

MODELO DE CÁLCULO DE GRADOS-DÍA MENSUALES DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO CON TEMPERATURA BASE VARIABLE, PARA APLICACIONES ENERGÉTICAS

MODEL OF CALCULATION OF MONTHLY DEGREE-DAYS FOR COOLING AND HEATING AT ANY BASE TEMPERATURE, FOR ENERGY APPLICATIONS

Ovidio Rodríguez Santos^{1}, Oscar Cruz Fonticiella¹ y Alfredo Leyva Céspedes¹*

¹ Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales, CEETA, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Julio 18, 2017; Revisado: Septiembre 27, 2017; Aceptado: Octubre 26, 2017

RESUMEN

Los grados-día, representan un indicador muy versátil, utilizado en aplicaciones tales como; la arquitectura bioclimática, el estimado de rendimientos agrícolas de la caña de azúcar y otros cultivos, la gestión energética en instalaciones industriales y del sector terciario, etc. Para aplicaciones energéticas en la industria y el sector terciario, los modelos más utilizados son los de cálculo de los grados-día mensuales de calentamiento y enfriamiento con temperatura base variable. Hasta la fecha, los modelos publicados, presentan la característica de utilizar como variables de cálculo, la temperatura media mensual y la desviación estándar de las temperaturas medias diarias para el mes. El uso de este último parámetro, introduce algunas desventajas que limitan su aplicación. En este trabajo, se desarrolló un modelo para el cálculo de los grados-día de calentamiento y enfriamiento mensual con temperatura base variable, que utiliza para el cálculo, parámetros o normales climatológicas como: la temperatura media mensual, la temperatura máxima, la temperatura mínima, de las temperaturas medias diarias y el parámetro Z, definido por los autores. El modelo, posibilita el cálculo de los grados-día, con una exactitud comparable con la obtenida por otros métodos, eliminar las desventajas del uso de la desviación estándar como parámetro de entrada y tipificar los resultados para un periodo determinado de tiempo.

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Ovidio Rodríguez, Email: ovidio@uclv.edu.cu

Palabras clave: grados-día; gestión energética; instalaciones industriales; sector terciario.

ABSTRACT

The degrees-day, represent a very versatile indicator, used in applications such as: bioclimatic architecture, estimation of agricultural yields of sugar cane and other crops, energy management in industrial and tertiary sector, etc. For energy applications in industry and the tertiary sector, the most commonly used models are the calculation of monthly degrees-day of heating and cooling at any base temperature. All models published use as calculation variables: the mean monthly temperature and the standard deviation of the average daily temperatures in the month. The use of this last parameter introduces some disadvantages that limit its application. In this work, a model was developed for the calculation of degrees-day of monthly heating and cooling at any base temperature, which use for calculation, parameters or climatological normals such as: the mean monthly temperature, the maximum temperature, the minimum temperature, the average daily temperatures and the parameter Z, defined by the authors. The model allows the calculation of degrees-day, with accuracy comparable to the same obtained by other methods, eliminates the disadvantages of using the standard deviation as the input parameter and typifies the results for a specific period of time.

Key words: degrees-day; energy management; industrial facilities; tertiary sector

1. INTRODUCCIÓN

Los grados-día, pueden ser utilizados, entre otras aplicaciones, en la arquitectura bioclimática, para la estimación de los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar y otros cultivos, en la gestión energética de instalaciones del sector terciario y la industria, etc. (Ferrer y col., 2014), (De Rosa et al., 2014) y (De Rosa et al., 2015). La relación entre el consumo de energía y los parámetros climatológicos se incrementa debido al impacto que produce el cambio climático que se está presentando en el planeta (Cox et al., 2015) y (Li et al., 2012). La relación entre los grados-día y la demanda de energía para las edificaciones del sector terciario y la industria, ha sido tratada por varios autores (Moustris et al., 2015). Otros trabajos han ido apareciendo en los últimos años enfocados no solo en calcular, sino también, en predecir la demanda de energía, Mourshed (2012). Se reportan numerosos modelos y procedimientos destinados al cálculo de los grados-día, la elección de uno u otro, en lo fundamental, depende generalmente de los parámetros climatológicos a utilizar, de la disponibilidad de información de éstos para una determinada región y del tipo de aplicación (Ciulla et al., 2015).

Para aplicaciones de gestión energética en el sector terciario y la industria, se utilizan preferentemente modelos de cálculo de los grados-día mensuales de enfriamiento y calentamiento con temperatura base variable, entre estos, los modelos desarrollados por (Erbs et al., 1983), Hitchin (1983) y (Schoenau y Kehrig, 1990), en la actualidad resultan atractivos para su uso, sin embargo, presentan algunas características que

limitan su aplicación: el utilizar la desviación estándar de las temperaturas medias diarias para el mes S_d como variable de entrada, implica la necesidad de disponer de los valores reales de un parámetro que no está normalmente accesible al usuario, su cálculo o estimado incrementa el esfuerzo, el tiempo a consumir y el error de cálculo.

