

Modelos de temperatura ambiental de bulbo seco en las ciudades de Sancti Spíritus y Cienfuegos y su uso en diagnósticos energéticos.

MSc. Ing. Osmel Cabrera Gorrín¹; DrC. Anibal Borroto Nordelo²; DrC José Monteagudo Yanes²; DrC. Carlos Perez Tello³. Ing. Yunieskis Pérez Dorta¹

¹Centro Universitario José Martí Pérez, Cuba

²Universidad de Cienfuegos, Cuba

³Universidad de Baja California, Mexicali.

Email: osmelc@suss.co.cu; osclub2000@yahoo.com.mx

Resumen

Se calcularon los coeficientes de una serie de **Fourier** para estimar la temperatura horaria de las ciudades de Sancti Spíritus y Cienfuegos, Cuba en función de la temperatura máxima y mínima de cualquier día del año. Inicialmente se emplearon cinco días de cada mes para obtener los parámetros de correlación, posteriormente se correlacionó con la totalidad de los datos disponibles de enero a septiembre del 2002, demostrando que la variación de los coeficientes calculados fue mínima y esta dentro de los parámetros establecidos para la modelación de temperatura horarias. La temperatura calculada en ambos casos fue para cálculos prácticos pero puede ser usada para comprobar pronósticos de la misma. La función de **Fourier** desarrollada se utilizó para calcular las **Horas Grados** de cada mes y poder correlacionar esta variable con el consumo eléctrico de instalaciones hoteleras de las provincias seleccionadas.

A **Fourier** function to predict hourly temperature using maximum and minimum daily temperature was obtained for the cities of Sancti Spíritus and Cienfuegos. Initially five days were employed of every month in order to get the parameters of correlation, subsequently correlated with the entirety of the available data from January to December 2002. Deviations between five-day parameter and those obtained for all data was minimum. The temperature calculated in both cases was for practical calculations but it could be used in order to check presages of the same. **Fourier** function was utilized in order to calculate the **Hours Grades** of every month and can correlated this variable with the electric consumption of hotels of the selected cities.

Palabras Claves: Función de Fourier, Diagnóstico energético Simulación de temperatura, Horas Grados.

Introducción

En Cuba, los registros de temperatura generalmente se reportan cada tres horas por lo que el contar con un modelo para determinar temperatura horaria con fines de su utilización para establecer medidas de ahorro de energía es de mucho interés.

El consumo energético en el sector residencial y comercial en los climas tropicales esta dominado fundamentalmente por el consumo de los equipos de climatización los cuales pueden llevar a consumir más del 60% del consumo total para estos. El aprovechamiento eficiente de la energía en esta zona es fundamental en todas las actividades y el ahorro de energía es un concepto con bastante significado.

Desarrollo

Los registros horarios de temperatura ambiente de localidades de Cuba son tomados cada 3 horas y no se cuenta con datos de temperatura horarias ya que para las informaciones metereológicas esto no es un elemento de vital necesidad por ello fue necesario desarrollar un modelo que calculara la temperatura ambiente horaria a partir de la temperatura máxima y mínima diaria reportadas.

Este tipo de modelos se han utilizado para correlacionar la cantidad de radiación solar en una zona determinada y validado con datos obtenidos por mediciones directas (Festa y col., 1992; Satyamurty, 1991).

De acuerdo a la metodología utilizada por Festa y col., (1992), las fluctuaciones observadas de una variable pueden incorporarse al valor de la media como una función del tiempo. La temperatura ambiente puede considerarse una función periódica con la hora del día y una función de Fourier puede ser aplicable. De este modo, el modelo propuesto es de la forma:

$$\Theta(t) = \langle m \rangle + A \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) + B \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{24}\right); t = 1, 2, 3, \dots, 24 \quad (1)$$

donde la temperatura horaria adimensional se define como:

$$\Theta(t) = \frac{T_{max} - T(t)}{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

donde T_{max} y T_{min} son las temperaturas máxima y mínima del día n para la hora t . Los parámetros de la ecuación (1) se determinan con las siguientes expresiones:

