

Evaluación de la climatización en locales comerciales, integrando técnicas de termografía, simulación y modelado por Elementos Finitos. Caso Tienda Caracol

José Alejandro Madrigal Monzón¹, Augusto Sanchez Cifuentes¹, Mario Jesús Espín Pérez², Juan José Cabello Eras³

Resumen

En el trabajo se integran técnicas utilizadas para analizar problemas asociados a la climatización que por sí solas no son capaces de evaluar todo un sistema de acondicionamiento de aire. Se utiliza la termografía para obtener el perfil de temperatura en el área de incidencia del aire climatizado y los focos calientes en el interior del local. Mediante la simulación con el software Trnsys se obtiene el comportamiento de la temperatura interior y se estima el perfil de carga térmica. Con el diseño asistido por computador se crea un modelo espacial de la zona térmica y con el Método de los Elementos Finitos (MEF) se modela la circulación del aire y la distribución de la temperatura en el espacio. Finalmente se propone un nuevo esquema para el sistema de frío a partir de los resultados obtenidos con las herramientas anteriores.

Palabras clave: Termografía; sistema de climatización; carga térmica.

¹Facultad de Ingeniería. Departamento Proceso y Uso Eficiente de Energía. Universidad Nacional autónoma de México(UNAM).México. e-mail: jamadrigal1988@gmail.com

²COMINSA. México.e-mail:mjeperez@gmail.com

³ Centro Estudios Energía y Medio Ambiente.(CEEMA).Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez.Cuba.e-mail.jjcabe2013@gmail.com

Evaluation of air conditioning in commercial buildings, integrating thermography techniques, simulation and modeling Finite Element. Case Snail Shop

Abstract

At work are integrated techniques used to analyze problems associated with the climate which alone are unable to assess an entire air conditioning system. Thermography is used to obtain the temperature profile in the area of incidence of conditioned air and the hot spots inside the premises. By simulating the behavior of software Trnsys indoor temperature is obtained and the thermal load profile is estimated. With computer aided design a spatial model of the thermal zone is created and the finite element method (FEM) air flow and temperature distribution in space is modeled. Finally a new scheme for the cooling system is proposed based on the results obtained with previous tools.

Keywords: thermography; air-conditioning system; thermal load.

Introducción

Los locales comerciales son los encargados de proveer a través de su actividad económica las necesidades de productos y servicios básicos de la población. Para alcanzar el bienestar térmico y la satisfacción de los clientes así como la conservación de los productos comerciales es necesario acondicionar el ambiente en el interior del local comercial.

En Cuba la temperatura media anual es de 25 °C y en verano los extremos de calor promedian los 27.5 °C con una humedad relativa del 80%. Las características mencionadas hacen de Cuba un país tropical donde el enfriamiento con deshumidificación como proceso para acondicionar el aire en el interior de locales se presenta como una necesidad siempre que se quiera cumplir con el criterio de confort térmico.

Los estándares presentados por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) describen el confort térmico cualitativamente como la condición mental que expresa satisfacción con la temperatura en el alrededor (ASHRAE, 1997). Establecer un valor de confort óptimo para locales comerciales se presenta complejo por cuanto este valor se puede desplazar según sea el microclima del lugar, usos y costumbres, estilo de vida, edad o constitución física de las personas. Asumir el valor recomendado según los estándares internacionales aunque se presenta como una vía fácil de aplicar no se considera recomendable para generalizar ya que estos responden a criterios de regiones acostumbradas al uso de medios de climatización artificial y generalmente países desarrollados (Ramos, 2012). Para el caso de nuestro estudio se utilizará 24 °C como valor límite de confort.

En Cuba abundan los locales comerciales de pequeña dimensión donde se utilizan fundamentalmente los minisplits para acondicionar el aire en el interior. Durante la etapa de diseño del sistema de climatización se tienen en cuenta las características constructivas del local, el servicio que se va a prestar, la ocupación, la ubicación geográfica y otras importantes consideraciones (ASHRAE, 1989),(ASHRAE, 1997), sin embargo, para este tipo de tiendas con pequeñas dimensiones el criterio económico es el factor determinante en la selección del sistema de climatización. En Cuba, las empresas encargadas de la instalación de los sistemas de climatización solo determinan la carga

térmica puntual en un día cualquiera del año y seleccionan un esquema de clima que supere dicho valor desatendiendo así la variabilidad que tiene el clima en las diferentes épocas del año.

En cualquier aplicación los sistemas de acondicionamiento de aire representan un alto costo dentro de la estructura de gastos (Rodríguez, 2009) (Leyat Fernández Velazquez, 2014) (Osmel Cabrera Gorrín, 2004), por lo cual se requiere de técnicas que permitan evaluar cuantitativamente y cualitativamente los sistemas que están en funcionamiento. Cualquier mejora en el sistema de climatización puede ser traducida en ahorros monetarios a la a la empresa y en mejoras de confort para los usuarios.

