

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE UN SISTEMA HÍBRIDO INTERCAMBIADOR TIERRA-AIRE Y ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Asmae Boubkari¹, Manuel Andrés-Chicote¹, Ana Tejero-González^{1*}, Eloy Velasco-Gómez¹

1: Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Grupo de Termotecnia, ITAP, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid
Paseo del Cauce, 59, 47011, Valladolid (Spain)
e-mail: ana.tejero@uva.es

Resumen: Hoy en día existe una preocupación generalizada por el ahorro de energía. Entre las tecnologías de calefacción y refrigeración existentes para reducir el consumo de energía en los edificios se encuentran los intercambiadores de calor tierra-aire (EAHE). Estos sistemas pueden combinarse con la refrigeración evaporativa, directa o indirecta, para mejorar el rendimiento global. En la literatura se proponen soluciones híbridas con sistemas de enfriamiento evaporativo directo a la salida de los EAHE para el enfriamiento interior. Debido a las limitaciones de la HR en interiores, la mayoría de las aplicaciones se centran en invernaderos. Además, los trabajos existentes se enmarcan en climas cálidos y áridos. Este trabajo estudia la combinación de enfriamiento evaporativo directo (DEC) con un EAHE instalado en un Edificio de Energía Casi Nula. Se analiza la humedad relativa suministrada para evaluar su viabilidad en espacios ocupados. El rendimiento y el ahorro energético alcanzable se estudian mediante simulación utilizando el software TRNSYS.

Palabras clave: Intercambiador tierra-aire, enfriamiento evaporativo directo, HVAC, eficiencia energética en los edificios

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una conciencia generalizada sobre el impacto energético y ambiental de los edificios. Entre los distintos sistemas que permiten reducir el consumo de energía asociado al enfriamiento de los edificios, este trabajo estudia la combinación de intercambiadores tierra-aire y sistemas de enfriamiento evaporativo. Los sistemas de enfriamiento evaporativo pueden ser de tipo directo e indirecto. La diferencia entre ellos radica en que el sistema directo agrega humedad a la corriente de aire impulsado, mientras que el indirecto no modifica la humedad de la corriente de aire de aporte [1]. En cuanto a los sistemas de intercambio tierra-aire (EAHE por sus siglas en inglés), los diferentes diseños distinguen bucle abierto y bucle cerrado [2]. Si se combinan con otros sistemas, se denominan EAHE «híbridos». En particular, la combinación EAHE con enfriamiento evaporativo se propone habitualmente con sistemas directos instalados a la salida de un EAHE en bucle abierto [3].

No obstante, la investigación empírica publicada en esta línea es aún limitada y, de acuerdo con el conocimiento de los autores, ningún trabajo estudia aplicaciones en edificios terciarios, en particular de educación superior. Los trabajos existentes se centran en edificios residenciales o en invernaderos [3]. En artículos recién publicados se estudian estos diferentes sistemas desde un punto de vista experimental y numérico, incluyendo el uso de software y enfoques de simulación diversos: 3-D Computational Fluid Dynamics [4], MATLAB [5], EDSL TAS [6].

En este contexto, el presente trabajo aborda el estudio de prestaciones de un EAHE instalado en un edificio universitario destinado a docencia e investigación en términos del ahorro de energía térmica logrado durante un año. Estas prestaciones se evalúan mediante simulación con TRNSYS, poniendo el foco en el potencial del EAHE para ser combinado con sistemas de enfriamiento evaporativo directo (DEC).

2. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo engloba: (i) la toma de medidas experimentales acerca del funcionamiento del sistema real en el edificio universitario objeto de estudio (edificio LUCIA), (ii) el modelado del sistema en entorno de simulación TRNSYS, (iii) un estudio preliminar de validación del modelo, y (iv) el uso de este para estimar ahorros de energía derivados de aplicar el sistema EAHE y su combinación con un sistema DEC.