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_{t=1}^{24} T(t)}{24} \quad (3)$$

$$A = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} [m(t) - \langle m \rangle] \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (4)$$

$$B = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} [m(t) - \langle m \rangle] \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (5)$$

$$m(t) = \frac{\sum_{n=1}^N T(t, \text{día})}{N}, t = 1, 2, 3, \dots; \text{día} = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

Inicialmente se emplearon cinco días de cada mes para los 12 meses del año con N= 60 para obtener los parámetros del modelo a través de un pequeño fichero Excel de cálculo. Posteriormente se utilizaron los datos comprendidos desde enero hasta septiembre diciembre del 2002 con una totalidad de N= 220. Las temperaturas horarias diarias se calcularon con los parámetros obtenidos para ambos casos y se compararon los resultados con los valores experimentales reportados.

Tabla 1. Coeficientes del modelo de temperaturas para seis ciudades en México y Cuba.

Ciudad	<m>	A	B	Desv. (%)
Cienfuegos, Cuba ^a	0.49469	0.21300	0.24652	-1.76
Sancti Spiritus, Cuba ^b	0.5101	0.3238	0.2598	1.46

^a Información climatológica proporcionada por el Departamento de Meteorología de la Provincia de Cienfuegos, Ministerio de Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba.

^b Sancti Spiritus, Ministerio de Ciencias, Tecnologías y Medio Ambiente, Cuba.

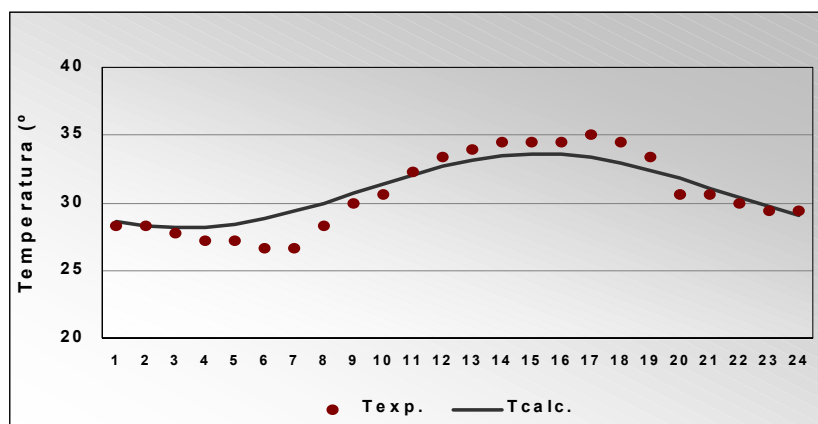


Figura 1. Temperatura horaria calculada vs experimental. 1 de agosto 2001, Cienfuegos, Cuba.

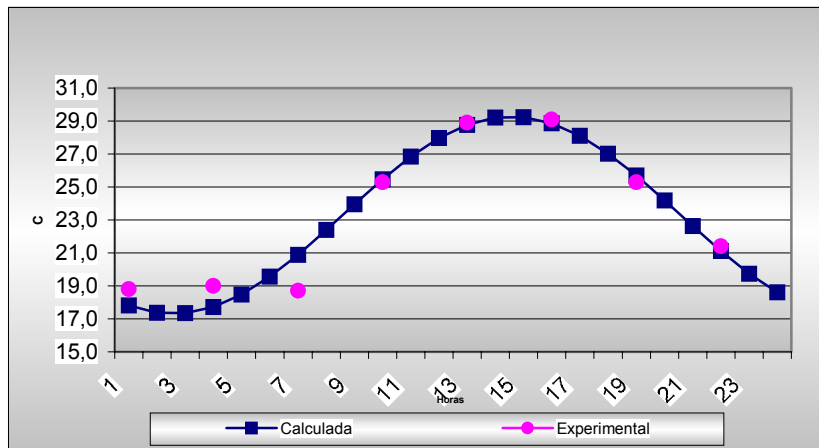


Figura 2. Temperatura horaria calculada vs experimental. 1 de julio del 2002. Sancti Spiritus, Cuba.

Se seleccionaron días al azar y los grafico obtenidos se representan en las figuras 1y 2 observándose que la desviación en la temperatura por ambos no es significativa y para todos los casos el error no excede el 5 %

HORAS-GRADO. Definición.