Se presenta como **objetivo principal** de nuestra investigación el uso integrado de la simulación de cargas térmicas mediante el software Trnsys, la termografía como técnica para ver la incidencia del aire frío y los puntos calientes y el método de los elementos finitos para evaluar la distribución volumétrica del aire frío en el interior del local y la circulación del mismo. Mediante los resultados arrojados por cada una se pretende demostrar las dificultades existentes en un sistema de climatización, así como una propuesta de mejora.

Metodología.

La simulación de cargas térmicas mediante el uso del software Trnsys es uno de los recursos disponibles más expandidos para la determinación de cargas térmicas tal como usan (F. Oldewurtel, Jun. 2010) (S.Privara, 2013) (Vehelts, 2012) (Boris. G Vega Lara, 2015) en sus estudios. El objetivo fundamental de la simulación térmica en una instalación es obtener un modelo dinámico de algunas variables del sistema (carga térmica, temperatura interior, humedad relativa, coeficientes de transferencia de calor, entre otras). Según experiencia de otros autores (Boris. G Vega Lara, 2015) que utilizan esta herramienta para la simulación en edificaciones, los procesos de transferencia de calor pueden ser analizados como problemas transitorios, o sea, fenómenos que cambian constantemente en el tiempo independientemente de su mecanismo y su magnitud.

Con la simulación a través del software Trnsys podemos obtener un perfil de temperatura variable en el tiempo, sin embargo es imposible obtener un perfil de distribución volumétrica de la temperatura operativa en el interior y las zonas muertas donde se puede ver afectado el confort térmico de las personas

La inspección térmica de una instalación basada en el uso de la termografía ofrece la posibilidad de realizar un análisis no invasivo donde se pueden obtener variables determinantes en la carga térmica del local como: focos calientes puntuales, distribución de temperaturas superficiales, infiltraciones de calor e incidencia de las venas de aire frío proveniente del sistema de acondicionamiento del aire.

La cámara utilizada fue la Testo 875, en la tabla 1 se muestran las especificaciones técnicas de la misma.

Tabla 1 Datos técnicos de la cámara infrarroja Testo 875

Propiedad	Valores
Sensibilidad térmica	<80 mK a 30°C
Tipo de detector	FPA 160 x 120 píxeles, a-Si

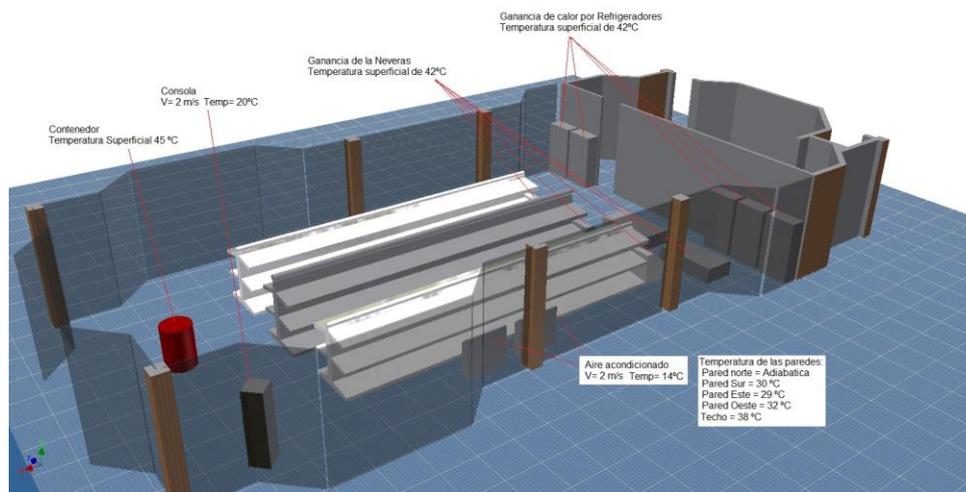
Rango temperatura	De -20 a 100 °C/de 0 a 280 °C
exactitud	±2 °C
Ajuste del grado de emisividad	De 0,01 a 1,00

A pesar de las potencialidades ofrecidas por la cámara, la termografía por sí sola no es una herramienta que permita caracterizar un sistema de climatización, por lo que es necesario el uso de otras herramientas que analicen la información recogida en las imágenes térmicas.

A través del diseño asistido por ordenador (CAD por sus siglas en inglés) se crea un modelo tridimensional de la zona térmica (figura 1), que representa el esquema de análisis al cual se introducen parámetros del sistema de clima obtenidos con las herramientas anteriores y valores reales de velocidad y temperatura obtenidos a través de mediciones efectuadas in situ.

