

An outdoor temperature and global insolation model for Maracaibo

Nastia Almao de Herrera

*Escuela de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Simulación Computacional
Departamento de Energía, Universidad del Zulia, Apdo. 526. Maracaibo, Venezuela*

Abstract

Time dependent functions of outdoor temperature and global insolation over horizontal and vertical oriented planes are presented to be used in simulations of transient solar energy conversion processes under Maracaibo climatic conditions. A correlation to determine diffuse and beam components of the global insolation over horizontal planes is also presented. Deviations no higher than 12% were obtained for outdoor temperature. In reference to global insolation over horizontal planes, deviations from -5% to 8.7% were obtained at hours of higher insolation; and the values for vertical planes are not higher than 6.7% from sunrise time to peak insolation time, at which point from deviations start to increase. More accurate correlations were established via curve fit, however, deviations no higher than 0.8% were obtained when comparisons were made in a given solar energy conversion simulation. Therefore, the proposed correlations are recommended for simulation purposes.

Key words: Insolation; outdoor temperature; model; simulation.

Un modelo de temperatura ambiente e irradiancia sobre superficies en Maracaibo

Resumen

Se presentan funciones dependientes del tiempo de temperatura ambiente e irradiancia global instantánea sobre planos horizontales y verticales orientados, para ser usadas en la simulación de procesos transientes de conversión de energía solar, bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Maracaibo. Se presenta también una correlación que permite determinar las componentes difusa y directa de la irradiancia global sobre planos horizontales. Las desviaciones obtenidas en la determinación de la temperatura ambiente no exceden el 12%. En referencia a la irradiancia global sobre planos horizontales, las desviaciones van desde -5% hasta 8.7%, a las horas de mayor irradiancia; y en el caso de los planos verticales, la máxima desviación es 6.7% hasta el valor pico, después del cual éstas comienzan a aumentar. Se determinaron correlaciones para lograr un mejor ajuste a los datos y al comparar los resultados en una simulación dada de un proceso de conversión de energía solar en térmica, no se obtuvieron desviaciones apreciables (menores que 0.8%). Por lo tanto, se recomienda el uso de las mencionadas correlaciones.

Palabras claves: Irradiancia; temperatura ambiente; modelo; simulación.

Introducción

Para la realización de un análisis térmico en construcciones, sistemas de conversión de

energía solar o cualquier otro estudio donde la radiación solar esté involucrada, se requiere del conocimiento de la cantidad de energía radiante incidente sobre planos inclinados y orientados;

así como también el valor de la temperatura ambiente.

Si el objetivo es simular la conducta térmica transiente de un determinado sistema de conversión de energía solar, es conveniente disponer de correlaciones que permitan determinar las fluctuaciones con el tiempo de estas variables climáticas locales, que las mismas requieran un número mínimo de datos y que consuman poco tiempo de computación.

Por otro lado, dependiendo de los parámetros de diseño a evaluar con la simulación, se podría requerir los valores de las componentes difusa, directa y reflejada (caso de superficies verticales) de la irradiancia global, las cuales para el caso de superficies inclinadas y orientadas se evalúan a partir de la irradiancia incidente sobre planos horizontales.

Normalmente, las estaciones meteorológicas de Venezuela suministran datos de exposición solar (irradiancia) global horarios y/o de exposición solar global diarios promedio mensual, sobre superficies horizontales. A partir de éstos, es posible determinar las componentes directa y difusa de la irradiancia global, usando correlaciones adecuadas, y predecir la exposición solar horaria que recibe un plano inclinado y orientado, con su respectiva descomposición en radiación directa, difusa y reflejada. Para Maracaibo, estas predicciones fueron realizadas por Almao [1], en trabajos anteriores. Igualmente, estas estaciones suministran datos horarios promedio mensual de temperatura ambiente, las cuales, para Maracaibo, fueron procesadas por De Oteiza [2].

En este trabajo se presentan funciones dependientes del tiempo de temperatura ambiente e irradiancia global instantánea sobre planos horizontales y verticales orientados, para ser usadas en la simulación de procesos transientes de conversión de energía solar, en Maracaibo. Se presenta también una correlación que permite determinar las componentes difusa y directa de la irradiancia global sobre planos horizontales.

A pesar de que estas correlaciones han sido establecidas a partir de la data procesada para Maracaibo, las mismas podrían utilizarse para

otras localidades con condiciones climáticas semejantes, o donde se disponga de los mismos datos de entrada.

Temperatura ambiente

Para modelar la temperatura ambiente (TF) se modificó la distribución sinusoidal recomendada por Howell *et al.* [3], para ajustarla a los datos horarios promedio mensual dados por Meteorología de las FAV y procesados por De Oteiza [2], resultando:

$$\text{Para } ITMAX \leq IT \leq 1440 \text{ e } 1440 \leq IT \leq ITMIN: \\ TF = T_{avg} + \Delta T_a \text{ sen}[\pi(IB/2 + (IT - ITMAX)/IB)] \quad (1)$$

$$\text{Para } ITMIN \leq IT \leq ITMAX: \\ TF = T_{avg} + \Delta T_a \text{ sen}[\pi(IT - IA)/(ITMAX - ITMIN)] \quad (2)$$

donde:

$$\Delta T_a = TF_{max} - T_{avg} \quad (3)$$

$$IA = (ITMIN + ITMAX)/2 \quad (4)$$

$$T_{avg} = (TF_{min} + TF_{max})/2 \quad (5)$$

$$IB = 1440 - (ITMAX - ITMIN) \quad (6)$$

Las ecuaciones (1) y (2) requieren como entrada el tiempo en minutos al cual ocurre la mínima (TF_{min}) y la máxima (TF_{max}) temperatura ambiente, ITMIN e ITMAX, respectivamente; TF_{min}, TF_{max}, y la temperatura ambiente media promedio mensual (T_{avg}). Para Maracaibo, que es el caso de interés, ITMIN es 360 minutos (6:00 am) todo el año e ITMAX es 840 minutos (2:00 pm) para todos los meses excepto para Agosto y Septiembre, cuando ITMAX es 960 minutos (4:00 pm); estos datos se presentan en la Tabla 1.

