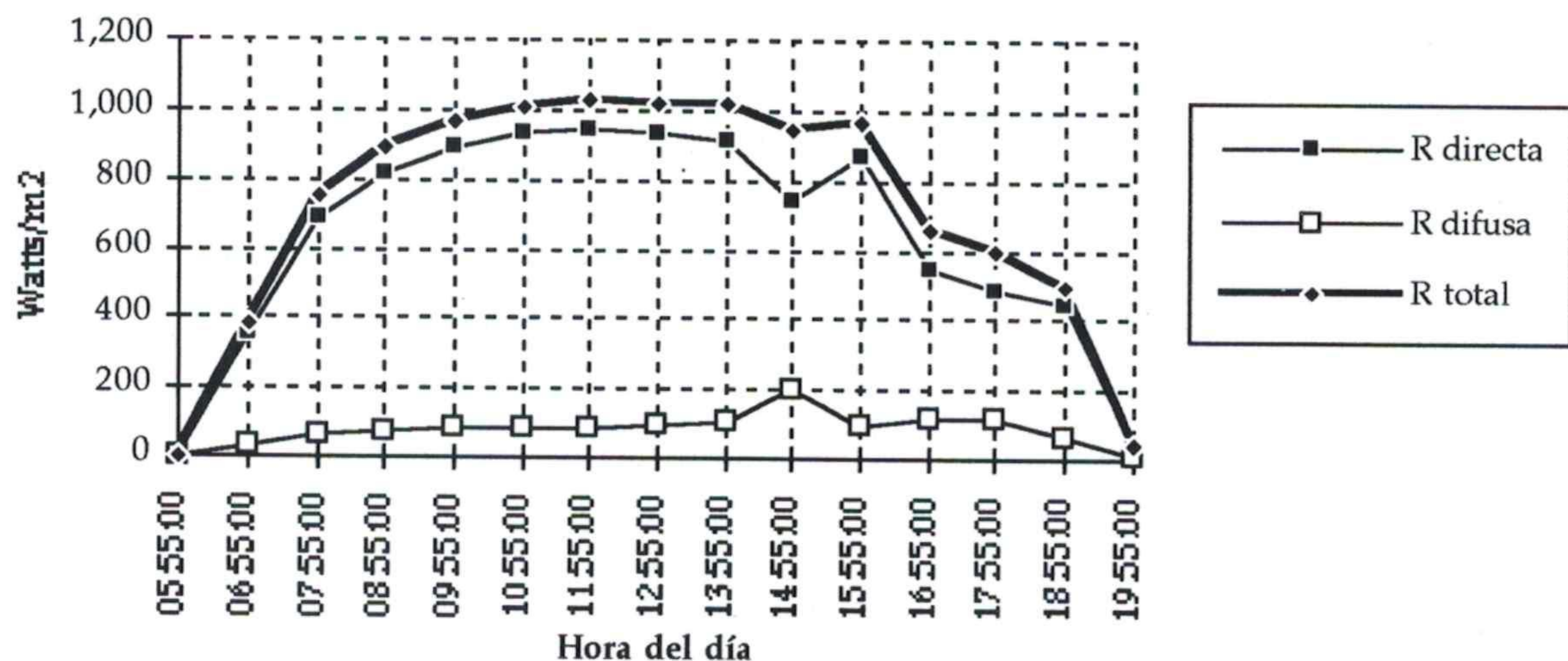


Figura 2. Perfil de Insolación (W/m²) para el día de 28 julio de 1993 en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Para propósitos de este análisis se consideró a un techo de concreto de 4 pulgadas de espesor con un aplanado interior de 1/2 de pulgada, con dos posibilidades de asilamiento (sin aislamiento y con una pulgada de poliuretano espreado) y con cuatro posibilidades de acabado superficial (blanco de baja absorción, concreto, rojo y asfalto). El valor de resistencia térmica de este techo sin aislamiento es de 1.87 BTU/h·ft²·F y con una pulgada de poliuretano de 8.12 BTU/h·ft²·F. La Tabla 1 muestra los elementos considerados para calcular este último valor.