El MEF es la herramienta usada para solucionar los problemas asociados a la mecánica de los fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), siendo capaz de ofrecer un perfil de temperatura en función del espacio y del tiempo, o sea, realizar análisis en régimen estacionario y transitorio.

Figura 1. Modelo tridimensional del mercado.



Fuente: Figura realizada por el autor

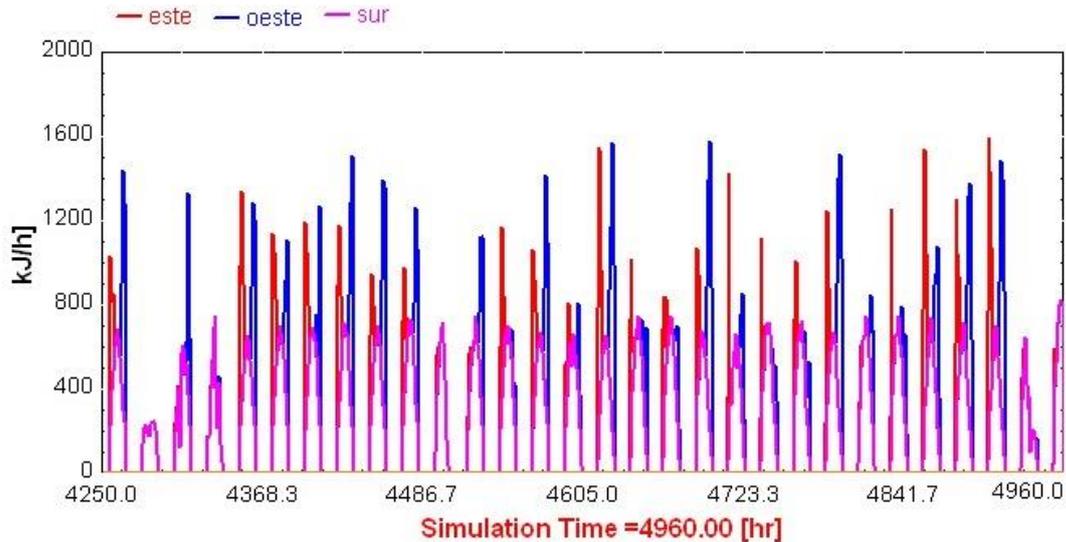
El centro comercial de estudio se encuentra ubicado en la provincia de Cienfuegos, Cuba. Este presenta como rasgo distintivo la gran área acristalada que posee, llegando a representar la misma alrededor del 90% de su superficie lateral total. Como consecuencia de la arquitectura del local es necesario un uso intensivo de la climatización y por tal un consumo elevado de energía eléctrica para satisfacer este servicio que llega a alcanzar hasta el 62% del consumo total de la entidad.

El mercado está ubicado hacia el norte cardinal, con la puerta de acceso hacia el sur. Las paredes este y oeste son las de mayor área y el cristal en las mismas representa el 94 % del área total. El recinto cuenta con un volumen de 550 m³ y un régimen de trabajo diario de 10 horas.

Para la modelación se tomaron 10 renovaciones del aire por hora según las recomendaciones de la ASHRAE y un cristal doble transparente con un espesor de 8mm. La humedad relativa promedio de la

zona donde se encuentra enclavada el centro comercial es de 82% como promedio anual, la temperatura es 32°C en verano y 27 °C en invierno como promedio. En la figura 2 se muestra la distribución de la radiación solar por las diferentes paredes del local comercial en el mes de Junio, siendo la pared oeste la que más radiación recibe. Los valores de temperatura, radiación y humedad utilizados para la simulación fueron los que ofrece el software Trnsys en la Ciudad de la Habana ya que no se contaba con los datos de la provincia analizada.

Figura 2. Distribución radiación solar por las paredes del local.