La temperatura ambiente de una región se registra de manera horaria durante un determinado periodo de tiempo. Mientras más se aleje dicha temperatura de las condiciones de confort, mayor es la necesidad de climatización de un espacio, y esto puede ocurrir tanto en un sentido o en otro, es decir, puede requerirse enfriamiento en climas cálidos o calefacción en climas fríos.

Por tanto, las horas-grado reflejan no sólo el alejamiento de las condiciones de confort, sino también el tiempo que cada nivel de temperatura permanece en el ambiente. De manera formal, las horas-grado se definen como:

$$HG = \int_{T_{ref}}^{T_{ext}} \int_{t=1}^{24} T(t) dt dT \tag{1}$$

donde T_{ref} y T_{ext} son la temperatura de referencia o de confort, y la temperatura ambiente exterior, respectivamente. La integración se efectúa para cada día por lo que el intervalo del tiempo es de la hora 1 a la 24 en intervalos de 1 hora. En la Figura 1 se muestra el concepto de horas-grado en forma gráfica y donde T_H y T_L definen las temperaturas límite consideradas de confort en verano e invierno, respectivamente.

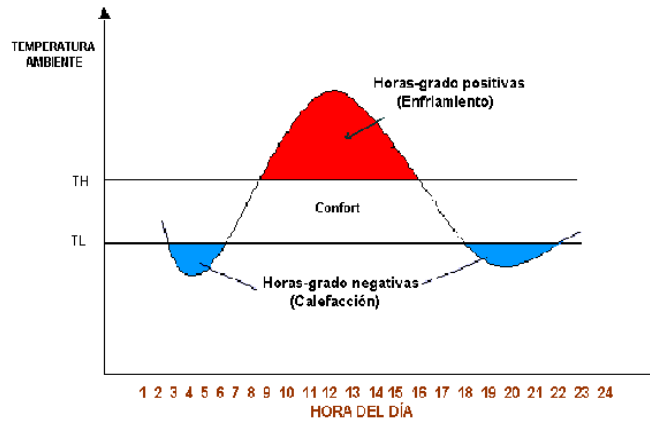


Figura 3. Visualización gráfica del concepto de horas-grado.

APLICACIÓN A CASOS DE ESTUDIO

En Cuba, el sector turístico, y en especial, el hotelero, representa uno de los rubros importantes de generación de divisas, pero al mismo tiempo, debido a las características climáticas del país, el aspecto de climatización es uno de los principales factores de consumo eléctrico. Una de las prioridades en este sector es la de aprovechar lo más eficientemente la energía eléctrica disponible. Recientemente, y como resultado de la colaboración entre el Área de Sistemas Energéticos de la UABC y el Centro de Estudios en Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos, se ha incorporado el criterio de horas-grado en el análisis de su comportamiento energético a fin de establecer índices que permitan establecer las bases de los programas de eficientización así como de planeación y gestión energética.

Como caso ejemplo se muestra el del Hotel La Unión de la ciudad de Cienfuegos. Los registros históricos indican que la climatización del edificio representa aproximadamente el 60% del consumo de electricidad en el periodo de verano. Actualmente se ha venido empleando como indicador de uso de la energía eléctrica el término de consumo por habitación/día ocupado equivalente HDOeq. Esto es, se ha buscado correlacionar el consumo total del edificio con respecto al número de habitaciones ocupadas por día, ponderando aquellos factores que marcan diferencias entre habitaciones del mismo edificio, por otras cargas no asociadas con las habitaciones ocupadas, etc.

Sin embargo, este índice no ha mostrado aun un grado de correlación aceptable y se ha revelado no ser mayor al 60 %. Por esta razón, se decidió incorporar el criterio de horas-grado en el índice HDOeq. Para ello se hace la consideración de que este índice depende no sólo de la ocupación del hotel sino también del efecto del clima, es decir, separar el consumo eléctrico por causa atribuible a los hábitos de los huéspedes y personal del edificio, del clima por sí mismo.