Irradiancia Global Instantánea sobre Planos Horizontales y Verticales

La irradiancia global sobre superficies horizontales es modelada con la siguiente distribución sinusoidal recomendada por Howell *et al.* [3], la cual, para efectos de simulación resultó ajustarse bien a la data de Maracaibo [1]:

$$Sh = QS_{max,h} \text{ sen}[\pi(t - t_{sr})/TD] \quad (7)$$

Tabla 1
 Datos de entrada para simulación de temperatura ambiente

Mes	TF _{min}	TF _{max}	ITMIN	ITMAX
Enero	23.12	32.2	360	840
Febrero	23.97	32.51	360	840
Marzo	24.46	32.61	360	840
Abril	25.14	31.17	360	840
Mayo	25.18	31.34	360	840
Junio	24.82	31.88	360	840
Julio	24.80	32.63	360	840
Agosto	25.09	32.85	360	960
Septiembre	25.18	32.49	360	960
Octubre	24.55	31.16	360	840
Noviembre	24.26	31.52	360	840
Diciembre	23.46	31.55	360	840

Para modelar la irradiancia global sobre planos verticales con una determinada orientación, se utiliza una ecuación sinusoidal que se ajusta a la data horaria, que para 16 orientaciones se determinó en la Ref. [1]. Debido a que el máximo no ocurre al mediodía solar y por lo tanto, la distribución no es simétrica como en la horizontal, se formulan dos funciones sinusoidales: una que va desde el tiempo en el cual ocurre la salida del sol hasta el tiempo en el que ocurre la máxima irradiancia, y otra que va desde el tiempo en el que ocurre el pico de irradiancia hasta el tiempo de la puesta del sol, resultando para un plano vertical considerado, denominado 1, en:

Para $t_{sr} \leq t \leq t_{max,1}$,

$$S_1 = Q_{1max,v} \text{sen}[\pi K_a (t - t_{sr})/TD] \quad (8)$$

$$K_a = TD / (2(t_{max,1} - t_{sr})) \quad (9)$$

Para $t_{max,1} \leq t \leq t_{ss}$,

$$S_1 = Q_{1max,v} \text{sen}[\pi/2(TD - (t - t_{sr}) / (t_d - (t_{max,1} - t_{sr})))] \quad (10)$$

Las ecuaciones (7) a la (10) requieren como entrada valores de máxima irradiancia sobre planos horizontales " $Q_{Smax,h}$ " y verticales " $Q_{1max,v}$ ", el tiempo " $t_{max,1}$ " al cual ocurre este máximo, la longitud del día o tiempo máximo de asoleamiento "TD" y el tiempo al cual ocurre la salida del sol " t_{sr} ". Además, para determinar el ángulo hora de puesta del sol ω_{ss} , TD, t_{sr} , y la diferencia "DIF" entre la hora legal y la hora solar [3,4], se requiere como entrada: latitud, longitud y declinación, correspondientes a la posición local y tiempo del año donde se va a simular el comportamiento térmico de determinado sistema. Dichas variables se evalúan con:

$$\omega_{ss} = \cos^{-1} (-\tan(Lat) \tan(Dec)) \quad (11)$$

$$TD = (2/15) \omega_{ss} \quad (12)$$

$$t_{sr} = TD/2 \quad (13)$$

$$TMS = TML + DIF \quad (14)$$

Para el caso de la ciudad de Maracaibo, se dispone de esta data [1,5], lo cual facilita el estudio de la misma, mostrándose algunos de ellos en la Tabla 2, para 8 orientaciones y los doce meses del año.

Tabla 2
 Datos de entrada para simulación de irradiancia sobre planos verticales (8 orientaciones) y horizontales

Mes	Orient.	DEC	DIF	$Q_{lmax,v}$	$T_{max,1}$	$Q_{lmax,v}$	$T_{max,3}$	$Q_{Smax,h}$	K_t
Enero	N-S	20.14	-57.6	257	750	339	690	540	0.46
	NE-SW			257	750	318	870		
	E-O			336	630	302	930		
	SE-NW			376	630	257	750		
Febrero		-11.58	-60.6	272	780	325	780	560	0.45
				272	780	357	930		
				345	630	342	930		
				359	630	272	780		
Marzo		-0.40	-54.0	283	750	306	750	570	0.43
				289	630	334	930		
				335	690	349	930		
				330	630	291	930		
Abril		10.51	-45.6	275	750	275	750	520	0.37
				289	630	284	870		
				297	690	298	870		
				288	690	287	870		
Mayo		20.14	-42.6	281	750	268	750	510	0.37
				283	690	268	750		
				280	690	278	810		
				268	750	282	810		
Junio	N-S	23.45	-48.0	295	750	270	750	540	0.40
	NE-SW			302	690	270	750		
	E-O			297	630	294	870		
	SE-NW			270	750	300	840		

Tabla 2 (continuación)
 Datos de entrada para simulación de irradiancia sobre planos verticales (8 orientaciones) y horizontales

Mes	Orient.	DEC	DIF	$Q_{1max,v}$	$T_{max,1}$	$Q_{1max,v}$	$T_{max,3}$	$Q_{Smax,h}$	K_t
Julio		19.82	-52.8	305	750	278	750	600	0.43
				328	630	278	750		
				332	630	314	870		
				281	690	316	870		
Agosto		9.97	-47.4	284	750	285	750	580	0.41
				295	690	301	870		
				307	690	320	870		
				295	690	303	870		
Septiem.		-1.01	-37.8	282	750	307	750	580	0.43
				282	750	301	870		
				299	690	324	870		
				304	690	283	870		
Octubre		-12.45	-30.0	267	750	311	750	530	0.39
				267	750	313	810		
				281	690	294	870		
				301	690	267	750		
Noviem.	N-S	-20.64	-33.6	252	750	314	690	500	0.41
	NE-SW			252	750	307	810		
	E-O			295	630	272	810		
	SE-NW			329	630	252	750		
Diciem.		-23.44	-45.6	246	750	319	690	490	0.42
				246	750	294	810		
				304	630	262	870		
				349	630	246	750		