Material	k BTU·in/h·ft²·F	Espesor in	R BTU/h·ft²·F
Aire exterior			0.33
Poliestireno	0.16	1.00	6.25
Cemento	7.50	4.00	0.53
Yeso	1.56	0.50	0.32
Aire interior			0.69
R			8.12
U			0.12

Tabla 1. Ensamble de resistencia térmicas con 1 pulgada de poliuretano.

En cuanto a la absorción de las cuatro superficies consideradas, éstas se muestran en la Tabla 2. Para la superficie blanca se consideró la utilización de una capa de pasta de ese color que contiene partículas cerámicas reflejantes y que tiene propiedades impermeabilizantes.

ACABADO SUPERFICIAL	Absortancia
Concreto	0.55
Blanco	0.20
Rojo	0.65
Asfalto	0.85

Tabla 2. Absortancias de las superficies consideradas en el análisis

Con los datos mostrados arriba se calcularon, de acuerdo a la Ecuación 2, las temperaturas sol-aire para las diferentes superficies propuestas. Estas temperaturas son iguales para el techo aislado y sin aislar (ya que es la temperatura superficial).

En la figura 3 se muestran los perfiles de temperaturas sol-aire (estimadas) y exterior (medida) para las cuatro superficies propuestas. Como se puede observar, las mayores temperaturas ocurren para el techo con la superficie más absorbente (asfalto), llegándose a tener temperaturas superficiales de cerca del doble de la temperatura ambiente exterior. La superficie de menor temperatura es la correspondiente a la del techo blanco, el cual sufre una elevación de temperatura sobre la temperatura ambiente, pero de apenas unos grados más.

