


Programa de simulación en Simscape de un dispositivo de almacenamiento de energía para refrigeración

Programa de simulação no Simscape de um dispositivo de armazenamento de energia para refrigeração

Simulation program on Simscape of a device storing energy for refrigeration

González, Carlos R. González González

 Carlos R. González González González
carlosrf@icb.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría" Cujae, La Habana, Cuba, Cuba

RAC: revista angolana de ciências
Associação Multidisciplinar de Investigação Científica, Angola
ISSN-e: 2664-259X
Periodicidad: Semestral
vol. 3, núm. 1, 2021
sousangola@gmail.com

Recepción: 01 Enero 2021
Aprobación: 01 Abril 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/400/4002188006/index.html>

Política de Direito de Autor O conteúdo das publicações é responsabilidade dos autores e não da RAC: revista angolana de ciências, nem da Associação Multidisciplinar de Investigação Científica. Os autores mantêm os direitos autorais e concedem à revista o direito de publicação inicial, com o trabalho simultaneamente licenciado sob a Licença Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0, e pelos direitos de publicação. Os autores podem publicar seus trabalhos on-line em repositórios institucionais / disciplinares ou nos seus próprios sites.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Resumen: Una nueva aplicación en Simscape fue desarrollada con el objetivo de contar con una herramienta de simulación del comportamiento de un dispositivo de zeolita añadido a un refrigerador estándar. El programa se basó en el ejemplo 1.454 de Simscape de MATLAB R2015a, con el dispositivo de almacenamiento de energía colocado entre el evaporador y el compresor. La temperatura ambiental fue considerada como una función lineal a trozos. Para mantener la rápida ejecución de la aplicación, fue necesario usar un solucionador ode23t en lugar del ode23 original. El programa fue aplicado a un caso de estudio consistente en un refrigerador de tamaño medio con un dispositivo de zeolita no óptimo, solamente para examinar el desempeño del programa. Se llevó a cabo una comparación entre el ejemplo original de Simscape para el modelo 1.454 y la presente aplicación. Buena rapidez y robustez fueron obtenidas para los refrigeradores simulados de tamaño medio.

Palabras clave: zeolita, Refrigeradores, Simscape, almacenamiento de energía, zeolita, simulación.

Resumo: Uma nova aplicação no Simscape foi desenvolvida com o objetivo de contar com uma ferramenta de simulação do comportamento de um dispositivo de zeolita acrescentado a um refrigerador padrão. O programa se apoiou no exemplo 1.454 do Simscape do MATLAB R2015a, com o dispositivo de armazenamento de energia colocado entre o evaporador e o compressor. A temperatura ambiental foi considerada como uma função linear a pedaços. Para manter a rápida execução da aplicação, foi necessário usar um solucionador ode23t em lugar do ode23 original. O programa foi aplicado a um caso de estudo consistente em um refrigerador de tamanho médio com um dispositivo de zeolita não ótimo, somente para examinar o desempenho do programa. levou-se a cabo uma comparação entre o exemplo original do Simscape para o modelo 1.454 e a presente aplicação. Boa rapidez e robustez foram obtidas para os refrigeradores simulados de tamanho medio.

Palavras-chave: Refrigeradores, Simscape, armazenamento de energia, zeolita, simulação, Refrigeradores, Simscape, armazenamento de energia, zeolita, simulação.

Abstract: A new application on Simscape was developed with the goal to have a tool for simulating the behavior of a zeolite device attached to a standard refrigerator. The program has based on the Simscape example 1.454 from MATLAB R2015a, with the energy storing device placed between the evaporator and the compressor. The environmental temperature was considered as a segmented linear function. In order to keep the application running faster, an ode23t solver had to be used instead of the original ode23. The program was applied to a case study, consisting of a medium size refrigerator with a non-optimal zeolite device, only for examining the program performance. A comparison was carried out between the original Simscape example for the 1.454 model and the present application. Speed and robustness for the medium size simulated refrigerators was obtained. Large size refrigerators have not examined.

Keywords: Refrigerators, Simscape, energy storing, zeolite, simulation, Refrigerators, Simscape, energy storing, zeolite, simulation.