2.1. Descripción del edificio LUCIA

El edificio LUCIA ubicado en el Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid, se construyó en 2013 con el objetivo de cumplir con las exigencias de un edificio de consumo de energía casi nulo. El edificio se considera como una referencia en la eficiencia energética y arquitectura sostenible con una superficie de 7.500 m² construida. Entre sus instalaciones de climatización se encuentran un sistema geotérmico de intercambio de calor tierra-aire. Se encuentra soterrado a partir de 2 metros bajo suelo. Este sistema aprovecha la temperatura del terreno a esa profundidad, la cual se mantiene más estable durante el año independientemente de la temperatura del ambiente exterior.

2.2. Descripción del sistema EAHE

El intercambiador de calor tierra-aire (EAHE, por sus siglas en inglés) tiene en este caso una configuración abierta y horizontal con tubos rectos. La Figura 1.a muestra la toma de aire exterior de entrada a los tubos. La Figura 1.b por su parte muestra una vista de la salida de los tubos en el sótano del edificio, desde el cual se conduce a la unidad de tratamiento de aire (UTA).

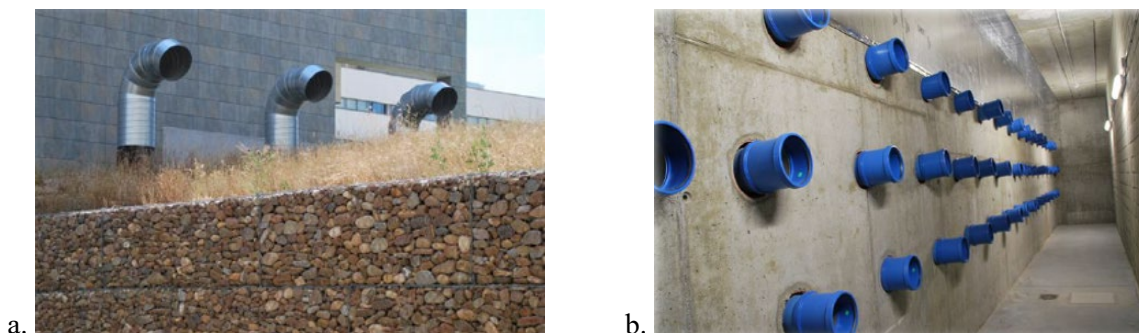


Figura 1. Detalles del sistema EAHE en el edificio LUCIA: toma de aire a la entrada de la instalación (a); imagen

de la salida de aire de los pozos a la cavidad anterior de la UTA (b).

El sistema consta de 52 tubos de polietileno de alta densidad PE 80-250 mm, con una longitud de 16,7 m. Los tubos se disponen al tresbolillo en tres filas de 17,18 y 17 tubos en posición horizontal, contando con una pendiente del 1% hacia el edificio. La profundidad de medida corresponde a: 2.02, 2.72 y 3.42 m. El terreno donde se encuentran instalados los tubos procede de la obra por tongadas de 30 cm, regado y compactado por medios mecánicos. La superficie de este terreno está compuesta por una pradera silvestre a partir de hidrosiembra controlada, de herbáceas autóctonas para un clima continental básico.

2.3. Toma de medidas

A fin de disponer de datos del comportamiento real del sistema EAHE para validación del modelo, se han tomado una serie de medidas experimentales. En particular, se han medido condiciones de temperatura y humedad relativa a la entrada y salida del EAHE con sendos adquisidores de la marca Testo con rango de temperatura de -20/+50°C y precisión de $\pm 0.4^\circ\text{C}$ y para el rango de humedad relativa de 0-100% y precisión de $\pm 2\%$ RH (desde 2 a 98% de HR hasta +25 °C). Las medidas se han tomado durante el mes de Julio 2023. Los caudales de aire a través de los pozos se han medido utilizando un balómetro de medición de caudal volumétrico con estabilizador de caudal integrado modelo 8715 DP-CALC de la marca TSI.