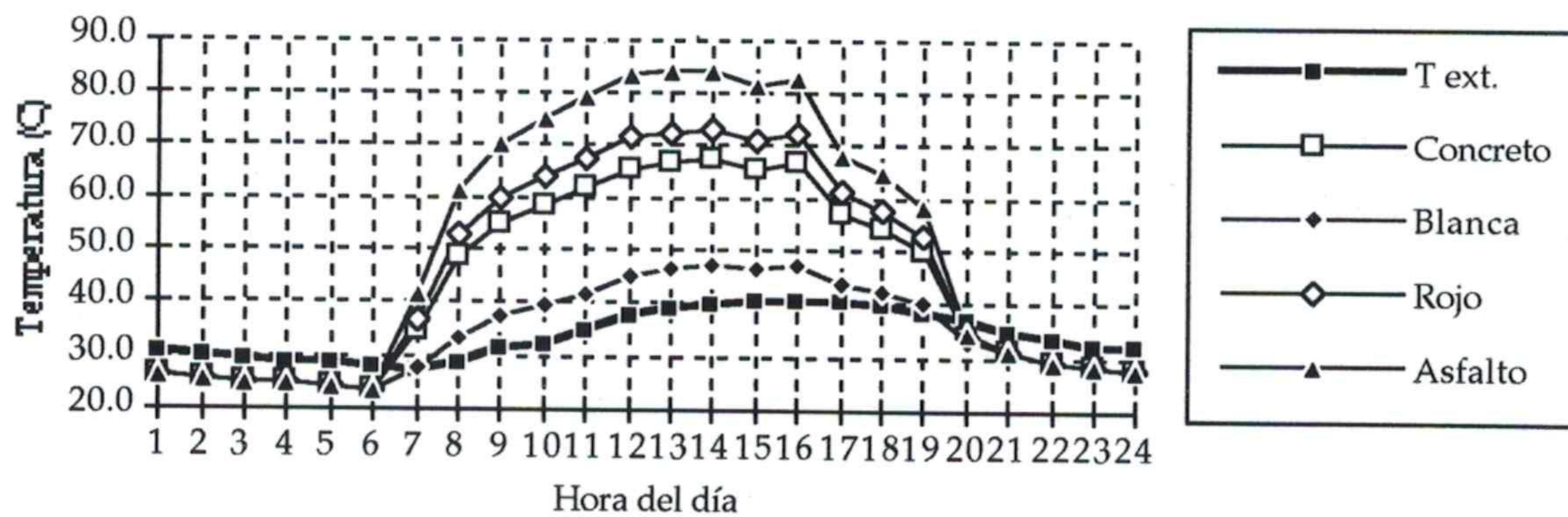


Figura 3. Perfiles de estimaciones de temperaturas sol-aire y temperatura exterior medida para techo localizado en Hermosillo, Sonora en el mes de julio.

Para poder definir los perfiles los valores de ganancia térmica unitaria para cada tipo de techo, se obtuvieron de la base de datos de ASHRAE las series de tiempo de los coeficientes de función de transferencia por conducción correspondientes a los dos ensambles de techo analizados. La Tabla 3 muestra la serie para un techo de concreto de cuatro pulgadas sin aislar, mientras que la Tabla 4 lo muestra para un techo con rango de resistencia térmica total de entre 5 y 10 BTU/h*ft²*F.

n	b_n	c_n
6	3.65E-16	2.34E-29
5	3.01E-12	-1.01E-16
4	1.80E-06	5.46E-09
3	1.20E-03	-2.72E-03
2	2.11E-02	0.134
1	3.14E-02	-9.80E-01
0	2.90E-03	1
$\sum c_n$		5.67E-02

Tabla 3. Series de tiempo de coeficientes de función de transferencia por conducción para techo de concreto de 4 pulgadas sin aislamiento.

n	b_n	c_n
6	-3.50E-16	9.26E-27
5	9.60E-12	-7.84E-15
4	3.90E-07	5.51E-09
3	3.70E-04	-8.16E-05
2	6.90E-03	0.237
1	8.67E-03	-1.12
0	5.90E-04	1
$\sum c_n$		1.65E-02

Tabla 4. Series de tiempo de coeficientes de función de transferencia por conducción para techo de concreto de 4 pulgadas con aislamiento de una pulgada de poliuretano.

Con los perfiles de temperaturas sol-aire mostrados arriba, haciendo uso de la series de tiempo definidas en las Tablas 3 y 4 y de acuerdo a la Ecuación 1, se realizaron las iteraciones que llevaron a la convergencia en los valores de ganancia térmica unitaria que se muestran las Figuras 4 y 5.