INTRODUCCIÓN

El lenguaje de programación MATLAB surgió en 1984 como una herramienta matemática para los cálculos de la ciencia y la ingeniería. A lo largo de los años hasta la actualidad ha tenido un camino ascendente en la aplicación de métodos muy exactos, rápidos y robustos en áreas cada vez más especializadas y diversas de la actividad profesional. De la plataforma original se derivó el lenguaje Simulink, el cual convirtió las funciones originales del MATLAB en componentes gráficos que facilitaron mucho la transformación de los algoritmos matemáticos no en instrucciones de programación, sino en diagramas de bloques más asequibles a ingenieros y programadores. Sin embargo, Simulink seguía siendo una herramienta puramente matemática, cuyo uso implicaba que los ingenieros tuvieran que manejar con mucho cuidado la cuestión del acople de las magnitudes físicas en los sistemas complejos. Por esta razón se desarrolló, entre otros, el lenguaje Simscape, en el cual se crearon repositorios de bloques correspondientes a muchas operaciones unitarias de las ingenierías Mecánica, Eléctrica, Hidráulica, Química; y la posibilidad de su acople en modelos de sistemas reales. De esta forma, la tarea de simulación con Simscape se realiza de modo semejante a como se acoplan los elementos básicos de la ingeniería tales como las tuberías, las válvulas, los compresores y los intercambiadores de calor en una instalación fabril (The Mathwork Inc., 2015).

El objetivo del presente trabajo es crear una aplicación en Simscape para la simulación de un refrigerador estándar, que permite determinar la influencia sobre el balance energético de un dispositivo incorporado, denominado ZOULE, que almacena la energía ambiental durante el día para utilizarla en la noche debido a la diferencia de temperatura entre esos horarios y a la capacidad de las zeolitas de almacenar la energía de adsorción. Este trabajo forma parte de una línea que se complementa con el estudio de los fundamentos termodinámico-estadísticos del funcionamiento del dispositivo que está enviado a publicar en la Revista Cubana de Física; y otro trabajo en etapa de planificación para la construcción y pruebas de un prototipo en un caso de estudio específico de refrigeración y, en el cual se hará uso de este programa para la optimización del diseño del dispositivo.

Los procesos de refrigeración son muy diversos y mantienen su actualidad debido a la necesidad de lograr aparatos más eficientes y con prestaciones más específicas a los diversos usos que se presentan en la práctica. En particular, las patentes publicadas referidas al tema en los últimos cinco años son abundantes, entre ellas las que tienen que ver con los aparatos y procesos de almacenamiento de energía y de refrigeración (Cao, 2018),

(Iwatsuki, 2016),(Kazuya y Shimizu, 2016), con el control de este proceso (Wencheng, y Li, 2018), y con dispositivos autónomos en base a zeolita (Espinoza-Need, 2016); aunque la primera referencia a tecnologías viables de refrigeración bajo este principio fue la de Tchernev (Tchernev, 1978)

Sharma et al presentan la utilización de la zeolita sintética 4A con agua como sustancia refrigerante pero con pobres resultados de rendimiento 0,6 y temperatura mínima de 9,8 °C, incluso por debajo de los avalados por Tchernev [(Sharma y col, 2015)]. En ambos casos se trata de refrigeradores construidos expresamente para el aprovechamiento de la radiación solar exclusivamente, lo cual se aparta del principio de adicionar dispositivos ahorradores a los refrigeradores comerciales, lo cual persigue la presente serie de trabajos.

Por otra parte, Romero y Carbonell presentan otra tecnología para refrigeración por absorción con energía solar en locales pequeños, usando como absorbente una mezcla de sal y agua con alto calor de reacción. Los cálculos de la necesidad energética se realizan con el software Carrier E20 (Romero y col, 2016). En trabajos posteriores, los mismos autores realizan la simulación del sistema de refrigeración para la climatización de edificaciones en climas cálidos y húmedos. Esta simulación fue realizada empleando el programa TRNSYS 17. Con el programa fue posible optimizar la inclinación de los captadores solares y determinar el coeficiente de desempeño (COP) en diferentes condiciones de operación. También fue posible realizar el balance de las energías solares básicas y las suplementarias necesarias para satisfacer los requerimientos de temperatura en el rango de temperaturas entre 70°C - 150°C para activar las máquinas de absorción (Romero y Carbonell, 2017).