Componentes Difusa y Directa de la Irradiancia Global Instantánea sobre planos Horizontales

A partir de la irradiancia global S_h , se puede evaluar la componente difusa S_d , si se conoce el índice de claridad diario promedio mensual \bar{K}_t y la relación entre la componente difusa y la irradiancia global promedio mensual \bar{K}_{td} , utilizando la correlación de Collares-Pereira y Rabl [1]:

$$S_d/S_h = \frac{\bar{K}_{td}}{a + b \cos \omega} \quad (15)$$

donde,

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_{ss} - 1.047) \quad (16)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_{ss} - 1.047) \quad (17)$$

ω es el ángulo hora solar, el cual se determina a partir del mediodía solar donde tiene el valor cero, aumentando 15° por hora antes del mediodía solar y disminuyendo 15° por hora después del mediodía solar [3,4], esto es:

$$\omega = -(TMS - 720)(15/60) \quad \text{para } TMS > 720 \quad (18)$$

$$\omega = (720 - TMS)(15/60) \quad \text{para } TMS < 720 \quad (19)$$

Los valores de \bar{K}_t , fueron determinados para 19 ciudades de Venezuela [5]; a partir de los datos suministrados por el Servicio de Meteorología de las FAV. Para Maracalbo, estos valores fueron mejor procesados [6], y a partir de los mismos, se evaluó \bar{K}_{td} [1]. Se estableció entonces la siguiente correlación, obtenida por medio de un ajuste de curva a un polinomio de tercer grado, utilizando los valores medios de K_t y K_{td} determinados a partir de los valores horarios:

$$\bar{K}_{td} = -8.8817 + 74.623 \bar{K}_t - 186.74 \bar{K}_t^2 + 152.215 \bar{K}_t^3 \quad (20)$$

Esta ecuación es una aproximación no validada, ya que en Venezuela no existe un registro estadístico de datos de irradiancia difusa, sin

embargo, permite obtener una componente difusa diaria promedio mensual, que al ser distribuida entre las horas del día da resultados muy cercanos a aquellos obtenidos con correlaciones adecuadas, a partir de los datos horarios [1]. Sobre planos verticales, las componentes difusa directa y reflejada se determinan a partir de los valores de irradiancia global horizontal con las siguientes correlaciones geométricas existentes en la literatura [3,4]:

$$S_r = S_h \text{ pr } R_r \quad (21)$$

$$S_{dv} = S_d R_d \quad (22)$$

$$S_{bv} = (S_h - S_d) R_b \quad (23)$$

Para superficies verticales $R_r = R_d = 0.5$

$$R_b = \cos \theta / \sin \alpha_s \quad (24)$$

donde θ es el ángulo entre el rayo de sol y la normal al plano y α_s es la altitud solar. Para Maracalbo, estos datos están disponibles para 16 orientaciones [1].

Resultados y Discusión

En la Fig.1, se muestran graficados los valores de temperatura ambiente medidos y aquellos calculados con las Ecs (1) y (2), para los doce meses del año. Puede notarse, para los meses desde Enero hasta Abril un buen ajuste hasta el máximo, a partir del cual comienza a notarse desviaciones, que no exceden el 12% (Hora 20). Para el mes de Mayo, las desviaciones son menores del $\pm 4\%$ desde las 6:00 am hasta las 4:00 pm, alcanzando su máximo valor (-9.34%) a la hora 20. En Junio, se obtiene buen ajuste hasta la hora 14 y la máxima desviación ocurre también a la hora 20. Este comportamiento es prácticamente el mismo para Julio y Agosto. La máxima desviación (11.67%) se obtiene en el mes de Septiembre a la hora 20. Los meses Octubre, Noviembre y Diciembre presentan un comportamiento muy similar al correspondiente a los cuatro primeros meses del año, igualmente con máxima desviación a la hora 20.