2.4. Modelado del sistema

El modelado del sistema híbrido se ha realizado con el software de simulación TRNSYS. El intercambiador EAHE se ha modelado utilizando el componente Type997 [7], que implementa un intercambiador de calor subterráneo con una o más capas de tubos horizontales que interactúan térmicamente con el subsuelo. El terreno se divide en una malla 3D de discretización espacial y se resuelve el problema de conducción de calor a través de un esquema de diferencias finitas implícito. El modelo del EAHE integra las características geométricas y materiales definidas en la documentación del edificio LUCIA [8]. Por su parte, el sistema de enfriamiento evaporativo directo (DEC) se ha modelado utilizando el componente Type506 [9], tomando como datos de entrada las condiciones del aire aguas arriba del equipo y una eficiencia de saturación constante de valor 90%. El modelo se completa con los componentes auxiliares para procesar la entrada de datos experimentales, realizar las conversiones intermedias entre variables (ej.: transformaciones psicrométricas), y procesar y visualizar los resultados.

Cabe señalar que, en primer lugar, se llevó a cabo análisis de sensibilidad del mallado que excede el objeto de este trabajo. Dicho estudio permitió seleccionar una combinación de parámetros de definición y discretización del dominio sólido del subsuelo manteniendo un compromiso entre la precisión de los resultados y el coste computacional de los cálculos realizados por el Type997. A continuación, dentro del alcance de este trabajo, se ha realizado un estudio de validación del modelo EAHE utilizando los datos medidos experimentalmente en el edificio LUCIA durante el mes de julio y comparándolos con un modelo sin enfriamiento evaporativo. Seguidamente, se ha incorporado el enfriamiento evaporativo para cuantificar ahorros del sistema combinado, quedando el modelo TRNSYS completo tal como muestra la Figura 2.

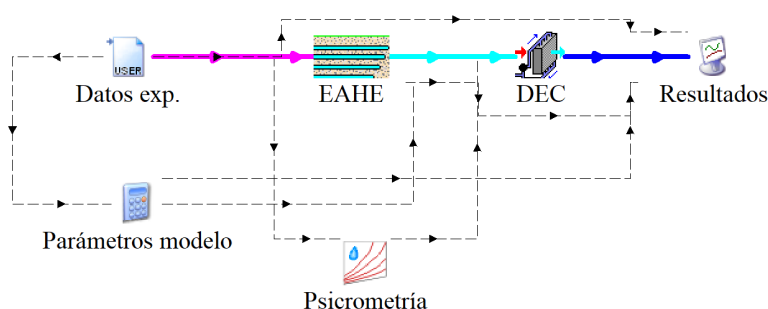


Figura 2. Esquema del sistema introducido en la interfaz de TRNSYS

El cálculo de los ahorros se realiza sobre un valor de referencia de la carga de ventilación, $\dot{Q}_{vent,tot}$, asumiendo una consigna de impulsión constante igual a una temperatura interior de confort de 24°C. Por tanto, se tienen las siguientes potencias térmicas sensibles, en kW, intercambiadas en cada subsistema (EAHE y DEC):

$$\dot{Q}_{vent_tot} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{ext} - 24) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{EAHE} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{ext} - T_{out,EAHE}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{DEC} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{out,EAHE} - T_{out,DEC}) \quad (3)$$

donde \dot{m}_{air} es el caudal másico de aire en kg/s; $c_{p,air}$ es la capacidad calorífica específica del aire; T_{ext} y $T_{out,EAHE}$ son las temperaturas de entrada (ambiente exterior) y salida del sistema EAHE respectivamente; y $T_{out,DEC}$ es la temperatura de impulsión (salida del sistema DEC)

Como la temperatura de impulsión alcanzable con el sistema DEC es en muchas ocasiones inferior a la consigna de 24°C, se calculará la carga sensible adicional que es capaz de aportar el sistema híbrido (EAHE + DEC) respecto a la carga de ventilación de referencia, \dot{Q}_{adic} .

$$\dot{Q}_{adic} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (24 - T_{out,DEC}) \quad (4)$$

Todas las potencias anteriores serán integradas, obteniendo las respectivas energías intercambiadas a lo largo del periodo de simulación, en kW (E_{vent_tot} , E_{EAHE} , E_{DEC} , E_{adic}) y habilitando el cálculo de ahorros y la identificación del número de horas que la carga de ventilación puede ser cubierta con el sistema EAHE o el sistema híbrido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Validación del modelo