En la amplia revisión realizada para la presente investigación los trabajos de simulación de procesos de refrigeración encontrados no hacen mucho uso de Simscape, lo cual le otorga novedad a la estrategia de diseño y ensayo de dispositivos agregados a los sistemas estándar utilizada en la presente línea de trabajos. Sin embargo, es extendido el uso de otros softwares específicos para la refrigeración. En el presente trabajo se mostrarán algunas ventajas del empleo de Simscape con vistas al diseño de instalaciones de este tipo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como ya se señaló en la introducción, las tecnologías en uso actualmente para la refrigeración son muy diversas. Ensayar modificaciones a estas soluciones tecnológicas en las propias instalaciones sería riesgoso o dañino económicamente; y en bancos de prueba sería muy caro y demorado, por lo que resulta más eficiente modelarlas y simularlas mediante la computación. La modelación debe tener en cuenta todos los elementos físicos del sistema en forma simplificada, sus propiedades termo-hidráulicas y físico-químicas, así como sus interacciones durante los procesos termodinámicos que ocurren en el sistema. Además, el impacto esperado del proceso de innovación de toda la presente línea de investigaciones, es la creación de un aparato fabril que produzca los dispositivos ahorradores “a la medida” de los sistemas de refrigeración instalados por el cliente. Por esta razón, el primer paso de cada negocio debe ser realizar una simulación de dichos sistemas para poder diseñar y construir un dispositivo ZOULE óptimo para el caso en cuestión.

Por las razones antes señaladas, después de la modelación del nuevo sistema con el ZOULE incorporado, es necesario reprogramar la simulación teniendo en cuenta las particularidades del refrigerador objeto de mejoramiento. Esta estrategia de innovación obliga a utilizar una plataforma flexible, ingenierilmente amigable y robusta tal como el Simscape. Cada nueva versión del programa sería también un ejercicio de diseño para los ingenieros involucrados. Con el tiempo, los profesionales extenderían su experiencia a un considerable número de tecnologías distintas de refrigeración, y también iría aumentando el repositorio de aplicaciones, lo cual facilitaría el trabajo de diseño y su calidad, así como los beneficios de la empresa involucrada.

Para la realización de la simulación se partió del modelo de simulación versión 1.454 en Simscape 3 (MATLAB R2015a) de un refrigerador típico de dos fases, en el cual se demuestra como un compresor hace pasar el refrigerante R-134a a través de un condensador, una válvula de expansión y un evaporador.

El gas caliente que sale del compresor se condensa al enfriarse por transferir la energía interna al ambiente por convección. La presión cae en la válvula de expansión y el refrigerante hierve en el evaporador, enfriándose y absorbiendo calor de la cámara de refrigeración. El controlador del programa conecta el compresor nuevamente cuando la temperatura de la cámara desciende por debajo del parámetro umbral. (The Mathworks Inc., 2015)

En la figura 1 se presenta el esquema del diagrama de bloques para el modelo 1.454 (The Mathworks Inc., 2015) Cada uno de los bloques principales (compresor, condensador, válvula de expansión, evaporador, cámara de frío y sistema de control) están constituidos por bloques básicos de Simscape que no se muestran para evitar la extensión innecesaria del artículo, pero el lector interesado puede ponerlos de manifiesto fácilmente en el programa mediante el ratón.

Cada bloque básico tiene asociado un código fuente que realiza los cálculos inherentes a cada uno de ellos en base a parámetros suministrados por el cliente, las variables definidas (con sus unidades y valores iniciales) y a las características de sus puertos de entrada y salida, mediante los cuales se conectan los bloques entre sí.