Fuente: Figura obtenida por el autor con el software Trnsys

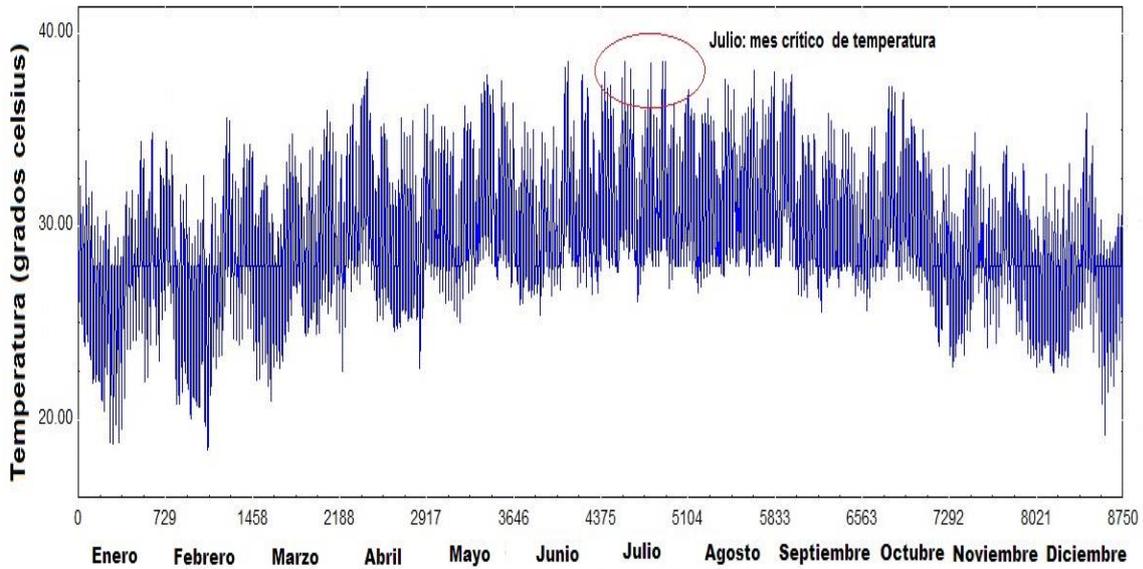
Resultados

El local cuenta con una capacidad instalada de 15 52.7kW de refrigeración suministradas por tres minisplits de 5 toneladas de refrigeración cada uno. Al realizar una revisión en la velocidad y temperatura del aire a la salida de los equipos se observó que uno de los tres equipos presentaba problemas con la temperatura de salida y sólo funcionaba como ventilador. Tal situación provocaba que la potencia de frío real instalada fuera de 35 kW.

Para obtener un modelo dinámico del comportamiento de la temperatura en el interior del local se utilizó el software TRNSYS, el mismo utiliza variables determinantes en el comportamiento de los sistemas de climatización: esquema constructivo del local, nivel de infiltraciones, ganancias de calor, materiales de las paredes y ventanas, ventilación y variables meteorológicas de la provincia en un año típico.

Al realizar una simulación inicial, podemos ver el principal problema de la tienda: las temperaturas en el interior del local son muy elevadas. En el mes de julio se reportan la mayor cantidad de días por encima de 33 °C (figura 3).

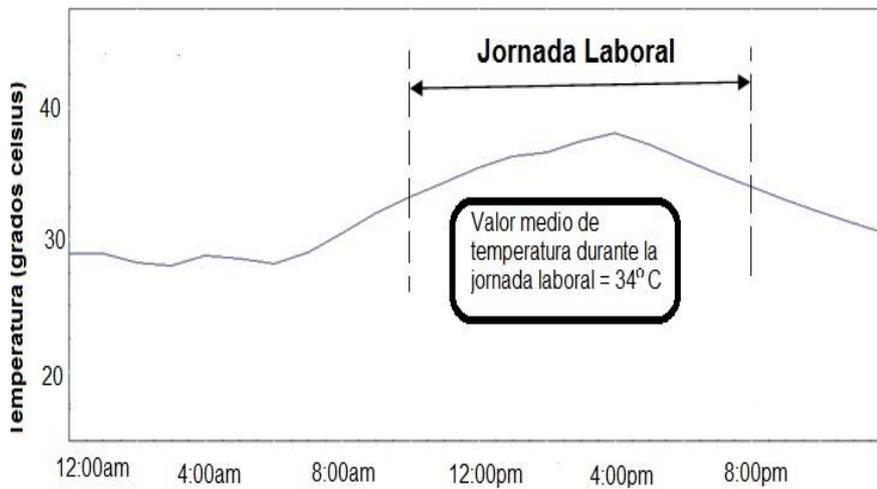
Figura 3. Comportamiento anual de la temperatura en el interior del local.



Fuente: Figura obtenida por el autor con el software Trnsys

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la temperatura en el interior del local durante 24 horas el 23 de Junio, en la misma se observa el proceso de acumulación de calor que se produce hasta alcanzar un valor tope de 36 °C y un promedio en la jornada laboral de 34 °C.