Erbs (Erbs et al., 1983), basado en datos de variables climatológicas de regiones de U.S., propone una ecuación de regresión para el estimado de la desviación estándar de las temperaturas medias diarias para el mes, una propuesta similar se hace para el modelo desarrollado por Schoenau y Kehrig, lo cual lo convierte en un modelo híbrido, en ambos casos se incrementa, el error de cálculo a valores que pueden sobrepasar los 10°C/día al mes.

Estos modelos, no mantienen en lo fundamental la forma de las ecuaciones que tradicionalmente se han utilizado para el cálculo de los grados-día, lo que en cierta medida limita su uso.

En este artículo se propone un modelo para el cálculo de los grados-día mensuales de enfriamiento y calentamiento con temperatura base variable, desarrollado por investigadores del Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA), en lo adelante se nombrará como modelo de Rodríguez Santos, el cual, posibilita: el cálculo de los grados-día manteniendo las características fundamentales de la ecuación tradicional, usar como variables de entrada, variables o normales climatológicas tales como: la temperatura media t_m , la temperatura media mínima t_{min} , la temperatura media máxima t_{max} mensuales y el coeficiente Z nombrado así por los autores y que resulta específico para una región geográfica dada. Con este modelo se obtienen resultados comparables en exactitud a la alcanzada con la aplicación de otros modelos, incluyendo el modelo no híbrido de Schoenau y Kehrig y posibilita que los resultados obtenidos puedan ser tipificados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelo para el cálculo de los grados-día mensuales de enfriamiento y/o calentamiento con temperatura base variable propuesto por Rodríguez Santos.

Los grados-día se definen como la sumatoria para todos los días de un período convencional de tiempo, de los valores positivos de la diferencia entre la temperatura media diaria y una temperatura de referencia, comúnmente llamada temperatura base.

Tradicionalmente, para el cálculo de los grados-día mensuales de enfriamiento (GD_{me}) o calentamiento (GD_{mc}) con temperatura base variable, se utilizan las expresiones (1) y (2) respectivamente:

$$GD_{me} = \sum_{J=1}^N (t_d - t_b)^+ \quad (1)$$

$$GD_{mc} = \sum_{J=1}^N (t_b - t_d)^+ \quad (2)$$

Dónde los términos t_d , t_b y N representan; la temperatura media diaria para cada día del mes, la temperatura base y el número de días para el mes correspondiente, respectivamente. El símbolo de suma indica que solo se deben tomar los valores positivos.

El modelo, establece como variables de entrada: la temperatura media mensual t_m , la temperatura media mínima mensual t_{min} y la temperatura media máxima mensual t_{max} , de las temperaturas medias diarias para un periodo de tiempo de un mes. Con estas variables se define el parámetro adimensional ζ , expresado por la ecuación (3).

$$\zeta = \frac{t_m}{t_{max} - t_{min}} \quad (3)$$

En dependencia de los valores que puede tomar la temperatura base, se establecen tres intervalos de variación.

Primer intervalo, $t_b \leq t_{min}$, segundo intervalo, $t_{min} \leq t_b \leq t_{max}$ y tercer intervalo, $t_b \geq t_{max}$. Por las expresiones (1) y (2), se hace evidente, que el procedimiento de cálculo es específico en dependencia de que los grados-día se calculen prioritariamente para enfriamiento o para calentamiento, por lo que los términos y ecuaciones se concretan para cada caso.

Para cualquiera de los intervalos, el modelo propone para el cálculo de los grados-día de enfriamiento o calentamiento las ecuaciones (4) y (5).

$$GD_{me} = N(\theta_{mee} - t_b) \quad (4)$$

$$GD_{mc} = N(t_b - \theta_{mec}) \quad (5)$$

Los términos θ_{mee} y θ_{mec} , nombrados por los autores, temperatura media mensual equivalente de enfriamiento y temperatura media mensual equivalente de calentamiento, fueron definidos por un método grafo-analítico y deben ser determinados para cada intervalo.

2.2. Determinación de θ_{mee} y θ_{mec} para el primer ($t_b \leq t_{min}$) y tercer intervalos ($t_b \geq t_{max}$)

Para todos los valores de t_b en esos intervalos, se cumple, que los valores que toman θ_{mee} y θ_{mec} son constantes e iguales a la temperatura media mensual t_m , los valores de los grados-día mensuales de enfriamiento (GD_{me}) o calentamiento (GD_{mc}) que resulten negativos se consideran nulos.