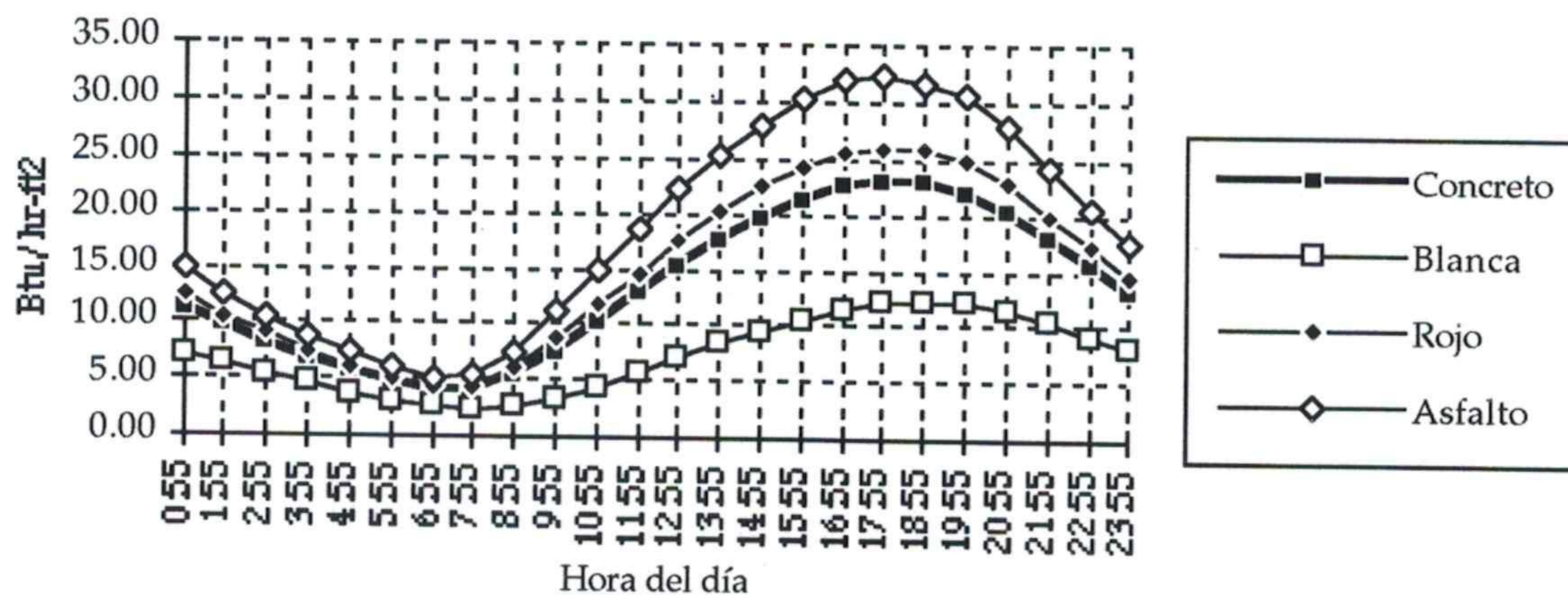


Figura 4. Perfil estimado de ganancias unitarias de calor por conducción (Btu/hr-ft²) para techo de concreto de 4" de espesor, no aislado y sujeto a las condiciones presentes en la ciudad de Hermosillo, Son., el 27 de julio de 1993.

