

EVOLUCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS EN EDIFICACIONES, DESARROLLADAS POR LA ASHRAE

Ignacio R. Martín Domínguez y Ma. Teresa Alarcón Herrera

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes 120 Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México. Tel. (614) 439-1148, Fax (614) 439-1112 ignacio.martin@cimav.edu.mx

RESUMEN

Se presenta un análisis de las metodologías desarrolladas por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) para el cálculo de las cargas térmicas en edificaciones por efecto de las condiciones climáticas, radiación solar, equipos, alumbrado y ocupantes.

Se describe el papel de la ASHRAE como organismo mundialmente reconocido, siendo la máxima autoridad en materia de normalización y organización del conocimiento y prácticas de ingeniería en su ramo.

Se describen las metodologías que a lo largo de las últimas 4 décadas se han desarrollado, utilizado, probado y finalmente abandonado o confirmado, para la estimación de las cargas térmicas en edificaciones. Se analizan sus fundamentos, características, rangos de aplicación y limitaciones de uso.

Se dan recomendaciones sobre la utilización de dichos métodos en nuestro país y sobre la pertinencia de la utilización de uno de ellos para la enseñanza a nivel universitario.

Se analiza el hecho de que la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolverte de Edificios no Residenciales, esté basada en un método de cálculo que ya no es recomendado por ASHRAE, sugiriendo la pertinencia de llevar a cabo una actualización a la Norma.

ABSTRACT

An analysis of ASHRAE's calculation methods for the heating and cooling loads in buildings is presented.

The role of ASHRAE as the world's leading authority in the field of normalization and engineering knowledge validation is described.

A description of the thermal load calculation methodologies that were developed, used, validated or discarded during the last four decades is given. Their foundations, characteristics, application ranges and limitations are analyzed.

Recommendations for the application of such methods in México are given and the pertinence of using one of them for teaching purposes is analyzed.

The fact that the Official Mexican Norm for Energy Efficiency of Non-Residential Buildings (NOM-ENER-008-2001) was developed based on a calculation method no longer recommended by ASHRAE is analyzed, and the suggestion of updating the norm is given.

PALABRAS CLAVE

Cálculo de cargas térmicas en edificaciones, Normas, Eficiencia energética en edificaciones.

INTRODUCCIÓN

Estimación del comportamiento térmico de la vivienda

En la actualidad se busca lograr que la vivienda humana cumpla con su cometido de protegerlo del clima y proporcionar condiciones de confort a sus ocupantes, y que además tal meta se pueda alcanzar con el mínimo costo de construcción de la vivienda, y de la instalación y operación de los equipos y sistemas requeridos para proporcionar climatización a la misma. Para lograr tal cometido, se requiere contar con metodologías para calcular las ganancias y pérdidas de calor de las edificaciones (cargas térmicas), así como el efecto de dichos flujos de energía sobre el comportamiento térmico de la edificación, ya que la masa del mismo origina una inercia térmica que desfasa en el tiempo la respuesta de la edificación respecto a la carga térmica instantánea (McQuiston y Parker, 1977) (Kreider *et al.*, 2002).

Clasificación de los métodos de cálculo

La complejidad del problema se aprecia mejor si se analiza el gran número de variables que intervienen, que en general se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Localización geográfica
- Tamaño, geometría, materiales y uso de la vivienda
- Época del año
- Condiciones climáticas de la región

Por ello se han desarrollado varias diferentes metodologías para el cálculo del comportamiento térmico de edificaciones, dividiendo el problema de la siguiente forma (ASHRAE, 1993 y 2001):

De acuerdo al uso del inmueble

- Para edificaciones habitacionales, ya sean unifamiliares o multifamiliares, también denominadas Residenciales.
- Para edificaciones no-habitacionales, que abarca toda otra edificación como pueden ser para uso industrial, comercial, oficinas, auditorios, cines, centros comerciales, etc.

De acuerdo a la época del año

- Calefacción
- Enfriamiento

De acuerdo al propósito del análisis

- Para selección de equipo de climatización
 - Para estimación del uso de energía y evaluación del confort
- De acuerdo a su facilidad de uso
- Métodos manuales
 - Métodos computacionales

Y en varias de las categorías anteriores se han desarrollado más de un método, lo cual ha dado como resultado que exista un número apreciable de metodologías de cálculo para determinar las "cargas térmicas", con la consiguiente confusión entre quienes requieren llevar a cabo ese tipo de análisis y disparidad en resultados obtenidos para una misma edificación.