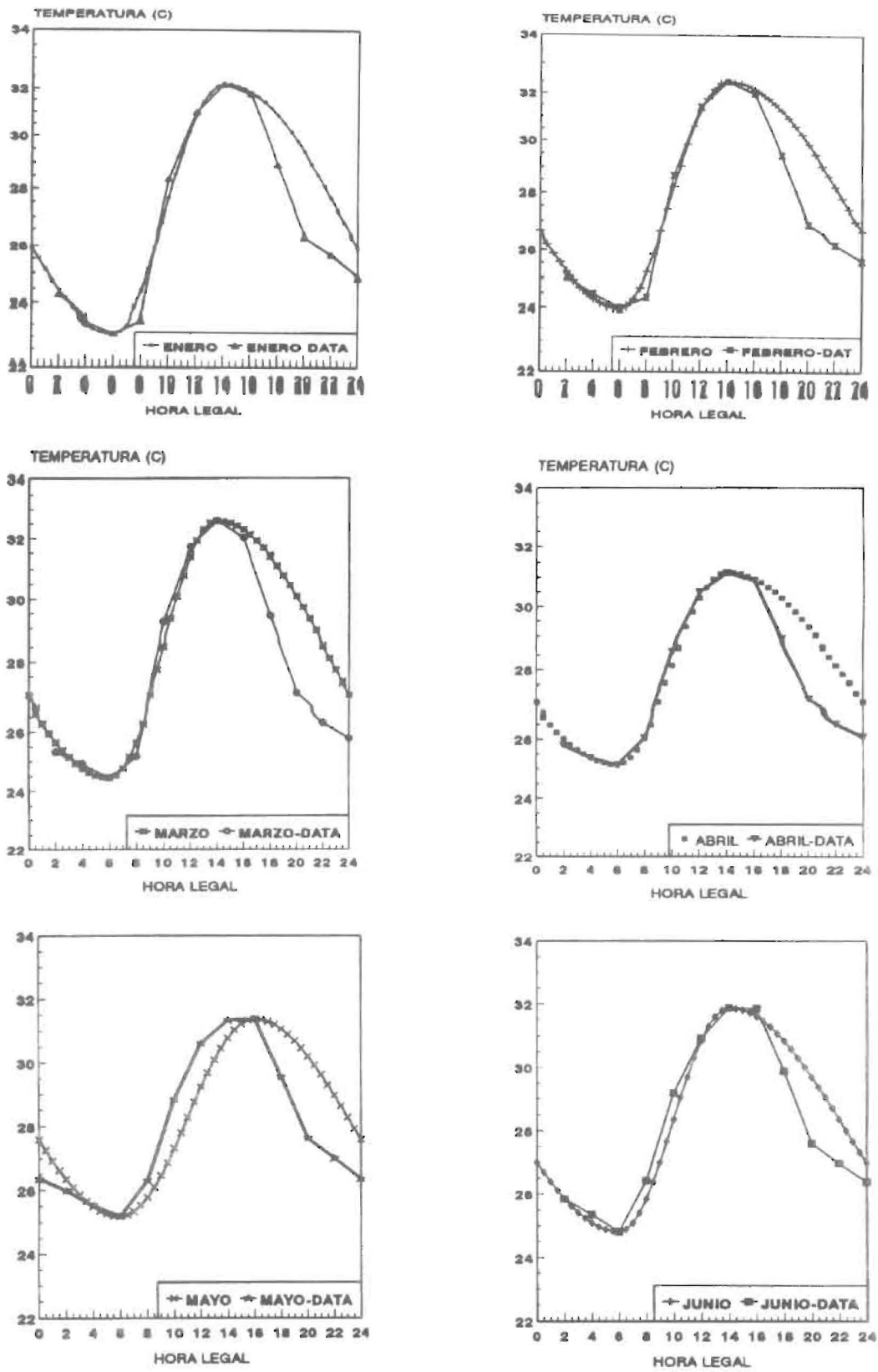


Figura 1. Temperatura simulada y temperatura real vs hora legal.

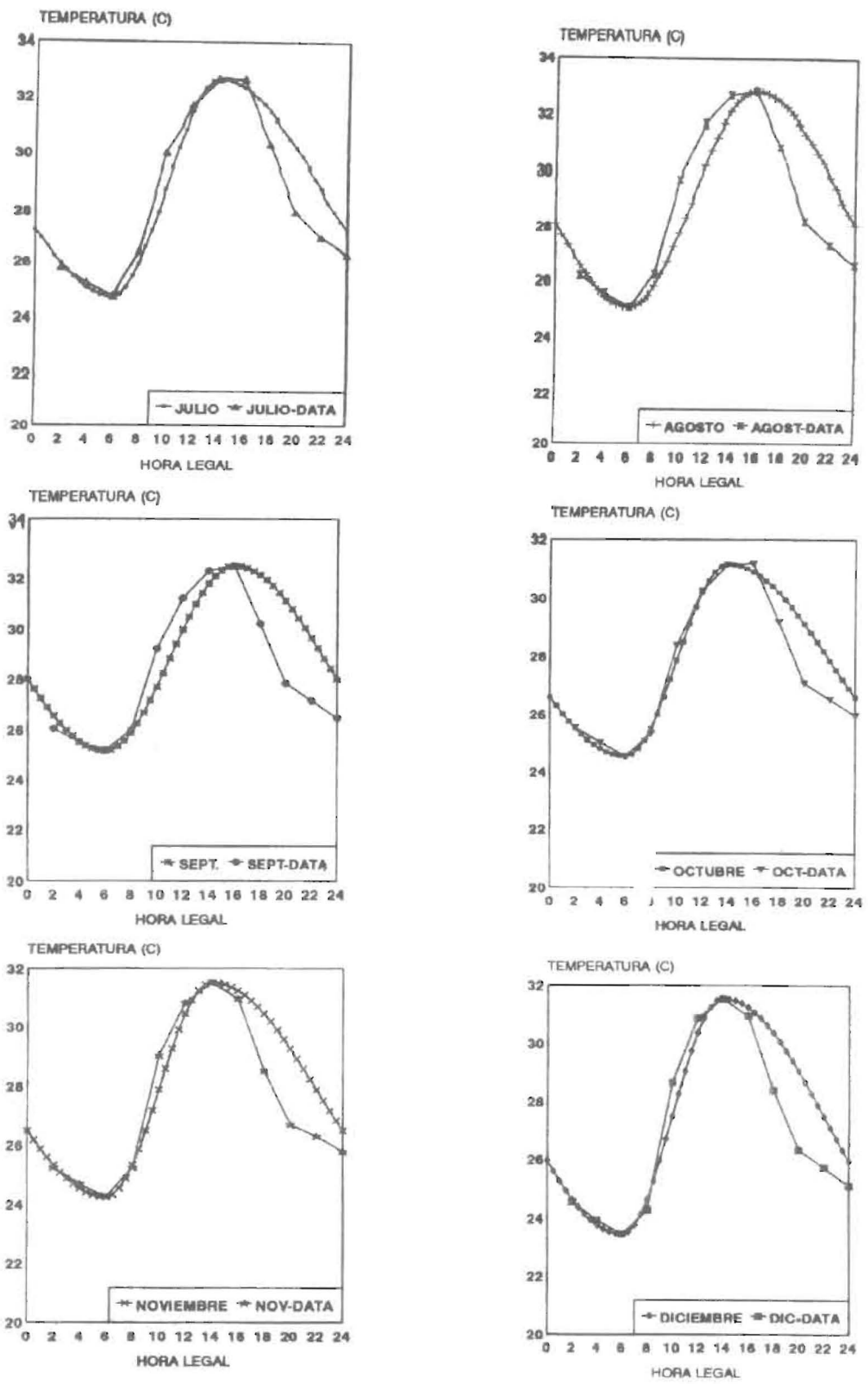


Figura 1 (continuación)

Tabla 3
Porcentajes de desviación obtenidos para temperatura e irradiancia (Mayo)