La Figura 3 muestra una comparativa entre la temperatura de salida del sistema EAHE medida experimentalmente y la obtenida como resultado del modelo de simulación. Se observa que las desviaciones son aceptables, con una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.94 °C

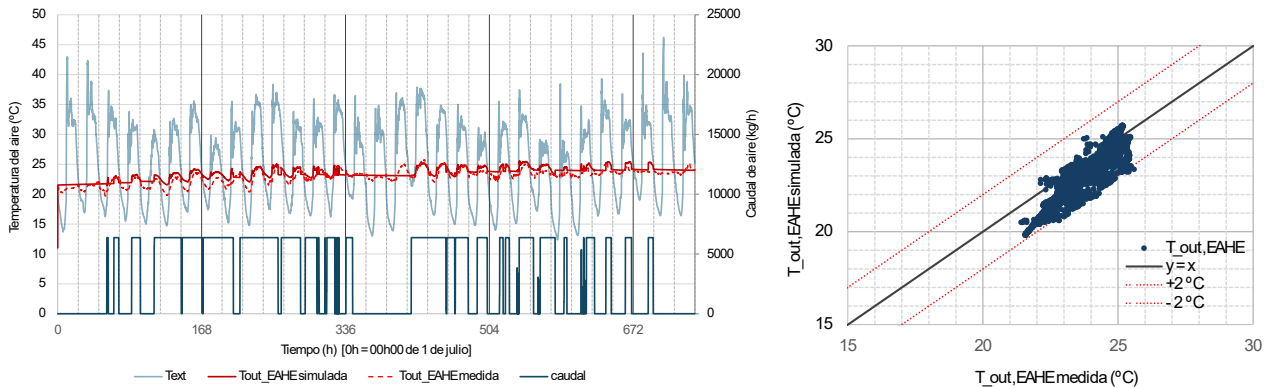


Figura 3. Resultados comparativos entre los datos experimentales y simulados (julio 2023)

3.2. Combinación con enfriamiento evaporativo y estimación de ahorros térmicos

La Figura 4 muestra los resultados de la simulación del sistema híbrido que incorpora un sistema de enfriamiento evaporativo directo (DEC) a la salida del intercambiador geotérmico tierra-aire (EAHE). Se observa que el sistema DEC consigue temperaturas de impulsión por debajo de los 20°C en la mayor parte del periodo de operación (i.e. del periodo en el que existe un caudal de aire impulsado a través de la instalación), lo cual supone un complemento al sistema EAHE para cubrir las demandas de ventilación y además permite vencer una carga sensible adicional que podría ser utilizada para cubrir cargas del local.

Sin embargo, dado que el sistema DEC realiza una humidificación importante del aire tratado es relevante observar los valores de humedad alcanzados en la salida del mismo.

A continuación, se evalúan los ahorros térmicos y las condiciones de humedad en la impulsión que se alcanzan con las siguientes opciones: (a) el sistema de intercambio tierra-aire EAHE aislado, (b) el sistema EAHE hibridado con un sistema de enfriamiento evaporativo directo DEC con eficacia de saturación del 90%, (c) el sistema EAHE hibridado con un sistema DEC con eficacia de saturación del 70%