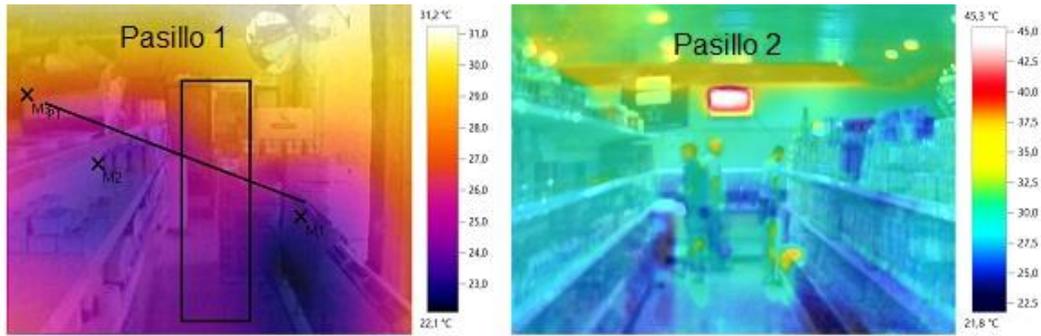
Figura 4. Comportamiento de la temperatura en el interior del local el día crítico.



Fuente: Figura obtenida por el autor con el software Trnsys

Durante el estudio termográfico realizado se evidenció la no existencia de homogeneidad en la distribución del aire climatizado, lo cual se puede observar con las notables diferencias en la distribución superficial de temperatura. En la figura 5 se puede observar como en el pasillo 1 los minisplits impulsan directamente el aire frío hacia el estante, provocando como resultado una obstaculización del fluido e impidiendo la correcta circulación en el interior del local. En el pasillo 2 se observa claramente la zona de circulación y el área de incidencia del aire.

Figura 5. Imagen termográfica en los pasillos interiores del local.



Fuente: Imágenes obtenida por el autor con la cámara termográfica.

Con el uso de la técnica termográfica se determinaron los puntos calientes y las infiltraciones presentes en el local. En la figura 6 se puede observar el calor que se infiltra por el acceso principal, en el techo y la fuente de calor que representa cada uno de los compresores de las máquinas de refrigeración.

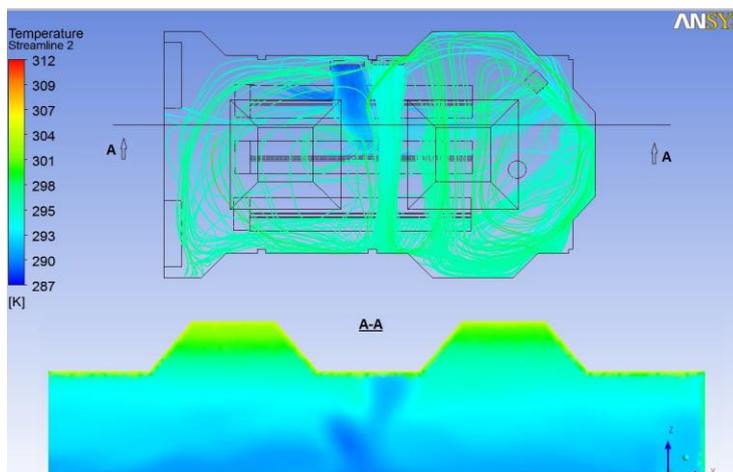
Figura 6. Infiltraciones y focos calientes.



Fuente: Imágenes obtenidas por el autor con la cámara termográfica.

Para el caso de estudio nos basamos en un análisis estacionario debido a que el interés era observar la circulación de las venas de aire frío en el interior del local y la influencia de las distintas ubicaciones de las unidades terminales de impulsión. Una vez construido el modelo (figura1) y utilizando como fronteras las paredes exteriores del local donde no existen grandes sombras, se utilizaron variables obtenidas con las herramientas anteriores: temperatura de salida del aire frío, velocidad del fluido y fuentes internas de calor y se simuló la circulación del aire y la temperatura volumétrica del local como se muestra en la figura 7.

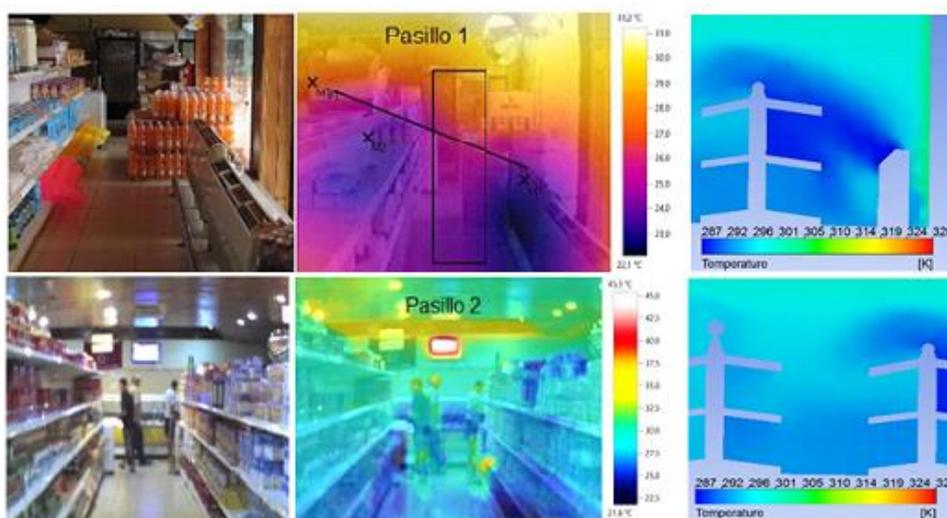
Figura 7. Resultados de la simulación con el MEF.