Lo anterior también complica el proceso de enseñanza del tema en las universidades y demás instituciones de educación superior, ya que a los estudiantes solo se les puede llegar a mostrar uno de los métodos existentes, usualmente alguno de los más simplificados, para uso manual, orientados a la selección de equipo, y que depende del libro de texto utilizado y de la fecha de edición del mismo. Como consecuencia, no existe una percepción clara entre los profesionales dedicados al cálculo, selección e instalación de equipos de acondicionamiento climático, de la restringida aplicabilidad y/o confiabilidad de algunos de los métodos de cálculo existentes, así como de la continua evolución que se ha dado en cuanto a nuevos métodos (TC4.1, 1991).

De la clasificación anterior, los casos para los cuales existen mayor variedad de métodos son:

- Selección de equipo para enfriamiento en edificaciones no habitacionales
- Estimación dinámica (horaria) del uso de energía y condiciones de confort

Quedando las metodologías para el cálculo de cargas para calefacción (para selección de equipo) y metodologías para cálculo de cargas de enfriamiento en edificaciones habitacionales (para la selección de equipo) como técnicas más o menos maduras, que no han tenido cambios importantes recientemente (ASHRAE, 2001).

ASHRAE COMO ORGANISMO RECTOR

La Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, ASHRAE por su nombre en inglés, es la asociación profesional reconocida mundialmente como la máxima autoridad en el desarrollo de Normas y procedimientos de cálculo en esas áreas del conocimiento. La ASHRAE logra su cometido a través de Comités Técnicos, formados con profesionistas reconocidos por su competencia y experiencia en cada tema particular, que se encargan de estudiar y compilar el estado del arte de cada tema y publicar dicho conocimiento en forma de Capítulos, dentro de los Manuales ASHRAE. Se editan cuatro Manuales, denominados Fundamentos, Aplicaciones, Sistemas y Equipos y Refrigeración, los cuales se revisan y publican uno cada año. Con ello se tiene un periodo de revisión de cuatro años para cada Manual, adicionalmente se publican libros especializados sobre algunos de los temas de mayor interés.

Comités Técnicos de ASHRAE

El Comité Técnico encargado de recopilar, analizar y recomendar la metodología más adecuada para la estimación de las cargas térmicas que ocurren en edificios, para fines de dimensionamiento de los equipos de acondicionamiento de aire, es el denominado Comité Técnico 4.1 (TC4.1). Como los demás comités de ASHRAE, opera bajo el principio de Acuerdo por

Consenso, en el cual "se intentan considerar todos los conceptos viables, teorías y técnicas, y solo recomienda la inclusión en el Manual aquellos procedimientos y técnicas que han sido autenticados mediante investigación técnica adecuada, confirmados por la experiencia de los diseñadores líderes y/o que se consideren como prácticos para su uso por un amplio rango de usuarios" (TC4.1, 1991).

Este comité menciona que los ingenieros en calefacción desarrollaron desde hace muchos años los procedimientos, relativamente sencillos y directos, para la estimación de las "perdidas de calor" en un edificio (análogo a la carga de calefacción), cuyos resultados son por lo general corroborables mediante pruebas de laboratorio. Sin embargo el caso de enfriamiento de edificios es diferente, y desde la década de los 30 se ha venido tratando de explicar y lidiar con el fenómeno de la absorción (acumulación, almacenaje) de calor radiante en las edificaciones, y su posterior liberación, ocasionada por la masa del edificio y su contenido material. Esto es, las ganancias de calor (instantáneas) de un edificio no son iguales a la carga de enfriamiento que se tiene en ese instante en ese mismo edificio, ya que el calor se incorpora a la masa del edificio y es liberado más tarde, causando un retraso en la respuesta térmica. Ante la existencia de tal comportamiento surgen tres preguntas importantes:

- Que fracción de la carga térmica instantánea se retrasa?
- Cuanto es el retraso, en tiempo?
- Como pueden calcularse estas cantidades?

