Estimating and decoupling the Heat Loss Coefficient of in-use buildings into its Transmission (UA) and Infiltration and/or Ventilation (C_v) heat loss coefficients through basic monitoring and modelling

Hoy en día, existe una gran diferencia a la hora de comparar el valor de consumo energético real con el del diseño en los edificios. El rendimiento energético real del edificio depende esencialmente del comportamiento de los ocupantes del edificio, el rendimiento real de los sistemas de energía instalados en el edificio y el rendimiento de la envolvente en uso del edificio. Sin embargo, el rendimiento de la envolvente en uso del edificio es uno de los factores que más afecta a la diferencia del consumo energético en los edificios. Esta diferencia es comúnmente conocida como brecha de rendimiento (o performance gap). El indicador de rendimiento principal para analizar esta brecha en las envolventes de los edificios es el coeficiente de pérdida de calor (Heat Loss Coefficient, HLC). No obstante, es bastante común que el valor medido de este coeficiente difiera considerablemente respecto a su valor de diseño. Por lo tanto, esta investigación va más allá y propone un método basado en datos de un edificio monitorizado en uso. Mediante este método, se podrá llevar a cabo la estimación del HLC de edificios en uso y el desacoplamiento del mismo en su coeficiente de perdida de calor, bien por transmisión (UA), como por infiltración y/o ventilación (C_v). Así, se podrá identificar el origen de las pérdidas de calor, y, en consecuencia, se facilitará la comprensión de la brecha de rendimiento.

A pesar de que existen algunos trabajos de investigación que estiman el HLC de edificios monitorizados en uso mediante diferentes métodos, no se puede determinar que ninguno de ellos sea un método general. De los métodos utilizados para estimar el coeficiente de perdida de calor de la envolvente de los edificios, el co-heating es el más común. Sin embargo, este método no está preparado para trabajar en edificios en uso. También existen varios métodos basados en técnicas avanzadas de modelado matemático, como los modelos de caja gris o los modelos autorregresivos de media móvil (ARMAX). No obstante, estos métodos tienden a trabajar con modelos complejo, lo cual puede complicar considerablemente la estimación del HLC. Por lo tanto, debido a su simplicidad y su aplicabilidad sin la necesidad de un sistema de monitorización extenso y un conocimiento previo de técnicas matemáticas avanzadas, esta Tesis adapta, de la forma más fiable y exacta posible, el método promedio ya existente, para la

estimación del HLC en edificios en uso. Con el fin de comprender los límites del método cuando se aplica a edificios en uso, el trabajo desarrolla la demostración matemática a partir de la ecuación de la conservación de la energía. Todos los criterios de selección del período establecidos, con el objetivo de minimizar la incertidumbre de la estimación del HLC, usando el método promedio, han sido definidos detalladamente a lo largo del trabajo. Las fuentes de incertidumbre que principalmente afectan el valor del HLC en edificios en uso son los siguientes: el efecto de generación de calor metabólico, el efecto de datos meteorológicos, el efecto de acumulación de calor en el edificio, el efecto de la uniformidad de la temperatura interior del edificio, el efecto de la temperatura del suelo y el efecto de ganancias solares dentro del edificio. Por lo tanto, con el fin de considerar el efecto de todas estas fuentes de incertidumbre en el valor final del HLC, el método ha establecido varios requisitos durante su desarrollo. Además, es necesario comentar que este método no requiere la construcción de un modelo físico detallado del edificio para estimar el HLC en uso. Por lo tanto, podría usarse dentro de la programación del Sistema de Gestión de Edificios de manera general, con la única necesidad de ser alimentada por el área total de las ventanas, los datos de ocupación y los datos de monitorización de energía del edificio. Esta primera parte de la Tesis también se centra en la innovadora demostración de las propiedades de suma de los valores de HLC, cuando estos se estiman piso por piso. Por lo tanto, con el fin de demostrar las propiedades de suma del HLC, la Tesis presenta un edificio multizona donde se analizan detalladamente todos los intercambios de calor y masa que ocurren entre las zonas o volúmenes, así como con los alrededores adyacentes. Por último, es necesario considerar que la estimación fiable del HLC en un edificio en uso debe poder realizarse mediante el análisis de los valores proporcionados por sistema de monitorización del edificio. Dentro de este sistema de monitorización es necesario medir variables como las temperaturas interiores y exteriores, las entradas de energía del sistema de calefacción al edificio, el consumo de electricidad del edificio y los datos meteorológicos.