Con el criterio de horas-grado es posible determinar si un mes fue más (o menos) caluroso que en otra ciudad o que en otro año y cuánta energía se requiere por climatización en base a una temperatura de referencia considerada de confort. Además, se ha encontrado que el impacto de la humedad relativa no va más allá de un 5% al 10% con respecto al efecto de la

temperatura ambiente para sistemas climatizados a menos que exista una infiltración extremadamente alta lo cual no sucede en edificios como los analizados.

De esta manera, el índice HDOeq puede ser corregido utilizando un factor debido al efecto del clima y obtenido del criterio de horas-grado haciendo uso de un modelo de Fourier a partir de registros de temperatura ambiente máxima y mínima diarias (Pérez y col., 1996). Los parámetros del modelo se calcularon de información de temperatura ambiente horaria registrada en la terraza del hotel desde abril a junio del 2001. En la Figura 4 se muestra la correlación obtenida de consumo eléctrico mensual contra horas-grado para el periodo de verano comprendido de mayo a octubre en Cienfuegos. El coeficiente de regresión para estos seis meses es de 0.89 lo cual es una mejora sustancial con respecto a los índices manejados anteriormente. A partir de estos datos se obtiene un factor de corrección Ft que permite establecer la relación entre HDOeq y el consumo mensual del hotel. Esto se muestra en la Figura 5. El grado de correlación ($R^2 = 0.74$) aún puede considerarse satisfactorio dado el índice anterior que no rebasó el 50%.

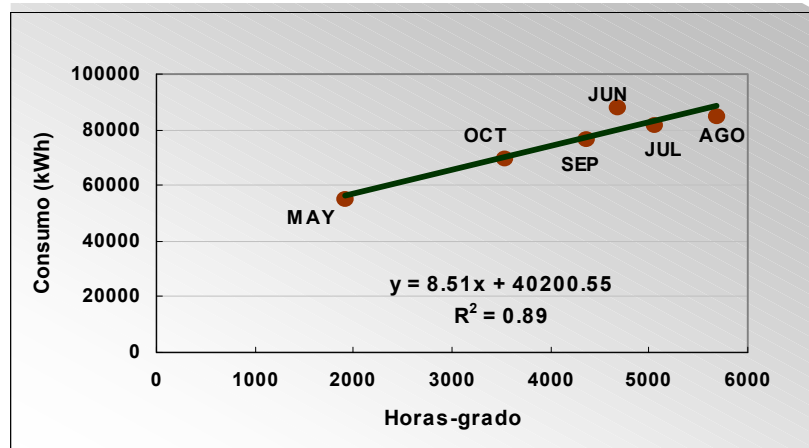


Figura 4. Consumo mensual en meses de verano vs horas-grado.

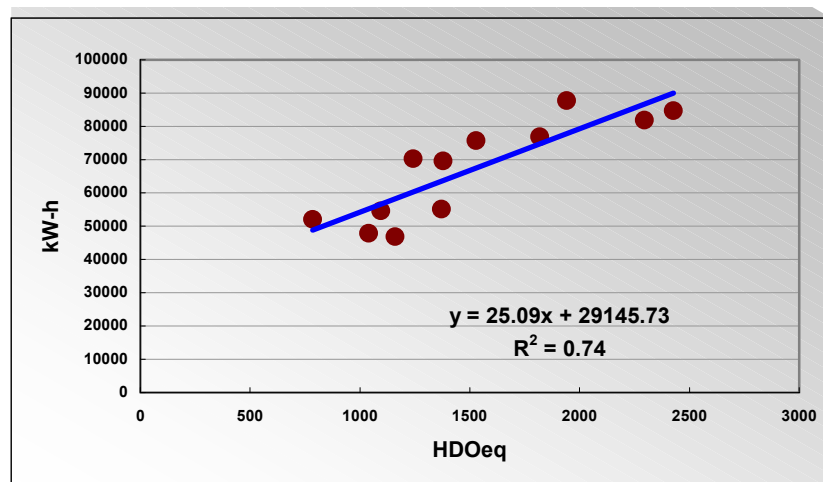


Figura 5. Consumo mensual vs habitación día ocupado equivalente. Hotel La Unión. 2001.