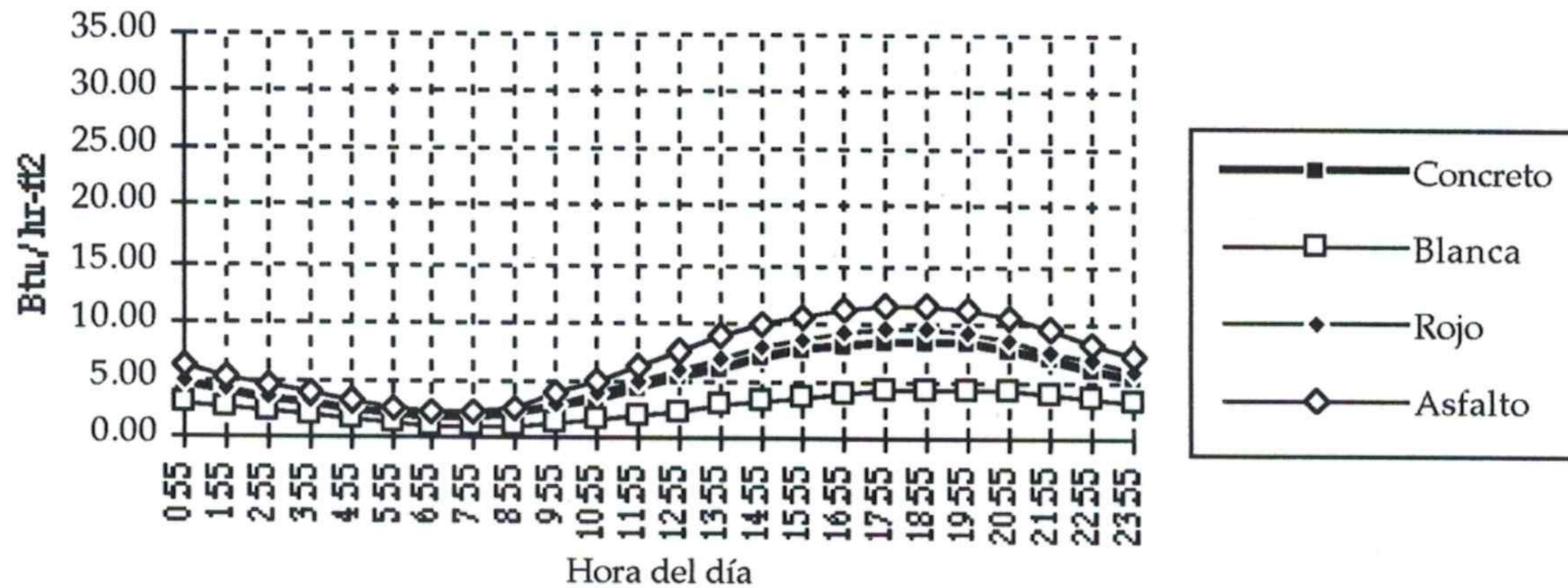


Figura 5 Perfil estimado de ganancias unitarias de calor por conducción (Btu/hr-ft²) para techo de concreto de 4" de espesor, con 1" de aislamiento de poliuretano y sujeto a las condiciones presentes en la ciudad de Hermosillo, Son., el 27 de julio de 1993.

Como se puede observar en las figuras 4 y 5, el uso del aislamiento tiene un efecto de atenuación más importante que el del uso de una superficie blanca, pero el uso de la superficie blanca puede representar, para un techo con superficie originalmente de asfalto, el mismo efecto que el que resulta de instalar una pulgada de poliuretano.

V. Comparación Económica

Para realizar una comparación económica de las alternativas se asumió lo siguiente:

- (a) La superficie del techo es de 50 m²;
- (b) La ganancia térmica es extraída por un equipo de eficiencia relativamente baja (EER=6.0);
- (c) La tarifa que se aplica a la energía eléctrica ahorrada es de 0.44 N\$/kWh (escalón superior de tarifa residencial aplicada en 1993);
- (d) La energía eléctrica utilizada por el equipo de aire acondicionado en un año es igual al 80% del consumo diario estimado en el ejemplo multiplicado por 180 días;
- (e) El costo de instalación de la superficie de baja absorción es de 20 N\$/m², mientras que el costo de instalación de 1" de poliuretano es de 45 N\$/m², lo que lleva a un costo de instalación (para 50 m²) de N\$ 1,000 para la primera alternativa mientras que para la segunda implica una erogación de N\$ 2,250.

Siguiendo las consideraciones (a) y (b) se llegó a los valores de consumo diario de energía eléctrica que se muestran en la Tabla 5. Como se puede observar, el techo con 1" de poliuretano y superficie blanca es la que menor consumo tiene y que llega a ser menor en 7 veces al que tiene un techo sin aislar con superficie de asfalto.

Condición	Concreto	Blanca	Rojo	Asfalto
Sin aislar	29.69	16.30	33.51	41.16
Con 1" poliuretano	11.30	6.24	12.75	15.64

Tabla 5. Consumos diarios de electricidad (kWh/día) por concepto de extracción de calor ganado a través de techo.

Comparando los valores mostrados en la Tabla 5 definimos las posibles reducciones en consumo diario de electricidad por el cambio de un tipo de techo sin aislamiento ni techo blanco a uno con alguna de estas dos medidas de ahorro y con diferentes tipo de superficie (Tabla 6). La mayor reducción (29.9 kWh/día) se obtiene para un techo con superficie de asfalto que se aísla y al cual se le da un acabado de concreto ("lechedeada"). Esta reducción, sin embargo, no es mucho mayor de la que se obtiene pintando de blanco el techo de asfalto (24.9 kWh/día). De la misma manera, un techo de concreto que es aislado y luego se le es aplicado asfalto ahorrará casi lo mismo que un techo de ese tipo que es pintado de blanco (14.0 kWh/día vs. 13.4 kWh/día).