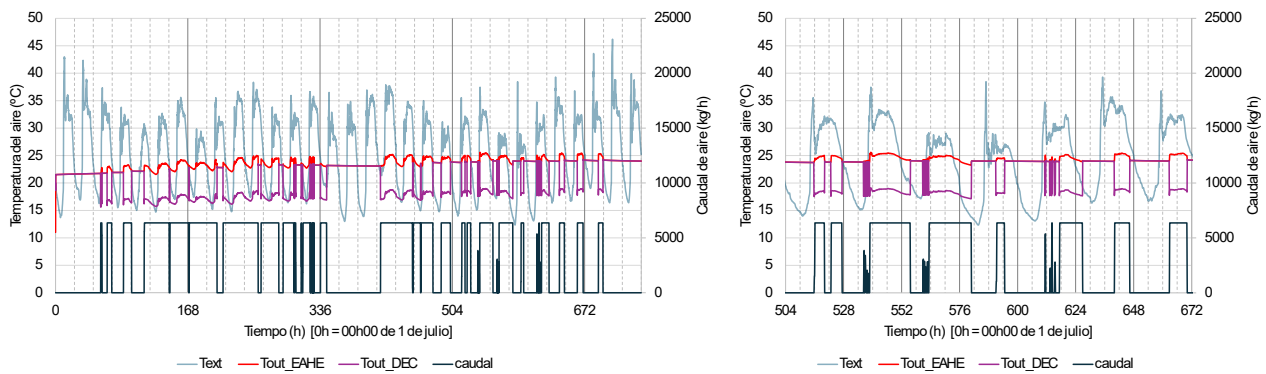


Figura 4. Resultados de simulación incluyendo el sistema DEC (julio 2023): (a) datos completos; (b) zoom 3ª semana de julio

Dado que las opciones estudiadas consisten esencialmente en estrategias de ahorro de demanda térmica en la ventilación de los edificios, el ahorro térmico se plantea en términos del potencial de soportar las cargas térmicas de ventilación y, de superarse estas, la capacidad de soportar adicionalmente el resto de cargas sensibles de frío.

La Tabla 1 resume los resultados de simulación. La demanda total de ventilación E_{vent_tot} se obtiene del sumatorio de los resultados dados por la simulación de la carga de ventilación (ec. 1) obtenida durante el mes de julio estudiado. De forma equivalente, E_{EAHE} y E_{DEC} se obtienen de la evolución de la carga soportada por el sistema EAHE (ec. 2 y 3, respectivamente). En esta tabla, $\%horas_{EAHE}$ y $\%horas_{EAHE+DEC}$ representa el porcentaje de horas de operación que la carga de ventilación es cubierta con el sistema EAHE y con el sistema híbrido (EAHE + DEC), respectivamente.

$\%E_{EAHE}$ y $\%E_{EAHE+DEC}$ representan el ahorro de demanda de ventilación obtenida por el sistema EAHE y el sistema híbrido. Por su parte, E_{adic} proporcional el total de energía sensible adicional que aportaría el sistema híbrido durante todo el periodo simulado, al cubrirse en su totalidad las cargas de ventilación. $HR_{out,DEC_promedio}$ es la humedad relativa promedio del aire impulsado por el sistema DEC cuando los ventiladores están operativos.

Tabla 1. Resumen de resultados de las simulaciones para el funcionamiento del EAHE aislado e hibridado con DEC

Caso	Parámetro	Resultado de la simulación
Base	E_{vent_tot} (kWh)	2522,7
(a) EAHE	E_{EAHE} (kWh)	2406,0
	$\%horas_{EAHE}$	32,8%
	$\%E_{EAHE}$	95,4%
(b) EAHE+DEC _{90%}	$E_{EAHE+DEC}$ (kWh)	4904,3
	$\%horas_{EAHE+DEC}$	100%
	$\%E_{EAHE+DEC}$	100%
	E_{adic} (kWh)	2381,6
	$HR_{out,DEC}$ (promedio)	93,5%
(c) EAHE+DEC _{70%}	$E_{EAHE+DEC}$ (kWh)	4349,1
	$\%horas_{EAHE+DEC}$	100%
	$\%E_{EAHE+DEC}$	100%
	E_{adic} (kWh)	1826,4
	$HR_{out,DEC}$ (promedio)	81,6%

Se observa que, durante el mes de julio analizado, el sistema EAHE solo es capaz de cubrir toda la demanda de ventilación en un 32.8% de las horas; sin embargo, el exceso que supone la demanda de ventilación respecto a la capacidad del sistema EAHE es pequeño, ya que en términos energéticos el sistema EAHE aporta un 95.4% de la demanda de ventilación total en el periodo.

Por el contrario, la incorporación del sistema DEC complementa la capacidad del EAHE hasta cubrir el total

de la demanda de ventilación. Además, cubriría una carga sensible adicional 2381,6 kWh usando un equipo DEC optimizado y dimensionado al efecto ($\varepsilon_{sat} = 0.9$); o de 1826,4 kWh cuando se pudiera utilizar un sistema no optimizado con eficacia de saturación 0.7 ($\varepsilon_{sat} = 0.7$).