Hora	Temp.	Hora	Irrad. Horizontal (Ec. 7)	Irrad. Vertical Norte (Ec. 8 y 10)	Irrad. Vertical Norte (Tabla 4)	Irrad. Vertical Sur (Ec. 8 y 10)	Irrad. Vertical Sur (Tabla 4)
0	-4.63%	7.5	-45.1%	-18.55%		-26.95%	
2	-1.42%	8.5	-18.22%	-2.73%		-8.88%	
4	0.08%	9.5	-5.13%	2.86%		-2.03%	
6	0%	10.5	-3.82%	0.41%		-1.61%	
8	2.05%	11.5	-2.26%	-0.59%		-1.17%	
10	5.30%	12.5	0.37%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	4.51%	13.5	19.56%	2.43%	0.38%	2.36%	0.29%
14	1.75%	14.5	8.7%	6.71%	-1.79%	6.19%	-1.29%
16	0%	15.5	19.6%	17.96%	2.15%	15.66%	1.56%
18	-5.11%	16.5	31.0%	32.29%	2.02%	29.01%	1.16%
20	-9.34%	17.5	61.0%	63.39%	-8.8%	61.8%	-5.36%
22	-7.26%						
24	-4.63%						

Debido al comportamiento muy similar para todos los meses y para resumir, se presenta, sólo para el mes de Mayo, la Tabla 3, la cual muestra el orden de las desviaciones correspondientes. En vista de que las desviaciones son bajas, se recomiendan las Ec. (1) y (2) para simular la temperatura ambiente.

La Fig. 2 muestra las curvas correspondientes a irradiancia global sobre planos horizontales, sólo para los primeros seis meses del año, ya que el comportamiento es muy similar para todos los meses. Una curva corresponde a los valores obtenidos a partir de datos medidos y la otra a aquellos obtenidos con la Ec. (7). Como un ejemplo, analicemos el mes de Mayo, en el cual las desviaciones obtenidas con la Ec. (7) van desde -5% (hora 9.5) hasta 8.7% (hora 14.5), horas correspondientes a valores de mayor irradiancia. Desde las 3:30 pm (hora 15.5), estas desviaciones se hacen mayores, variando desde

19.6% hasta 61% (hora 17.5), e igualmente temprano en la mañana, donde las desviaciones van desde -45% (hora 7.5) hasta -18% (hora 8.5). Afortunadamente, es precisamente a estas horas que la irradiancia es menor y como se mostrará más adelante, esto no afecta notablemente los cálculos en una simulación.

La Fig. 3 muestra la irradiancia sobre planos verticales (orientados Norte y Sur) determinada a partir de los datos medidos y aquellos obtenidos a partir de las Ecs. (8) y (10). Puede notarse que las desviaciones son mayores después de alcanzado el máximo. Para la orientación Norte, desde la hora 8.5 hasta la hora 14.5, la máxima desviación es de 6.7%. A partir de este valor, esta desviación comienza a aumentar, desde 17.9% (hora 15.5) hasta 63.4% (hora 17.5). Un comportamiento similar se obtiene con la orientación Sur (ver Tabla 3). Asimismo, vale la pena resaltar que las máximas desviaciones

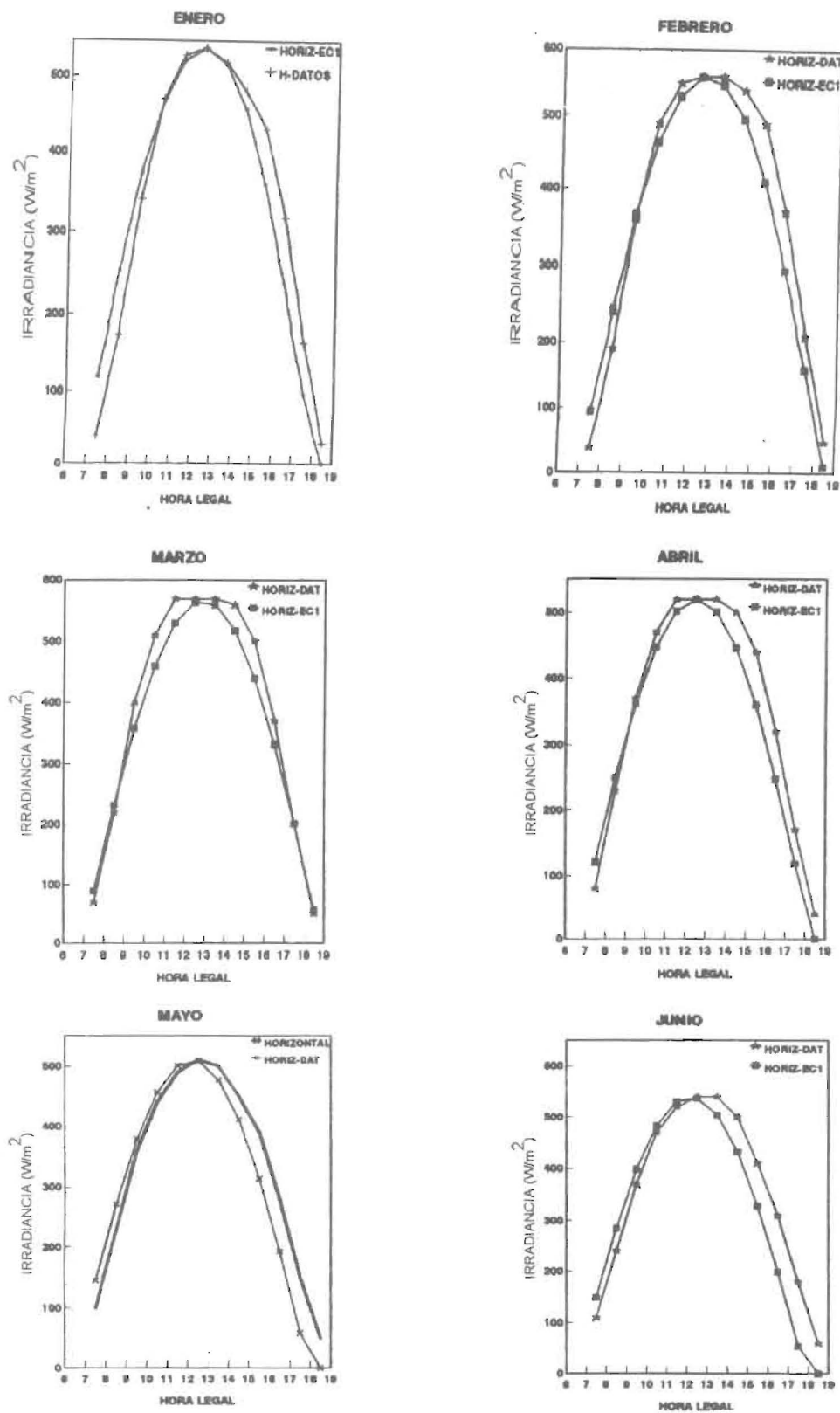


Figura 2. Irradiancia Simulada e Irradiancia Real Horizontal.