Se menciona que existen en la literatura multitud de trabajos técnicos que tratan de responder tales preguntas, y ASHRAE se ha dado a la tarea de recopilar y estudiar las técnicas que se han propuesto, para recomendar las más adecuadas para su uso. Sin embargo, el mismo comité advierte que el cálculo de la carga de enfriamiento de un edificio sigue siendo más un arte que una ciencia, y por lo tanto los resultados que es posible obtener se deben de seguir considerando como aproximaciones de la realidad (TC4.1, 1991).

Metodologías desarrolladas por los comités de ASHRAE

A la fecha ASHRAE ha desarrollado seis metodologías de cálculo para las cargas de enfriamiento (Sauer y Howell, 1990) (ASHRAE, 2001):

- TFM (Transfer Function Method)
- TETD/TA (Total Equivalent Temperature Differential / Time-Averaging)
- CLTD/CLF (Cooling Load Temperature Differentials / Cooling Load Factors)
- Residential Method
- HB (Heat Balance Method)
- RTS (Radiant Time Series)

Los métodos anteriores están por supuesto basados en las mismas leyes de la termodinámica y transferencia de calor, pero varían entre sí en cuanto a las simplificaciones que introducen y metodologías utilizadas para resolución de las ecuaciones resultantes.

Cronología de los métodos

En 1967 se presentó el método TETD/TA en el Manual de "Fundamentals" y en 1972 se presentó el método TFM, que resultó ser demasiado complicado para su aplicación masiva en su tiempo por sus requerimientos de cómputo. En 1977 se presentó en el Fundamentals una versión simplificada del método de la Función de Transferencia, denominado CLTD/CLF, con la

intención de que fuese un método manejable para cálculos manuales, y por su facilidad se convirtió en la metodología utilizada para enseñanza en las universidades. Poco tiempo después se presentó un procedimiento adicional denominado "Residencial", que en realidad es un subconjunto del método CLTD/CLF, simplificado para ser utilizado únicamente en viviendas unifamiliares (Residencias). Por último, la edición 2001 del ASHRAE Fundamentals presenta dos nuevos métodos, el denominado HB (Heat Balance) y el RTS (Radiant Time Series), advirtiendo que si bien estos nuevos métodos son los más confiables para la estimación de las cargas de enfriamiento en una edificación, los métodos anteriores siguen siendo válidos para muchas aplicaciones, pero que por ser simplificaciones de los principios de balance térmico, su uso requiere de la experiencia del diseñador, para poder manejar situaciones atípicas o circunstancias inusuales.

El argumento mediante el cual ASHRAE propone estos nuevos métodos para sustituir a los anteriores es que dada la disponibilidad de cómputo actual, no se justifica el tener que trabajar con métodos restringidos, que fueron simplificados para poderse usar en procedimientos de cálculo manuales. Los nuevos métodos propuestos son por ello versiones completas, sin simplificaciones, y para aplicarse requieren de programas de cómputo especializados.

DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS Y PROBLEMÁTICA ENCONTRADA

En los párrafos siguientes se discute someramente las características y evolución de tres de los métodos de cálculo para edificaciones no habitacionales, ya definidos por ASHRAE como superados por los dos nuevos métodos propuestos en la última edición del Fundamentals, así como el método Residencial. De los nuevos métodos no es posible hablar todavía, ya que apenas recientemente fueron propuestos para su uso.

Función de Transferencia (TFM)

Este método está basado en la aplicación directa de la ecuación del calor unidimensional y para estados no permanentes:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

La cual es desarrollada en términos de diferencias finitas y luego resuelta en series de tiempo. Al aplicar lo anterior a cada elemento constructivo de una vivienda se obtienen funciones (series) que evalúan la respuesta térmica del edificio a los efectos externos, tomando en cuenta las características físicas del mismo.

Este método se consideró como el más robusto científicamente, y como el que mejor modela el proceso de absorción/liberación de calor en la masa del edificio, por ser el que más cercanamente se aproxima al concepto de balance térmico. Se le denominó el "Procedimiento de cálculo básico de ASHRAE" hasta la edición 1993 del Fundamentals.

Este método requiere, sin embargo, la utilización forzosa de computadoras, debido a la cantidad de información y de cálculos que involucra, y al tiempo de su introducción, en 1972, resultó de difícil utilización para la mayoría de los usuarios potenciales. En la actualidad, por el contrario, éste método es la base de algunos de los paquetes utilizados para la simulación dinámica del comportamiento térmico de edificios, tales como TRNSYS.