Respecto a la humedad relativa del aire descargado por el sistema DEC, se observan valores promedio de 93.5% y 81.6% para las dos opciones DEC analizadas. Dichos valores de humedad no son admisibles para la impulsión de aire en aplicaciones de confort en edificios terciarios, teniendo además en cuenta que las cargas latentes de estos espacios serán en general positivas (i.e. con aporte de humedad al aire impulsado). Por ello resulta necesario estudiar alternativas que no incrementen el valor de humedad específica del aire tratado, como serían los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (IEC).

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un estudio inicial del potencial de un sistema de climatización híbrido basado en un intercambiador tierra-aire (EAHE) y un sistema de enfriamiento evaporativo directo (DEC). El estudio integra resultados experimentales obtenidos de las medidas de campo realizadas sobre el intercambiador geotérmico en un edificio universitario, con el modelado del sistema híbrido. El modelo propuesto reproduce con una notable precisión el comportamiento del sistema EAHE en términos de la temperatura del aire a la salida. A su vez, refleja un elevado potencial para cubrir la demanda de ventilación, si bien no llega a cubrirla por completo en muchas horas del periodo de operación. El sistema DEC, por su parte, complementa al intercambiador geotérmico, permitiendo cubrir toda de la demanda de ventilación del edificio, mientras proporciona una capacidad de enfriamiento sensible extra que podría utilizarse para combatir las cargas de local. Sin embargo, las humedades obtenidas a la salida del sistema DEC (impulsión de la instalación de tratamiento de aire) son muy elevadas y exceden los límites de aplicabilidad razonables en aplicaciones de confort en edificios. Reducir la eficacia de saturación en la operación del equipo podría reducir la humedad de descarga encontrando un balance entre la humedad y la capacidad frigorífica aportada por el sistema híbrido. En cualquier caso, este resultado también conduce al interés por estudiar alternativas que no aumenten el contenido de vapor del aire tratado, como podrían ser los enfriadores evaporativos indirectos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto TED2021-129652A-C22, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y la Comisión Europea a través de fondos “NextGenerationEU”/PRTR.

REFERENCIAS

- [1] ASHRAE Handbook – Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2020.
- [2] Nemati, N., Omidvar, A., Rosti, B. Performance evaluation of a novel hybrid cooling system combining indirect evaporative cooler and earth-air heat exchanger. *Energy*, 2021, 215, Part B, 119216
- [3] Soares, N., Rosa, N., Monteiro, H., Costa, J. J. Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (EAHE) systems for buildings: A review. In *Energy and Buildings*, 2021, 253, 111532
- [4] Moghtader Gilvaei, Z., Haghighi Poshtiri, A., Mirzazade Akbarpoor, A. A novel passive system for providing natural ventilation and passive cooling: Evaluating thermal comfort and building energy. *Renewable Energy*, 2022, 198, 463–483.
- [5] Abed, F. M., Zaidan, M. H., Hasanuzzaman, M., Kumar, L., Jasim, A. K. (2021). Modelling and experimental performance investigation of a transpired solar collector and underground heat exchanger assisted hybrid evaporative cooling system. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44. 102620
- [6] Alwetaishi, M. Use of Underground Constructions Enhanced with Evaporative Cooling to Improve Indoor Built Environment in Hot Climate. *Buildings*, 2021, 11(12) 573
- [7] Thermal Energy Systems Specialists (2013) TESSLibs 17 Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment. Volume 4, GHP Library Mathematical Reference. Madison, Wisconsin, USA.
- [8] Vegas Barbado, S. Estudio energético de un recuperador de energía geotérmica aplicado a un edificio universitario, Trabajo Fin de Grado (TFG), Universidad de Valladolid, España, 2016.
- [9] Thermal Energy Systems Specialists (2014) TESSLibs 17 Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment. Volume 6, HVAC Library Mathematical Reference. Madison, Wisconsin, USA.