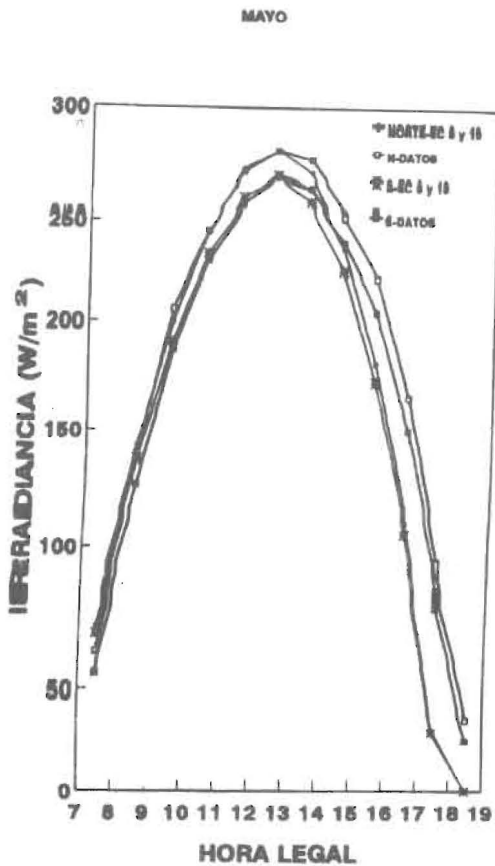


Figura 3. Irradiancia global simulada con las Ecuaciones 8 y 10 e irradiancia calculada a partir de los valores medidos (datos) sobre planos verticales.

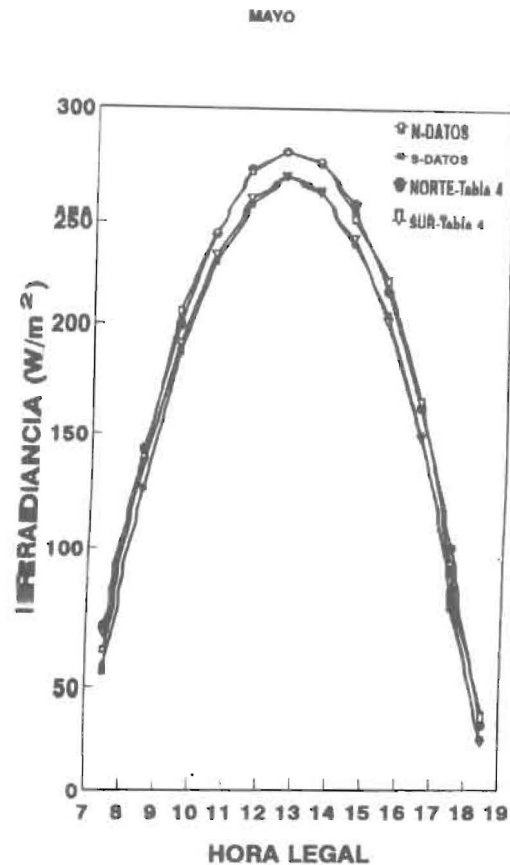


Figura 4. Comparación entre valores calculados a partir de los horizontales medidos (datos) y los determinados con las ecuaciones dadas en la Tabla 4.

se obtienen a las horas de menor valor de irradiancia.

Este comportamiento resultó ser general para las ocho orientaciones consideradas para cada mes. Por lo tanto, se realizó un ajuste de curva a los datos después del máximo, con miras a obtener una correlación más acertada. Los resultados se muestran en la Tabla 4, para 4 orientaciones y los 12 meses del año.

La Fig. 4 muestra las curvas obtenidas, para las orientaciones Norte y Sur correspondientes al mes de Mayo. Puede notarse, reducciones drásticas en las desviaciones, después del máximo: a la hora 15.5 (2.15%); hora 16.5 (2.02%); hora 17.5 (-8.8%) y hora 18.5 (9.1%), valores correspondientes a la orientación Norte.

Para cuantificar cuanto afectan las desviaciones obtenidas con el uso de las Ecuaciones (7), (8) y (10) en una simulación dada, se realizó la simulación del comportamiento térmico de

una sección bidimensional de vivienda [7], donde es de interés conocer cómo varía la temperatura interior bajo las condiciones climáticas de Maracaibo; una corrida, usando las mencionadas ecuaciones y otra, utilizando las correlaciones más ajustadas correspondientes a Mayo, orientaciones Norte y Sur, mostradas en la Tabla 4. Esta comparación se muestra en la Fig. 5.