Diferencial total de temperatura equivalente / Promediado en el tiempo (TETD/TA)

Este método fue el primero en publicarse, en 1967. Está basado también en la ecuación del calor unidimensional para estados transitorios, resuelta en forma exacta mediante series de Fourier para elementos tipo pared compuesta. El proceso de cálculo es llevado a cabo manualmente, utilizando numerosas tablas de valores, calculados específicamente para un cierto número de elementos constructivos (paredes y techos) representativos. El método requiere además de un proceso iterativo para realizar el promediado en el tiempo, que es mediante el cual se obtiene el efecto de la inercia térmica del edificio, absorbiendo la carga térmica instantánea y liberándola posteriormente como carga de enfriamiento. El uso de éste procedimiento resultó ser muy tedioso, y limitado a la información contenida en tablas solo disponible para un cierto número de elementos constructivos. Si bien originalmente se pensó que este método se usaría en forma manual, con el tiempo se encontró que se requería el uso de computadoras para poderlo implementar, y además manejaba en forma un tanto subjetiva el concepto de almacenamiento térmico de la edificación, por lo cual solo diseñadores con experiencia podían utilizarlo con confianza. Por tal razón la edición de 1989 del ASHRAE Fundamentals ya había eliminado las tablas de datos para el uso del método TETD, sustituyéndolo con el nuevo CLTD. Sin embargo, luego de comprobar los resultados obtenidos mediante este nuevo método, y de tratar de generalizarlo, ASHRAE llegó a la conclusión que no debería utilizarse para edificaciones no habitacionales, como se explica en los siguientes párrafos. Al mismo tiempo se reconoció que el método TETD seguía siendo utilizado extensamente en la práctica por los diseñadores, quienes en general nunca habían adoptado los métodos TFM y CLTD. Todo esto motivó que el comité técnico de ASHRAE decidiera retomar el desarrollo del método TETD, actualizándolo e incluyéndolo nuevamente en el Fundamentals, ahora ya como una metodología computacional que utilizaría ecuaciones básicas y no valores tabulados precalculados (TC4.1, 1991).

Diferenciales de temperatura para carga de enfriamiento con factores de carga de enfriamiento solar (CLTD/CLF)

Este método surge como un intento de simplificar a las metodologías de doble paso (TFM y TETD/TA) mediante una técnica de paso simple que permitiera calcular la carga de enfriamiento directamente a partir de la información de diseño del inmueble. Se procedió a calcular las cargas de enfriamiento en una serie de elementos constructivos que se definió como representativos, utilizando el método TFM en toda su complejidad. Los resultados obtenidos fueron entonces divididos entre los valores correspondientes de coeficientes globales de transferencia de calor (U), y con ello se obtuvieron series de "constantes" que así podían utilizarse de forma más simple para el cálculo de cargas de enfriamiento en nuevas edificaciones. De forma similar se obtuvieron los Factores de Carga CLF a partir de resultados obtenidos para las cargas solares e internas. De tal forma se llegó a un procedimiento que permitiría duplicar los resultados de otros métodos mucho más complicados de manipular, como el TFM, mediante procedimientos manuales mucho más simples, y fue el método que se empezó a utilizar para enseñanza en las escuelas. Sin embargo, al tratar de extender el uso de este método a edificio con características diferentes a aquellas utilizadas para la su derivación, se encontró que los factores resultaban insospechadamente sensibles a otros parámetros que influenciaban el fenómeno. Después de investigar lo anterior y tratar de producir datos tabulares para nuevos elementos constructivos, ASHRAE llegó a la conclusión de que se

requeriría producir y manejar tal cantidad de información que el método resultaría inmanejable. Por ello se llegó a considerar recomendar abandonar totalmente esta metodología para el caso de edificaciones no residenciales.