Además, a pesar de que el método promedio presentado en la Tesis se ha desarrollado basándose en un edificio de oficinas en uso que cuenta con varias plantas, la Tesis también estudia la aplicación del método para otros casos de estudio. Durante las Tesis, se estudia la aplicabilidad del método para tres casos de estudio diferentes: una caja simple de prueba, dos edificios residenciales en uso y un edificio de oficinas ocupado antes y después de su rehabilitación. El primer caso de estudio se basa en analizar una caja simple llamada “Round Robin Box”, la cual es una caja experimental ampliamente monitorizada que representa un

edificio a pequeña escala. En cambio, el segundo caso de estudio considera dos edificios residenciales en uso, siendo uno de ellos un edificio muy bien aislado, y el otro, un edificio mal aislado. El último edificio analizado es un edificio de oficinas rehabilitado y ocupado, donde se analizan tanto los datos de antes como de después de su rehabilitación. Dado que cada caso de estudio presenta características y comportamientos completamente diferentes, y teniendo en cuenta que el método promedio ha sido desarrollado para un edificio de oficinas en uso, la Tesis presenta una serie de amplios resultados que conllevan a unas conclusiones muy interesantes.

Como ya se ha comentado anteriormente, el método promedio desarrollado estudia y limita una amplia gama de fuentes de incertidumbre. Dentro de estas fuentes de incertidumbre, se ha considerado la limitación del efecto de las ganancias solares a través de las ventanas. Sin embargo, el efecto que tienen las ganancias solares a través de las paredes opacas en el valor de HLC en los edificios en uso se ignora por completo. Desafortunadamente, el no considerar las ganancias solares a través de paredes opacas, podría proporcionar un valor subestimado del HLC para algunos métodos. Por lo tanto, la segunda parte de la Tesis propone un método experimental para el análisis del efecto de la radiación solar que afecta a cada una de las caras opacas de la caja Round Robin. Este estudio se basa en el análisis del flujo de calor de la superficie interior, mediante el uso de datos medidos. Para ello, se estudia individualmente cada una de las caras opacas de la caja, analizando así, cómo la respectiva radiación solar afecta cada una de las mediaciones de flujo de calor de la superficie interior. Debido a la amplia monitorización de la caja, se ha obtenido un detallado conjunto de datos para cada una de las caras de las paredes opacas de la misma. Además, aparte del flujo de calor de la superficie interior y de la radiación solar, también se midieron variables como la velocidad del viento y la radiación de onda larga. La medición de estas variables ha ayudado considerablemente a aumentar la precisión de los modelos. Por si fuera poco, también se proporciona una amplia información sobre las características térmicas teóricas de las capas de la envolvente de la caja. Esto último facilita el desarrollo de un análisis teórico muy exhaustivo de la envolvente de la caja Round Robin. Una vez que se ha cuantificado el efecto de la radiación solar en el flujo de calor de la superficie interior de cada cara de la envolvente, es posible relacionar el método con la estimación del valor de HLC en edificios en uso. En otras palabras, el análisis se desarrolla aún más para estimar cómo la radiación solar a través de caras opacas afecta el valor de HLC cuando se aplican métodos donde no se utiliza un valor de ganancia solar constante identificable, como ocurre en el método promedio desarrollado en esta Tesis.

Por lo tanto, el objetivo de esta segunda parte de la Tesis, es estudiar el peso que tiene la radiación solar sobre el flujo de calor de la superficie interior que atraviesa las paredes opacas de la caja Round Robin, utilizando datos medidos in situ. Una vez este peso haya sido estimado, es posible trasmitirlo a la estimación del HLC en métodos donde no se consideran las ganancias solares a través de paredes opacas, como el método promedio desarrollado a lo largo de la Tesis. Este análisis permite analizar y estimar el bloqueo creado por la radiación solar en las paredes opacas. De esta forma, a partir de varios modelos resistencia-capacitancia creados en el software LORD, se ha podido llevar a cabo la estimación de los modelos más representativos. Para ello, se han propuesto una serie de modelos formados por diferentes combinaciones de variables. Estos modelos consideran varios fenómenos físicos en detalle. Así, los modelos serán capaces de estimar los parámetros físicos reales, y, por lo tanto, se podrán comparar con los valores físicos teóricos del edificio. De esta forma, es posible analizar cuál de los modelos se acerca más a la realidad. A parte de los valores físicos del edificio, también se analizan los residuos de los modelos. Una vez encontrados los modelos que mejor se ajustan, estos modelos se seleccionarán. Así, será posible eliminar el efecto de la radiación solar de estos, y, de esta forma, estimar el peso real que esta radiación tiene en el flujo de calor de la superficie interna. Una vez cuantificado este peso, también es posible cuantificar el peso porcentual que tendría la radiación solar a través de paredes opacas con respecto a la estimación de HLC (cuando este se estima mediante métodos sin un valor identificable y constante de la ganancia solar). Por último, también se ha estimado el factor solar (valor g) constante para cada una de las paredes de la caja Round Robin, por un lado, matemáticamente, utilizando la diferencia entre los dos flujos de calor estimados para la superficie interna (con y sin radiación solar) y, obteniendo el valor directamente desde el software LORD.