Fuente: Imágenes obtenidas por el autor con el software Ansys.

Como se aprecia en la imagen anterior la circulación del aire no es adecuada puesto que los estantes obstaculizan el movimiento de las venas de aire frío y no permiten que estas se adentren lo suficiente en el local como para mezclarse con el aire caliente. Tal situación provoca que la distribución de temperatura en el pasillo 2 no se comporte de manera homogénea, con zonas donde la temperatura está alrededor de los 22 °C y otras donde los valores de temperatura están alrededor de los 30°C .En la figura 8 se muestra una comparación de los resultados obtenidos con la termografía y la modelación de la distribución de temperatura con el método de los elementos finitos. Las imágenes de los pasillos 1 y 2 en la tienda muestran la correspondencia existente entre ambas herramientas.

Figura 8. Imágenes real, termográfica y con el método de los elementos finitos de los pasillos 1 y 2.



Fuente: Imágenes obtenidas por el autor.

Al validar la no existencia de condiciones térmicas de confort en el interior del local debido a la incorrecta ubicación de las UTIs y una probable insuficiente carga de refrigeración instalada, se

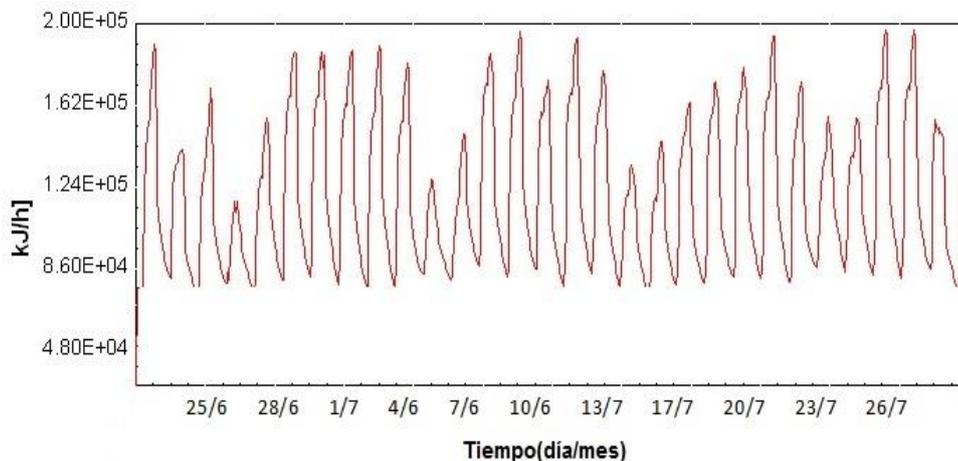
determina la potencia de climatización necesaria para satisfacer las necesidades de frío y se propone un nuevo esquema para el sistema de distribución del aire climatizado.

Para determinar la potencia de frío a instalar mediante Trnsys, se fijó un valor esperado de 24 °C en el interior del local y se simuló el comportamiento de la carga térmica durante la etapa comprendida entre los últimos días de junio y el mes de julio, pues durante este tiempo se habían reportado anteriormente la mayor cantidad y mayores valores de temperatura. Un sistema de climatización que supere la demanda térmica para el período anterior garantiza valores de temperatura dentro del rango de confort, aunque introduce un cierto grado de sobredimensionamiento durante los meses de invierno.

Algunas de las variables más importantes en nuestro modelo que se tuvieron en cuenta para la simulación con el software Trnsys fueron: presencia de 20 personas en el interior del local realizando la actividad comercial, existencia de 10 fuentes de calor internas con régimen de trabajo continuo (correspondientes a los compresores de las máquinas de refrigeración) y la ubicación de una cortina de viento en el acceso principal de manera tal que se disminuyera el valor de las infiltraciones de calor.

Para obtener 24 °C en el interior del local según los resultados del software Transys y con las condiciones descritas anteriormente se necesita vencer una carga térmica máxima de 197 000 kJ/h (figura 9), lo cual equivale a un sistema de clima con una potencia instalada de 16 toneladas de refrigeración (56.2kW).