Puede observarse, que las dos curvas obtenidas prácticamente coinciden, detectándose desviaciones entre ellas, menores que 0.8% (hora 12.5). Esto permite concluir, que para efectos de simulación, las desviaciones obtenidas con las ecuaciones sinusoidales (7), (8) y (10), no afectan considerablemente la solución de un problema determinado de comportamiento térmico, en este caso, de una sección de vivienda. Por lo tanto, pueden recomendarse para este tipo de cálculos, cuando los datos disponibles son los indicados en la Tabla 2

Tabla 4
Ecuaciones ajustadas para simulación de irradiancia sobre paredes verticales desde ITMAX hasta la puesta del sol

Mes	Orientación	Ecuación	A	B	C
Enero	Norte	$S=A+BX+C/X$	3.856E+03	-2.464E+00	-1.315E+06
	Sur	$S=A+BX+CX^{**2}$	-7.771E+02	3.147E+00	-2.229E-03
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-1.176E+02	1.454E+00	-1.260E-03
	Oeste	$S=X/(AX+B)$	2.646E-02	-2.133E+01	0.000E+00
Febrero	Norte	$S=A+BX+C/X$	4.012E+03	-2.559E+00	-1.365E+06
	Sur	$S=A+BX+CX^{**2}$	-1.615E+03	5.109E+00	-3.336E-03
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-1.945E+02	1.687E+00	-1.404E-03
	Oeste	$S=A+BX+CX^{**2}$	-5.030E+03	1.247E+01	-7.22E-03
Marzo	Norte	$S=A+BX+C/X$	4.162E+03	-2.640E+00	-1.424E+06
	Sur	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-3.555E+03	5.968E+06	-2.306E+09
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-2.798E+02	1.913E+00	-1.534E-03
	Oeste	$S=A+BX$	2.173E+03	-1983E+00	0.000E+00
Abril	Norte	$S=A+BX+C/X$	4.529E+03	-2.808E+00	-1.614E+06
	Sur	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-2.977E+03	5.000E+06	-1.924E+09
	Este	$S=A+BX+C/X$	3.909E+03	-2.481E+00	-1.326E+06
	Oeste	$S=Ae^{**}((X-B)^{**2}/C)$	2.973E+02	9.014E+02	-1.370E+04
Mayo	Norte	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-2.638E+03	4.435E+06	-1.688E+09
	Sur	$S=A+B/X+CX^{**2}$	-2.518E+03	4.203E+06	-1.589E+09
	Este	$S=A+BX+C/X$	3.315E+03	-2.128E+00	-1.088E+06
	Oeste	$S=Ae^{**}((\ln X-B)^{**2}/C)$	2.737E+02	6.744E+00	-3.357E-02
Junio	Norte	$S=A+BX+C/X$	4.118E+03	-2.584E+00	-1.413E+06
	Sur	$S=A+B/X+CX^{**2}$	-2.526E+03	4.220E+06	-1.594E+09
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-3.288E+02	1.916E+00	-1.483E-03
	Oeste	$S=A+B/X+CX^{**2}$	-5.315E+03	9.529E+06	-4.061E+09
Julio	Norte	$S=A+BX+C/X$	4.792E+03	-2.979E+00	-1.694E+06
	Sur	$S=A+BX+C/X$	3.837E+03	-2.434E+00	-1.302E+06
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-2.382E+02	1.768E+00	-1.421E-03
	Oeste	$S=Ae^{**}((X-B)^{**2}/C)$	3.063E+02	8.908E+02	-1.589E+04
Agosto	Norte	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-2.767E+03	4.637E+06	-1.764E+09
	Sur	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-2.732E+03	4.542E+06	-1.711E+09
	Este	$S=A+BX+C/X$	3.558E+03	-2.295E+00	-1.162E+06
	Oeste	$S=Ae^{**}((\ln X-B)^{**2}/C)$	3.131E+02	6.760E+00	2.979E-02

Tabla 4 (continuación)
Ecuaciones ajustadas para simulación de irradiancia sobre paredes verticales desde ITMAX hasta la puesta del sol

Mes	Orientación	Ecuación	A	B	C
Septiem.	Norte	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-2.648E+03	4.385E+06	-1.641E+09
	Sur	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-3.417E+03	5.680E+06	-2.167E+09
	Este	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-2.496E+03	4.101E+06	-1.511E+09
	Oeste	$S=A+B/X+C/X^{**2}$	-7.187E+03	1.279E+07	-5.448E+09
Octubre	Norte	$S=A+BX+C/X$	4.023E+03	-2.563E+00	-1.376E+06
	Sur	$S=A+BX+CX^{**2}$	4.843E+03	-1.411E+01	1.058E-02
	Este	$S=A+BX+C/X$	3.984E+03	-2.542E+00	-1.359E+06
	Oeste	$S=A+BX+CX^{**2}$	-8.391E+03	1.912E+01	-1.056E-02
Noviembre	Norte	$S=A+BX+C/X$	3.890E+03	-2.491E+00	-1.329E+06
	Sur	$S=A+BX+CX^{**2}$	-1.103E+03	3.936E+00	-2.738E-03
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-3.7883+02	2.027E+00	-1.577E-03
	Oeste	$S=A+BX+CX^{**2}$	-3.533E+03	9.073E+00	-5.417E-03
Diciembre	Norte	$S=A+BX+CX^{**2}$	-8.186E+04	3.007E+00	-2.123E-03
	Sur	$S=A+BX+CX^{**2}$	-1.195E+05	4.1438E+00	-2.847E-03
	Este	$S=A+BX+CX^{**2}$	-2.734E+02	1.761E+00	-1.419E-03
	Oeste	$S=A+BX+CX^{**2}$	-5.959E+03	1.427E+01	-8.194E-03

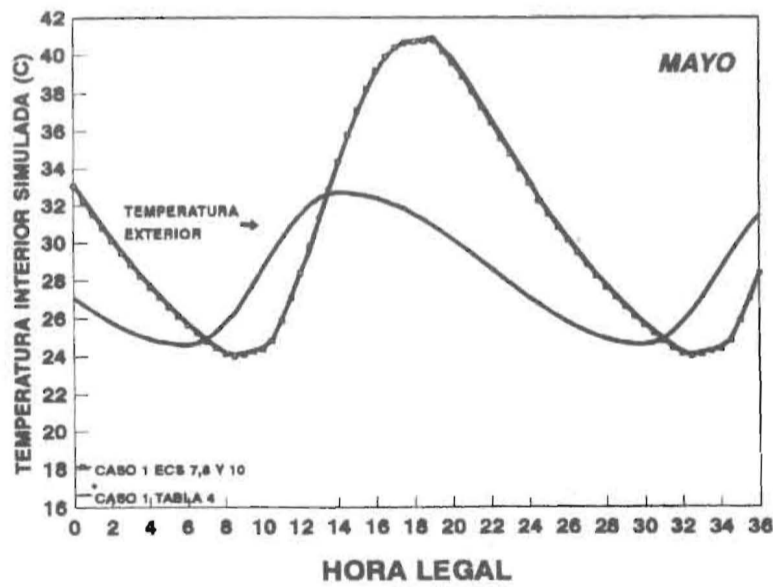


Figura 5. Temperatura interior obtenida simulando la irradiancia con Ecs. 7, 8 y 10 y la obtenida con las ecuaciones dadas en la Tabla 4.