Por último, hay que añadir que este análisis del efecto de la radiación solar a través las paredes opacas se ha llevado acabo utilizando dos periodos de datos diferentes, un periodo de invierno y otro de verano, con el fin de ver considerables diferencias entre los resultados. Durante el análisis de los datos de invierno solo se han considerado los días más nublados y fríos. Mediante el análisis de este periodo, es posible estimar el peso porcentual que tendría la radiación solar a través de paredes opacas con respecto al HLC cuando este se estima utilizando el método promedio desarrollado en este trabajo. Debido a que durante el desarrollo del método promedio ya se ha establecido un requisito para limitar las ganancias solares que entran a través de las ventanas, se puede asumir que este mismo requisito también limitaría el efecto de las

ganancias solares a través de las paredes opacas. Por lo tanto, también podría suponerse que, el efecto de las ganancias solares a través de las paredes opacas, no tendrían un efecto considerable en la incertidumbre del valor HLC. De esta forma, este trabajo demostrará su insignificancia. No obstante, los resultados serán diferentes a la hora de analizar el periodo estival. En este caso, el peso porcentual que tendría la radiación solar a través de paredes opacas respecto al HLC, estimado por un método que no utiliza un valor de ganancia solar constante identificable, aplicable en períodos soleados y cálidos, podría generar un error considerable en el valor de HLC si no se tiene en cuenta dicha radiación solar.

Desafortunadamente, cuando se consideran fuentes de incertidumbre como las ganancias solares u otras fuentes de incertidumbre presentadas anteriormente en la estimación para obtener el valor real de HLC de un edificio en uso, este valor tiende a mostrar valores considerablemente más altos que los del diseño. Con el fin de identificar el origen de esta diferencia, esta investigación va más allá, y propone el desacople del coeficiente de perdida de calor en sus coeficientes de pérdida de calor por transmisión (UA) y por infiltración y/o ventilación (C_v). Todo esto se lleva a cabo mediante el empleo de datos medidos durante un periodo de monitorización del edificio en uso.

Por lo tanto, como último paso de la Tesis, este trabajo se centra en desarrollar un nuevo método de desacoplamiento del HLC, basado en el uso de sensores simples para monitorizar el edificio, que podría fácilmente implementarse en escenarios del mundo real. La tasa de infiltración y ventilación de aire del edificio se estimará mediante el uso del CO_2 como gas trazador, a través de la aplicación del método de decaimiento del CO_2. Es posible medir la concentración de CO_2 de un lugar por medio de sensores simples de calidad de aire. Para llevar a cabo este trabajo, se han considerado los requisitos descritos en la norma ASTM D6245-18 titulada ‘Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation’. A pesar de que el objetivo de esta norma no es desacoplar el HLC, uno de sus objetivos es la estimación del Cambio de Aire por Hora (Air Change per Hour, ACH) del volumen analizado. El ACH puede utilizarse para estimar el coeficiente de pérdida de calor por infiltración y/o ventilación (C_v) del volumen estudiado. Considerando que HLC = UA + C_v, si se estiman los valores de HLC y C_v, entonces el HLC puede desacoplarse en sus partes de transmisión (UA) e infiltración y/o ventilación (C_v).

Sin embargo, el método de desacoplamiento de HLC propuesto requiere la estimación de los valores de HLC de las diferentes zonas térmicas o volúmenes a analizar para su correcta aplicación. En estas zonas térmicas o volúmenes, también se estimarán los correspondientes valores de C_v. Los volúmenes seleccionados para desarrollar esta última parte de la Tesis serán las cuatro plantas del edificio de oficinas rehabilitado mencionado anteriormente. Por lo tanto, los valores de HLC estimados aplicando el método promedio mencionado anteriormente, se utilizarán para desacoplar los valores de HLC ya estimados en los valores de C_v y UA. Además, cabe señalar que los valores HLC del edificio en uso se estiman para dos períodos diferentes: uno antes de la rehabilitación del edificio, y el otro, después de la rehabilitación del edificio. Antes de la rehabilitación, no había ningún sistema de ventilación instalado en el edificio. Por lo tanto, los valores de C_v obtenidos durante los inviernos previos a la rehabilitación diferirán de los que se pueden observar tras la rehabilitación. Esto sería debido a que antes de la rehabilitación del edificio, solo se apreciaban las pérdidas de calor por infiltración del edificio, mientras que, después de la rehabilitación del mismo, al instalarse un sistema de ventilación en cada una de las plantas del edificio, debía de tenerse en cuenta, además de las pérdidas de calor por infiltración, las apreciadas por el sistema de ventilación del edificio.

En resumen, a través de esta Tesis, se ha podido desarrollar un método preciso basado en datos medidos para estimar resultados fiables de HLC para edificios en uso, que después se desacoplan en el coeficiente de pérdida de calor por transmisión e infiltración y/o ventilación. Por lo tanto, este trabajo será de gran ayuda a la hora de identificar el origen de las pérdidas de calor, y así, poder comprender mejor la brecha de rendimiento energético que existe en los edificios.