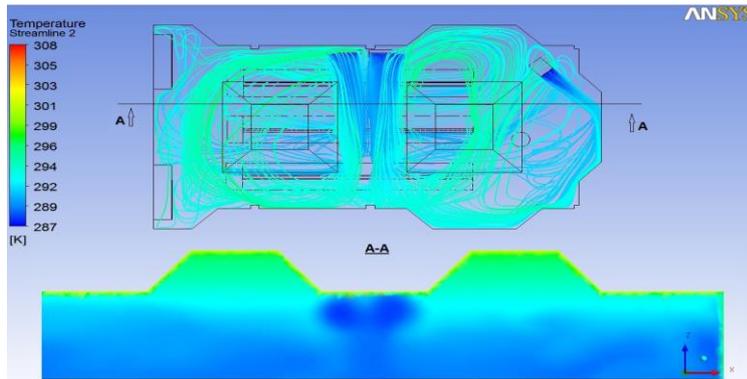
Figura 9. Simulación de la carga térmica en el interior del local.



Fuente: Figura obtenida por el autor con el software Trnsys.

La recomendación realizada al centro comercial fue la instalación de una capacidad de 20 toneladas de refrigeración (70.3kW) distribuidas en 4 minisplits de 5 toneladas cada uno. Aunque se conoce que según el criterio utilizado se introduce un elevado grado de sobredimensionamiento los meses de invierno, esta decisión está respaldada por la creciente tendencia en los últimos años al aumento de la temperatura global y una el posible régimen de trabajo alterno de los equipos que permitan un adecuado plan de mantenimiento sin tener que afectar el confort térmico en la instalación. Una prueba realizada antes de proponer un nuevo esquema para el sistema de clima fue observar que pasaría con la circulación del aire y la distribución de temperatura en el pasillo principal si los equipos se mantuvieran en la posición actual aunque con una mayor potencia de frío.

Figura 10. Circulación del aire y distribución de temperatura en el pasillo.

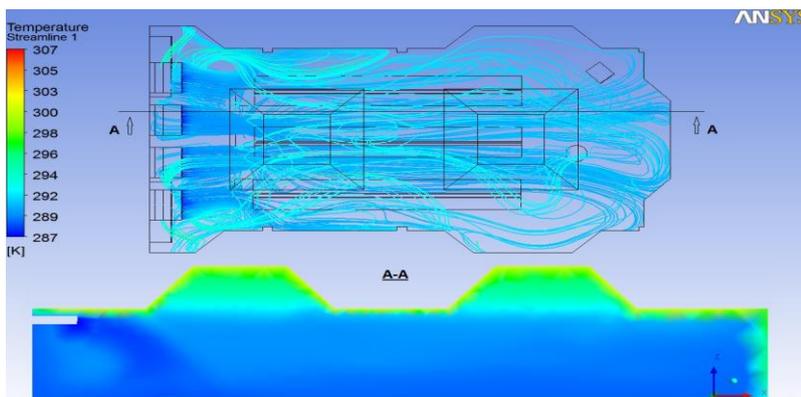


Fuente: Figura obtenida por el autor con el software Ansys.

En la figura 10 se puede observar que los resultados obtenidos son mejores que la situación actual que presenta la tienda aunque se observa una distribución no homogénea de la temperatura a lo largo de todo el pasillo. Existen 5°C de diferencia entre la zona de circulación del aire climatizado y otros puntos ubicados en el mismo pasillo. Tales resultados muestran la necesidad de una nueva ubicación para las unidades de terminales de impulsión.

Dado que el tipo de vena de aire que impulsan estos equipos es horizontal y no isoterma se decidió que la disposición de los equipos fuera transversal a los obstáculos con la circulación del aire paralela a los estantes, de esta manera la vena de aire frío impulsada no es obstaculizada y puede adentrarse lo suficiente en local para que ocurra una buena mezcla. La pared interior propuesta para ubicar los equipos es la norte, a 0.2 metros del techo y con el fluido circulando directamente hacia los pasillos. De esta manera se garantiza un mayor alcance del aire frío, mejor mezcla y se eliminan las zonas muertas en la circulación. En la figura 11 se muestra la circulación del aire frío en el interior del local y la distribución de temperatura espacial del pasillo principal según los resultados obtenidos con el MEF.

Figura 11: Nuevo esquema del sistema de climatización y distribución de temperatura en el pasillo.



Fuente: Figura obtenida por el autor con el software Ansys.

El nuevo esquema muestra un comportamiento homogéneo de la temperatura a lo largo del plano vertical del pasillo principal, sin grandes diferencias térmicas y con valores de temperaturas dentro de los parámetros de confort esperados.