Conclusiones

Se presentan correlaciones que permiten simular las fluctuaciones con el tiempo, de la temperatura ambiente e irradiancia global sobre planos horizontales y verticales, requiriendo como datos de entrada los valores máximos y mínimos, y el tiempo al cual ocurren los mismos. Para la irradiancia, se requiere además, la latitud, longitud y declinación local.

Se presenta también una correlación de \bar{K}_{td} en función de \bar{K}_t para determinar la descomposición de la irradiancia global horizontal en sus componentes a difusa y directa. Todas para ser aplicadas en la simulación de procesos transientes de conversión de energía solar, bajo las condiciones climáticas de Maracaibo u otras regiones con condiciones climatológicas semejantes, o donde se disponga de los datos indicados en la Tabla 2.

Las ecuaciones (1) y (2) para determinar temperatura ambiente presentan desviaciones que no exceden el 12% (Septiembre, hora 20) y por tanto, su uso no inducirá errores apreciables en una simulación dada. Las ecuaciones (7), (8) y (10) para determinar irradiancia presentan desviaciones mayores, pero las mismas ocurren a las horas de menor irradiancia. Consecuentemente, no provocan errores apreciables al usarlas en simulaciones, lo cual fue demostrado al obtener la misma respuesta con correlaciones mejor ajustadas, en el comportamiento térmico de una sección bidimensional de una vivienda.

Nomenclatura

\bar{a}	= constante definida por la ecuación 16	ITMAX	= tiempo en minutos en el que ocurre la máxima temperatura ambiente del mes
b	= constante definida por la ecuación 17	ITMIN	= tiempo en minutos en el que ocurre la mínima temperatura ambiente del mes
DEC	= declinación (grados)	Ka	= constante definida por la ecuación 9
DIF	= diferencia entre la hora legal y la hora solar en minutos	\bar{K}_t	= índice de claridad diario promedio mensual
IA	= constante definida por la ecuación 4	\bar{K}_{td}	= relación entre la componente difusa y la irradiancia global promedio mensual (Ecs. 15 y 20)
IB	= constante definida por la ecuación 6	Lat	= latitud (grados)
IT	= tiempo del día (minutos)	Long	= longitud (grados)
		$Q_{Smax,h}$	= irradiancia global horizontal máxima (W/m^2)
		$Q_{I max,v}$	= irradiancia máxima sobre un plano vertical denominado 1 (W/m^2)
		Rb	= relación de la irradiancia directa sobre una superficie inclinada a aquella sobre una superficie horizontal (Ecuación 23)
		Rd	= relación de la irradiancia difusa sobre una superficie inclinada a aquella sobre una superficie horizontal (Ecuación 22)
		Rr	= factor de configuración tierra-alrededores de una superficie inclinada (Ecuación 21)
		Sbv	= irradiancia directa sobre una superficie vertical
		Sd	= componente difusa de la irradiancia global horizontal (W/m^2)
		Sdv	= irradiancia difusa sobre una superficie vertical
		Sh	= irradiancia global horizontal (W/m^2)
		Sr	= irradiancia reflejada sobre una superficie vertical
		S1	= irradiancia global sobre un plano vertical denominado 1 (W/m^2)
		TD	= máximo tiempo de asoleamiento o longitud del día (minutos)
		TF	= temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
		TML	= tiempo legal en minutos

T_{MS}	= tiempo solar en minutos
T_{avg}	= temperatura promedio mensual ($^{\circ}C$), ecuación 5
T_{Fmax}	= temperatura ambiente máxima del mes ($^{\circ}C$)
T_{Fmin}	= temperatura ambiente mínima del mes ($^{\circ}C$)
t	= tiempo del día en minutos en las ecuaciones 7, 8 y 10
$t_{max,1}$	= tiempo en minutos al cual ocurre la máxima irradiancia sobre un plano vertical denominado 1
t_{sr}	= tiempo de salida del sol (minutos)
t_{ss}	= tiempo de puesta del sol (minutos)
α_s	= altitud solar (Ecuación 24)
θ	= ángulo de incidencia del rayo de sol relativo de a una superficie inclinada (Ecuación 24)
ρ_r	= reflectividad difusa efectiva de los alrededores a un plano
ω	= ángulo hora solar (Ecuaciones 18 y 19)
ω_{ss}	= ángulo hora solar de salida o puesta del sol (Ec. 11)

Referencias

1. Almao de H., N. La Radiación Difusa sobre Planos Inclinados y Orientados en Maracaibo, Trabajo de Ascenso, Universidad del Zulia, Ingeniería, Venezuela, 37ma. Convención Anual, ASOVAC-Capítulo Zullano, 1988.
2. De Oteiza, P. Temperatura y Humedad en Maracaibo, Universidad del Zulia, Arquitectura I.S.A., Venezuela, 1985.
3. Howell, J., Bannerot, R., and Viñet, G. Solar Thermal Energy Systems Analysis and Design. Mc Graw Hill, New York, 1982.
4. Duffie, J.A., and Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, New York, 1980.
5. Almao de H., N. Insolation Data for Solar Thermal Conversion System Design in Venezuela, Proceedings of the 7th, Miami International Conference on Alternative Energy Sources, Vol. 1, 1985, pp.49-68.
6. De Oteiza, P. La Radiación Solar en Maracaibo, Universidad del Zulia, Arquitectura I.S.A., Venezuela, 1986.
7. Almao de H., N. and Rincón, J. Alternative Designs for Passive Cooling of Homes for Venezuela, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 115 (1993), pp. 161-168.

Recibido el 9 de Septiembre de 1993

En forma revisada el 05 de Mayo de 1994