Método Residencial (Vivienda habitacional)

Aproximadamente al mismo tiempo que se establecía el método CLTD/CLF, investigaciones adicionales de ASHRAE produjeron un procedimiento de cálculo para viviendas, denominado "Residencial". Este procedimiento es un subconjunto de la técnica CLTD/CLF. Se pudo comprobar que, para el caso de viviendas habitacionales este método si resultaba ser de utilidad y validez adecuadas, debido a la mucho menor variabilidad en cuanto a geometrías y materiales de construcción encontrados en tal tipo de edificaciones. Debido a lo anterior, el comité técnico de ASHRAE decidió retener el método CLTD/CLF para tres fines:

- Como base del método Residencial
- Como un método de cálculo viable y manual, para usuarios con aplicaciones limitadas a casos para los cuales tal método era adecuado
- Para utilizarlo como base de la enseñanza a nivel universitario

NORMA OFICIAL MEXICANA

La Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envoltorio de Edificios no Residenciales (SENER, 2001), fue desarrollada basándose en el concepto de temperaturas equivalentes, (TETD) y su aplicación requiere del uso de valores tabulados de temperaturas equivalentes promedio. La norma especifica valores de temperaturas equivalentes para las principales ciudades del país, para las cuatro orientaciones geográficas principales (N, E, S, O), y para muros "Masivos" y "Ligeros", lo cual implícitamente significa que solo se hace una estimación del flujo de calor bajo una cierta condición de diseño. Para su aplicación, la norma solo evalúa las cargas por conducción y por radiación solar, comparando las ganancias de calor del edificio proyectado contra las de un edificio de referencia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la actualidad, ASHRAE recomienda la utilización de los métodos HB y RTS para el cálculo de cargas de enfriamiento en edificaciones no habitacionales.

Para residencias habitacionales ASHRAE recomienda (en los EE.UU.) la utilización del método CLTD/CLF, y se previene que no deberá utilizarse en otro tipo de edificaciones

Dado lo específico de su utilización, restringido a cierto tipo de edificaciones, no resulta claro si tal técnica pueda utilizarse adecuadamente en México, debido a lo diferente que son los métodos constructivos en nuestro país, comparados con los utilizados en los EE.UU. Existe por ello la posibilidad de que en nuestro país fuese necesario utilizar los métodos HB o RTS aún para casas habitación.

Los nuevos métodos de cálculo, propuestos por ASHRAE, requieren forzosamente la utilización de programas de cómputo especializados, por lo cual resulta recomendable el que se incentive el desarrollo de paquetes de cómputo para la aplicación de las nuevas metodologías, adaptadas a las condiciones e idioma de nuestro país.

Si se va a seguir utilizando el método CLTD/CLF como base para la enseñanza a nivel universitario, se debería dar a los

alumnos una visión amplia de los diferentes métodos existentes, así como de sus limitaciones y rangos de aplicación, para evitar la utilización inadecuada de algunos de ellos. Se debería, sin embargo, tomar en cuenta la decisión de ASHRAE, basada en experiencia, y iniciar la adopción y adaptación de las nuevas metodologías de cálculo a las condiciones de México.

La Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001 está basada en la metodología TETD, que es la más antigua en uso pero también la más utilizada hasta la fecha, simplificada y adecuada a las condiciones de México. A la luz de la disponibilidad de nuevas metodologías, resultaría conveniente el evaluar si es justificable llevar a cabo una revisión de la metodología de cálculo en que se basa la Norma, para incrementar la confiabilidad de sus predicciones.

BIBLIOGRAFÍA

- ASHRAE. (1993) 1993 ASHRAE Handbook Fundamentals I-P Edition. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- ASHRAE (2001) 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals SI Edition. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA
- Comité Técnico 4.1 (TC4.1) (1991) Supplement to Principles of HVAC. (Sauer y Howell 1990). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA
- Kreider, J.F. Curtiss, P.S. Rabl, A. (2002) Heating and cooling of buildings. Design for efficiency. 2nd Edition McGraw-Hill
- McQuiston, F.C. Parker, J.D. (1977) Heating, ventilating and air conditioning analysis and design. 4th Edition. John Wiley
- Sauer, H.J. Howell, R.H. (1990) Principles of heating ventilating and air conditioning. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA
- SENER (2001) NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envoltorio de edificios no residenciales. Secretaría de Energía. Diario Oficial de la Federación. Miércoles 25 de Abril

Semana Nacional de Energía



Solar

Xone' echoa



OAXACA




XXXVIII
SNES

Jointly with the
October 4-8, 2004


SolarPACES
12th International Symposium
Solar Power and Chemical Energy Systems



XXVIII SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR



Oaxaca, Oaxaca



4 al 8 de Octubre de 2004

MEMORIA



Asociación Nacional de Energía Solar, A.C.