Conclusiones

No es posible utilizar la técnica termografía, la simulación con el software Trnsys o la modelación con el MEF como herramientas individuales para caracterizar un sistema de climatización. Para la simulación de cargas térmicas se necesitan los puntos calientes y las infiltraciones obtenidas con la termografía, así como para la modelación del aire en el interior del local con el MEF se necesita la termografía para validar los resultados.

En el caso de estudio es insuficiente la capacidad de frío instalada para satisfacer las necesidades de confort en el interior del local, lo cual se observa con las altas temperaturas operativas obtenidas a partir de la simulación realizada con el software Trnsys en las condiciones actuales.

El sistema instalado posee una mala ubicación, el aire frío no es capaz de adentrarse lo suficiente en el local pues la vena de aire es obstaculizada por los estantes, como se puede observar en las imágenes termográficas. Los resultados obtenidos con las imágenes termográficas y la modelación con el MEF demostraron que es inadecuada la ubicación de las unidades terminales de impulsión. Para satisfacer las condiciones térmicas de confort en el caso de estudio es necesario instalar 20 toneladas de refrigeración(70.3kW) distribuidas en cuatro equipos de 5 toneladas de refrigeración cada uno, los que deben ser ubicados a 0.2 metros del techo y dirigiendo la vena de aire hacia los pasillos.

Bibliografía

ASHRAE. (1997). HVAC Applications.Termal Confort.

Boris. G Vega Lara, L. M. (2015). Modeling and identification of the cooling dynamics of a tropical island hotel. Energy and Buildings, 92, 19-28. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815000432>

Busch, J. F. (12 de 1992). Tale of two populations:thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. Energy and Buildings, 235-249. Obtenido de http://www.researchgate.net/publication/223558787_Tale_of_two_populations_thermal_comfort_in_air-conditioned_and_naturally_ventilated_offices_in_Thailand

F. Oldewurtel, A. P. (Jun. 2010). Energy efficient building climate control using stochastic predictive control and weather predictions. American Control Conference(ACC), (págs. 5100-5105). Baltimore. Obtenido de http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5530680&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5530680

Leyat fernández Velazquez, t. C. (2014). Aplicación de Gestión Total Eficiente de Energía en el Centro Internacional de Salud “La Pradera”. Ingeniería Energética, 35(2), 112-121. Obtenido de <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/395>

Osmel Cabrera Gorrín, A. B. (2004). Evaluación del indicador kWh/HDO de eficiencia eléctrica en instalaciones hoteleras. Retos turísticos, 38-41. Obtenido de <http://biblat.unam.mx/es/revista/retos-turisticos/articulo/evaluacion-del-indicador-kwhhdo-de-eficiencia-electrica-en-instalaciones-hoteleras-cubanas>

- Ramos, M. C. (2012). Determinación de estándares de confort térmico para personas que habitan en clima tropical sub-húmedo. IX Maestría en Energía Renovable.Arquitectura y Urbanismo.La Ciudad Sostenible., Universidad Internacional de Andalucía, Andalucía. Obtenido de http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/1697/0241_Covarrubias.pdf?sequence=1
- Rodríguez, H. (2009). Caracterización del consumo de energía final en los sectores terciarios,grandes establecimientos comerciales,centros comerciales. Conferencia presentada en Asprea, Bogotá. Obtenido de http://www.asprea.org/Pres_ASPREA%20h-rodriguez.pdf
- S. Privara, J. S. (2011). Model predictive control of a building heating system: The first experience. *Energy and Buildings*, 43, 564-572. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810003749>
- S.Privara, J. C. (2013). Building modeling as a crucial part for building predictive control. *Energy and Buildings*, 56, 8-22. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005336>
- Vehelts, C. (2012). Model Predictive Control of Ground Coupled Heat Pump Systems for Office Buildings. Ph.D. Dissertation presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Engineering, Catholic University of Leuven, Belgica. Obtenido de https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/342642/1/PhD_CVerhelst.pdf

Autores.

José Alejandro Madrigal Monzón. Ingeniero Mecánico. Profesor del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos, Cuba (2013-2015). Actualmente estudiante de Maestría de Ingeniería en Energía en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y becario de CONACYT.e-mail: jamadrigal1988@gmail.com

Augusto Sánchez Cifuentes. Máster en Ciencias.Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y jefe del Departamento de Eficiencia Energética. .e-mail:augsan@unam.mx

*Mario Jesús Espín Pérez.*Ingeniero Mecánico.Estudiante de maestría en Cominsa, México.e-mail:mjeperez@gmail.com

Juan José Cabello Eras. Doctor en Ciencias.Profesor de la Universidad de Cienfuegos y jefe del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente(CEEMA).e-mail: jjcabe2013@gmail.com