Si se aplica/ y se tiene	Superficie Blanca (de baja absorción) sin aislamiento	Aislamiento de 1" de poliuretano		
		Concreto	Rojo	Asfalto
Concreto	13.4	18.4	16.7	14.0
Rojo	17.2	22.2	20.8	17.9
Asfalto	24.9	29.9	28.4	25.5

Tabla 6. Ahorros diarios de electricidad (kWh/día) por concepto de extracción de calor ganado a través de techo que se evita por uso de superficie de baja absorción y la instalación de 1" de poliuretano.

Asumiendo, como se estableció arriba, un valor de N\$ 0.44 por cada kWh ahorrado, un costo de instalación de N\$ 1,000 para la alternativa de la superficie de baja absorción y de N\$ 2,250 para la alternativa de instalación de 1" de poliuretano esparcido y un consumo por concepto de aire acondicionado en un año igual al 80% del consumo en 180 días iguales, se tienen los períodos simples de recuperación que se muestran en la Tabla 7.

Si se aplica/ y se tiene	Superficie Blanca (de baja absorción) sin aislamiento	Aislamiento de 1" de poliuretano		
		Concreto	Rojo	Asfalto
Concreto	1.57	2.57	2.84	3.38
Rojo	1.22	2.13	2.28	2.65
Asfalto	0.85	1.58	1.67	1.86

Tabla 7 Períodos simples de recuperación de la inversión para distintas las alternativas de aplicación de superficie de baja absorción y/o la instalación de 1" de poliuretano.

Como se puede apreciar en la Tabla 7, el mejor período de recuperación de la inversión se obtiene aplicando una capa de película blanca de baja absorción sobre una superficie de asfalto. También en la tabla se puede ver que el período de recuperación por la aplicación de esta superficie es menor para todos los casos de techos sin aislamiento ni superficie blanca. La tabla también muestra que el peor de los casos corresponde al de aislar un techo con superficie de concreto al que se le aplica un acabado de asfalto.

VI Conclusiones y recomendaciones

El consumo de energía eléctrica para el enfriamiento de viviendas parece ser muy importante en ciertas regiones del país. Para reducir el impacto que este uso final de la electricidad tiene para los usuarios y la empresa eléctrica pueden llevarse a cabo distintas medidas de ahorro. Una de estas medidas es la de aplicar una superficie de baja absorción.

De acuerdo a un análisis basado en una simulación por computadora de lo que ocurre en un techo expuesto a condiciones presentes en una localidad con clima cálido seco, el aplicar una superficie de baja absorción reduce notablemente la ganancia de calor a través del techo y puede ser tan o más atractivo económicamente que el aislar el techo. Este análisis también muestra el efecto contraproducente que puede tener el aislar un techo y luego aplicar una capa de superficie de alta absorción.

Para poder comprobar la validez de lo que se plantea en este documento es necesario que se realicen un conjunto de experimentos en situaciones reales. También sería recomendable que se realice un muestreo que permita determinar que tan extendido está el uso de superficies de alta absorción y con esto poder estimar los impactos que a nivel empresa eléctrica tendrían programas en gran escala orientados a modificar las absorciones de los techos de las casas habitación en regiones de clima cálido.

Bibliografía

Comisión Federal de Electricidad. 1994. Estadísticas por Entidad Federativa 1993. Mexico.

De Buen, O., 1987, "Procedimiento de Estimación de Ahorros de Energía Eléctrica en Casas Habitación Ubicadas en Regiones de Clima Cálido Seco", Reporte, Programa Nacional del Uso Racional de la Energía. Comisión Federal de Electricidad. México, D.F..

De Buen O.. 1993. "Residential Air-Conditioning in Northern México : Impacts and Alternatives", Tesis de Maestría, Energy and Resources Program, University of California at Berkeley, mayo.

De Buen O., 1993. "Acondicionamiento de Aire en el Sector Residencial del Norte de México: Evolución, Impactos y Alternativas". XIV Seminario Nacional Sobre el Uso Racional de la Energía, ATPAE, Mexico DF, noviembre.

McQuiston, F. y J. Spitler. 1992, "Heating and Cooling Load Calculation Manual", American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), USA.