2.3. Determinación de θ_{mee} y θ_{mec} para el segundo intervalo. ($t_{min} \leq t_b \leq t_{max}$).

En ese intervalo los valores de los términos θ_{mee} y θ_{mec} , varían en correspondencia con los valores que tome la temperatura base y se deben calcular siguiendo una determina secuencia de ecuaciones.

Primeramente se definen los términos t_{mee} y t_{mec} , que resultan similares a θ_{mee} y θ_{mec} , radicando la diferencia entre ellos, en que el valor de los parámetros θ_{mee} y θ_{mec} , se definen mediante ecuaciones no lineales.

El cálculo de las variables (t_{mee}) y (t_{mec}) se realiza mediante las ecuaciones (6) y (7):

$$t_{mee} = (t_b - t_{min}) \left(\frac{t_{max} - t_m}{t_{max} - t_{min}} \right) + t_m \quad (6)$$

$$t_{mec} = (t_b - t_{min}) \left(\frac{t_m - t_{min}}{t_{max} - t_{min}} \right) + t_{min} \quad (7)$$

Realizándose el cálculo de θ_{mee} y θ_{mec} , mediante las ecuaciones:

$$\theta_{mee} = (t_{mee} - t_{\max})e^{Z_e(t_{mee} - t_m)} + t_{\max} \quad (8)$$

$$\theta_{mec} = (t_{mec} - t_{\min})e^{Z_c(t_m - t_{mec})} + t_{\min} \quad (9)$$

Los coeficientes (Z_e) y (Z_c) para enfriamiento y calentamiento respectivamente, tienen valores constantes para todo el intervalo, se calculan por las ecuaciones (10) y (11) para un determinado valor de la temperatura base t_b , se propone calcularlos para el punto donde t_b Iguala en valor a la temperatura media mensual t_m .

$$Z_e = \frac{\ln \frac{\theta_{mee} - t_{\max}}{t_{mee} - t_{\max}}}{t_{mee} - t_m} \quad (10)$$

$$Z_c = \frac{\ln \frac{\theta_{mec} - t_{\min}}{t_{mec} - t_{\min}}}{t_m - t_{mec}} \quad (11)$$

En las ecuaciones (10) y (11) se sustituyen los valores de (t_{mee}) y (t_{mec}) calculados por las ecuaciones (6) y (7) en las cuales, el término t_b se sustituye por t_m , estos mismos valores de (t_{mee}) y (t_{mec}) se sustituyen en las ecuaciones (12) y (13), para el cálculo de los valores de θ_{mee} y θ_{mec} a sustituir en las ecuaciones (10) y (11).

$$\theta_{mee} = t_{mee} - Z \quad (12)$$

$$\theta_{mec} = t_{mec} + Z \quad (13)$$

El parámetro (Z), que relaciona los parámetros (θ_{mee} y θ_{mec}) con los parámetros (t_{mee} y t_{mec}), depende de las características climatológicas de la región geográfica dada y se calcula como:

$$Z = A\zeta^{-B} \quad (14)$$

Dónde el término ζ fue definido en la ecuación (3) y A y B son coeficientes específicos para la región.

Con los valores determinados de los coeficientes (Z_e) y (Z_c), por las expresiones (8) y (9) se calculan los valores de θ_{mee} y θ_{mec} para todos los valores de t_b en el segundo intervalo y se determinan los grados-día de enfriamiento (GD_{me}) y calentamiento (GD_{mc}) por las ecuaciones (4) y (5).

El modelo permite determinar los (GD_{mc}) a partir del cálculo de los (GD_{me}) o viceversa, mediante las ecuaciones (15) y (16) y realizar comprobaciones, mediante las expresiones (17) y (18).

$$GD_{me} = N(t_m - t_b) + GD_{mc} \quad (15)$$

$$GD_{mc} = GD_{me} - N(t_m - t_b) \quad (16)$$

$$\theta_{mee} + \theta_{mec} = t_m + t_b \quad (17)$$

$$\theta_{mee} + \theta_{mec} = t_{mee} + t_{mec} \quad (18)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo propuesto presenta algunas características, que pueden considerarse ventajosas en aplicaciones de gestión energética en el sector terciario y la industria:

Con la aplicación del modelo para el cálculo de los grados-día mensuales de enfriamiento a la región de Santa Clara, se alcanzan valores comparables en exactitud a los alcanzados mediante la aplicación del modelo de Schoenau y Kehrig en su versión no híbrida, se calcularon para esa región, los valores de los coeficientes A y B cuyos valores son 2,3813 y - 0,802 respectivamente, para el cálculo del parámetro Z, los valores de grados-día así obtenidos, se utilizaron en estudios de gestión energética en diferentes instalaciones de la región.