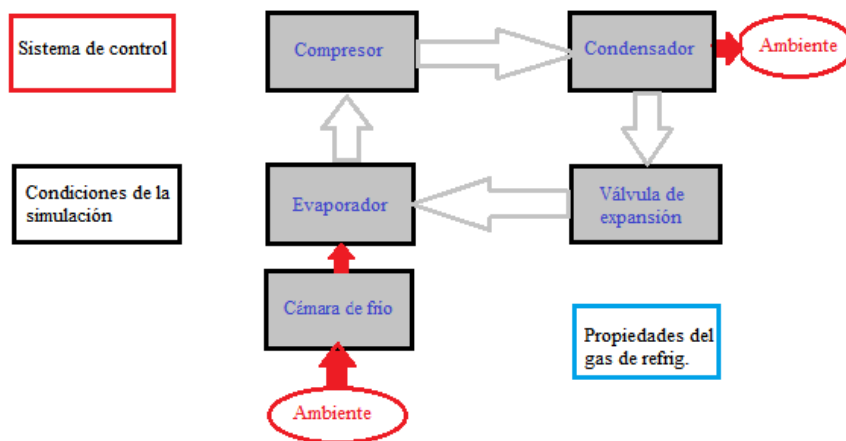


FIG. 1.

Esquema simplificado de bloques del modelo 1.454 en Simscape 3 utilizado como programa de partida para la presente investigación.

Fuente: The Mathworks Inc., 2015

El algoritmo general de Simscape para el refrigerador consiste en la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas en el dominio de un entorno termodinámico de dos fases (líquido y vapor) que es resuelto numéricamente mediante un solucionador (solver) escogido por el usuario para optimizar el desempeño del programa. En el procedimiento para la solución el programa primeramente compila el código introducido por el usuario para detectar incongruencias, y calcula una solución en 'tiempo 0' que comprueba que los valores escogidos por el mismo usuario para el instante inicial se satisfacen exactamente o de forma aproximada. Una vez cumplido este protocolo satisfactoriamente, se puede comenzar la corrida.

Para la programación y las corridas de prueba de la simulación se utilizó una máquina marca DELL con procesador Intel(R) Core(TM) i3-3220 CPU@ 3.30GHz, memoria RAM de 2 GB y sistema operativo WINDOWS 7 Ultimate para 64 bits. El procesador brindó buenas prestaciones para los objetivos propuestos, aunque la RAM resultó algo baja y llevó a episodios de saturación durante las corridas a tiempos largos. Para la elaboración de algunos gráficos auxiliares se utilizó también el programa Paint, integrante del paquete de Windows7.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la modelación y simulación del dispositivo ZOULE se concibió un nuevo bloque que se colocó en serie entre los bloques ‘evaporador’ y ‘compresor’ del programa original 1.454 La descripción, los objetivos y el principio del funcionamiento de ese dispositivo se presentaron en un trabajo anterior (González-González y Plasencia-Salgueiro, 2017) También fue necesario modificar el comportamiento de la temperatura ambiental como una función lineal a trozos (disponible en Simscape) incorporada en lugar de un valor constante como estaba en el programa original.

El modelo comprende un subsistema de almacenamiento de energía; un subsistema de control de entrada y salida de calor al subsistema de almacenamiento; y un subsistema de serpentín que transmite el calor almacenado al gas refrigerante. El subsistema de almacenamiento está en contacto con el aire ambiental a través de su chasis en determinados períodos programados del día, y con el serpentín en los períodos de la noche y madrugada. En la figura 2 se ilustra el modelo del ZOULE destacando los diferentes subsistemas.

El subsistema de almacenamiento de energía está compuesto solamente de tres elementos activos: la capacidad de almacenamiento de la zeolita y la del chasis; y la conducción térmica del chasis al volumen de la zeolita. La energía almacenada es calculada en cada instante de tiempo de simulación como el producto del volumen de la zeolita (o del chasis), por el calor específico isostático de adsorción de la zeolita (o por el calor específico del chasis) por la temperatura del dispositivo. Para el cálculo del calor conducido por la zeolita en cada instante se utiliza la ley de Fourier.