En la Figura 6 se muestran los consumos mensuales reales y los calculados mediante la correlación con el índice HDOeq corregido por horas-grado. La desviación máxima se observa en el mes de diciembre y fue del 24%. Sin embargo, el resto de los meses la desviación es menor y el valor promedio anual de esta es del orden del 1%. Esto indica que, a pesar de las variaciones, que son normales por los comportamientos puntuales en cada mes particular, en forma anualizada la predicción es excelente. Estos valores concuerdan en los órdenes de magnitud y en el comportamiento observado en el edificio de telefonía presentado anteriormente en el cual las desviaciones máximas mensuales fueron el 20% y el promedio anualizado fue del 2%. Esto indica la robustez de la metodología de horas-grado para caracterización del comportamiento energético de edificios donde la climatización es importante.

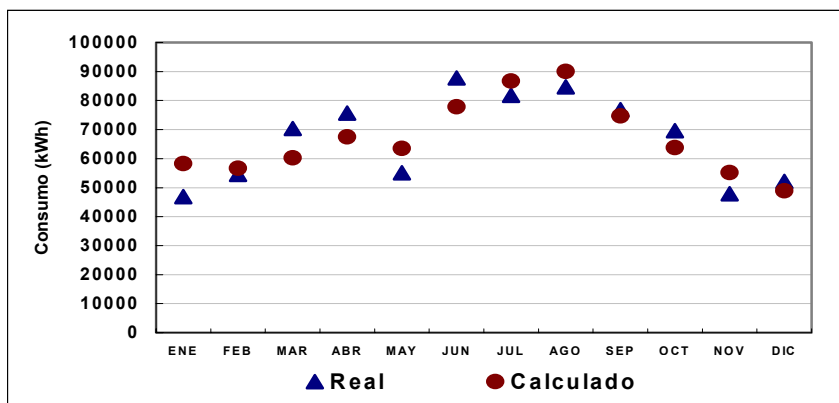


Figura 6. Consumo real y calculado mensual a partir de la correlación con horas-grado. Hotel La Unión, Cienfuegos.

CONCLUSIONES

Se encontró que la temperatura de bulbo seco se puede correlacionar a través de una función de Fourier con la temperatura máxima y mínima del día particular. Los modelos obtenidos han mostrado ser confiables para su utilización en la elaboración de diagnósticos energéticos en hoteles y sector comerciales.

Los resultados presentados permiten concluir que la metodología basada en el criterio de horas-grado para caracterizar el comportamiento energético en edificios donde la climatización representa una buena parte del consumo y demanda eléctricas, produce resultados más confiables que los índices tradicionalmente aceptados como son el de habitación/día ocupado o índices mensuales por unidad de área, etc.

Ha mostrado ser un método robusto y simple ya que se requiere contar con registros de temperatura ambiente horaria, y máxima y mínima, el historial de consumo y demanda del edificio y, si se cuenta con la tipología y características de operación del edificio, pueden establecerse escenarios basados en criterios de gestión energética así como la planeación a futuro garantizando el mejor aprovechamiento de los recursos tanto energéticos como financieros. Con la aplicación de esta metodología es posible evaluar acciones, planes,

estrategias y metas de uso racional y eficiente de la energía en prácticamente cualesquier sistema que tenga que ver con acondicionamiento ambiental y confort.

BIBLIOGRAFÍA

1. Campbell R. H. E., Pérez T. C., Velázquez L. N., García M. J., Ramos I. R., "Estudio técnico-económico del envolvente del Edificio Arbol-3 de Telnor", Reporte Técnico, 1995.
2. Pérez T. C., Campbell R. H. E., Velázquez L. N., García M. J., "Modelamiento de temperatura ambiental en Mexicali, B.C. para su utilización en diagnósticos energéticos", XVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, 1996.
3. Festa, S.R Col,1992. Stochastic modeling of daily global irradiation, Renewable Energy,Vol.2, No. 1, 23-24
4. Satyamurty V. V., Col, 1991, Estimation of symmetric and asymmetric hourly global and diffuse radiation from daily values, Solar Energy, Vol. 48, No. 1, 7-14