La relación entre los parámetros ζ y Z, definida en este trabajo para un período de tiempo mensual, se puede definir también para otras escalas de tiempo, que van desde una escala horaria, hasta una escala anual.

Los parámetros definidos como (GD_{me}) , (GD_{mc}) son sustituibles directamente, en las expresiones de las metodologías para aplicaciones de gestión energética que se publican en la bibliografía especializada. Por ejemplo, la energía total consumida en una edificación para un mes se calcula como:

$$E_m = \frac{H.GD_m.t}{\eta} \quad (19)$$

Donde el término H , en W/K representa el coeficiente global de transmisión del edificio, GD_m se sustituye por (GD_{me}) o (GD_{mc}) , según los grados-día sean de enfriamiento o calentamiento, t es tiempo de trabajo al día y η rendimiento del sistema de enfriamiento o calentamiento.

Para el cálculo de los consumos de energía en instalaciones del sector terciario y la industria se aplican modelos inversos de regresión como por ejemplo:

$$E_m = a + b.GD_m \quad (20)$$

Se pueden obtener, valores tipificados de (GD_{me}) , (GD_{mc}) para cada mes de un año típico, al utilizar como variables de entrada los valores de las normales climatológicas: temperatura media mensual, temperatura media mínima mensual y temperatura media máxima mensual para una región geográfica determinada.

Como desventaja del modelo, se señala un incremento del número de variables de entrada.

4. CONCLUSIONES

1. Se logra, al establecer las relaciones entre la temperatura media t_m , la temperatura máxima t_{max} y la temperatura mínima t_{min} , de las temperaturas medias diarias mensuales, con el parámetro Z, definido por los autores, desarrollar un modelo para el cálculo de los grados-día, donde se alcanzan valores comparables en exactitud a los alcanzados mediante la aplicación del modelo de Schoenau y Kehrig en su versión no híbrida.
2. La ecuación final propuesta para el cálculo de los grados-días, conserva en gran medida las características esenciales de la ecuación tradicionalmente usada, mediante la definición de los términos, temperatura media mensual equivalente

para enfriamiento θ_{mee} y temperatura media mensual equivalente para calentamiento θ_{mec} .

3. Es posible mediante la aplicación del modelo, obtener valores típicos mensuales de los resultados del cálculo de los grados-día, al introducir como variables de entradas las normales climatológicas: temperatura media t_m , temperatura máxima t_{max} y la temperatura mínima t_{min} , de las temperaturas medias diarias mensuales.

REFERENCIAS

- Ciulla, G., Lo Brano, V., and Moreci, E., Degree days and building energy demand., En 3rd Southern African Solar Energy Conference, South Africa, 2015, pp. 65-70.
- Cox, R., Drews, M., Rode, C. and Nielsen, S., Simple future weather files for estimating heating and cooling demand., Building and Environment, Vol. 83, 2015, pp. 104-114.
- De Rosa, M., Bianco, V., Scarpa, F. and Tagliafico, L., Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach. Applied Energy, Vol. 128, 2014, pp. 217-229.
- De Rosa, M., Bianco, V., Scarpa, F. and Tagliafico, L., Historical trends and current state of heating and cooling degree days in Italy., Energy Conversion and Management, Vol. 90, 2015, pp. 323-335.
- Erbs, D., Beckman, W. and Klein, S., Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures., Ashrae Journal, Vol. 25, No. 6, 1983, pp. 60-65.
- Ferrer, M., Gálvez, G., Lamela, C. and Jiménez, G., Uso de los grados días acumulados en la estimación de la evapotranspiración de la caña de azúcar (*Saccharum spp. híbrido*) para ciclos de crecimiento monomodal., Cultivos Tropicales, Vol. 35, No. 3, 2014, pp. 113-117.
- Hitchin, E., Estimating monthly degree-days., Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 4, No. 4, 1983, pp. 159-162.
- Li, D., Yang, L., Lam, J., Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones—a review., Energy, Vol. 42, No. 1, 2012, pp. 103-112.
- Mourshed, M., Relationship between annual mean temperature and degree-days., Energy and buildings, Vol. 54, 2012, pp. 418-425.
- Moustris, K., Nastos, P., Bartzokas, A., Larissi, I., Zacharia, P. and Paliatsos, A., Energy consumption based on heating/cooling degree days within the urban environment of Athens, Greece., Theoretical and Applied Climatology, Vol. 122, No. 3-4, 2015, pp. 517-529.
- Schoenau, G. y Kehrig, R., Method for calculating degree-days to any base temperature., Energy and buildings, 1990, Vol. 14, No. 4, pp. 299-302.