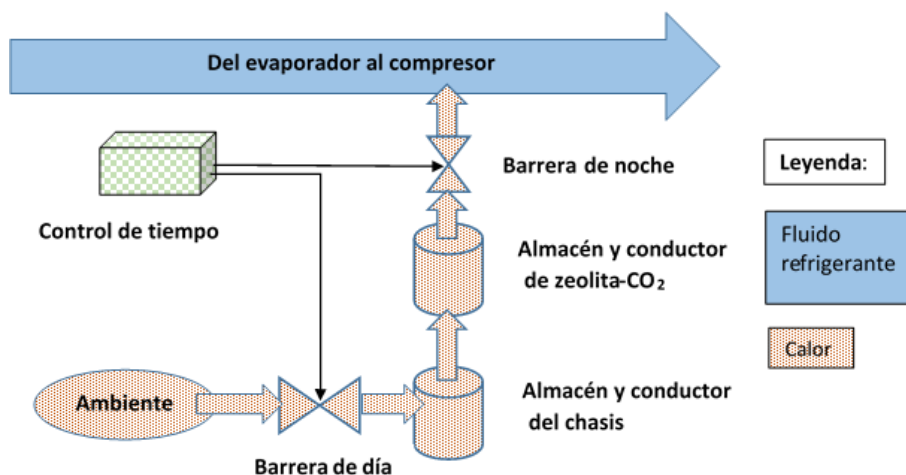


FIG. 2.

Diagrama de bloques del modelo del dispositivo ZOULE que incluye los subsistemas de almacenamiento de energía, de serpentín con el fluido refrigerante, y de control de tiempo (con sus dos barreras térmicas)

The Mathworks Inc., 2015

El subsistema de control de tiempo fue creado en base a las funciones de Simulink, ya que Simscape no contempla algunas de esas posibilidades. En este subsistema se parte de un reloj que genera el tiempo transcurrido en segundos de simulación suponiendo que el proceso arranca a las 00:00 horas. Los parámetros del subsistema hacen que se genere una señal ‘0’ desde el arranque hasta los 28800 s (madrugada) y desde los 57601 s hasta los 86400 s (noche); y una señal ‘1’ desde los 28801 s hasta los 57600 s.

El subsistema de control de tiempo fue creado en base a las funciones de Simulink, ya que Simscape no contempla algunas de esas posibilidades. En este subsistema se parte de un reloj que genera el tiempo transcurrido en segundos de simulación suponiendo que el proceso arranca a las 00:00 horas. Los parámetros del subsistema hacen que se genere una señal ‘0’ desde el arranque hasta los 28800 s (madrugada) y desde los 57601 s hasta los 86400 s (noche); y una señal ‘1’ desde los 28801 s hasta los 57600 s. La señal ‘0’ abre la barrera

nocturna del dispositivo y cierra la barrera diurna, de modo que la energía almacenada pasa al refrigerante sin que haya conducción al ambiente. La señal '1' abre la barrera diurna, cierra la nocturna, y la energía ambiental carga el almacén de zeolita al desorberse el gas de la misma.

Las barreras térmicas fueron bloques expresamente diseñados por el autor para esta aplicación. La barrera térmica de noche está constituida fundamentalmente por un código en lenguaje Matlab para el dominio fundacional thermal de Simscape, que representa la ley de Fourier de conductividad térmica entre la zeolita y el serpentín del gas refrigerante (ANEXO 1). Este código tiene tres parámetros: el coeficiente de conductividad térmica de la zeolita (HCC), el área del serpentín (Area) y la longitud de la capa de zeolita que rodea al serpentín (cond_length). También tiene puertos de entrada y de salida para flujo de calor (A y B), y un puerto de entrada para la señal proveniente del subsistema de control de tiempo (pasa). Puede notarse que en la instrucción 'else' del código no se pone explícitamente un valor cero del calor sino un valor muy pequeño porque en caso contrario el solucionador tiende a desestabilizarse. Además, de esa manera se garantiza la integridad dimensional.

De forma semejante se programó el código para la barrera de día, pero a diferencia de la barrera de noche, en este caso se basa en un proceso de convección desde la atmósfera (y el Sol si está presente) hacia el chasis del dispositivo ZOULE (ANEXO 2). Este proceso es mucho más complejo que el de conducción; más si puede estar presente la radiación solar, pero en una primera aproximación se puede considerar que el calor transmitido por esta vía es proporcional al área de contacto (Area) y al coeficiente de convección (y radiación) (HCC) entre el ambiente y el chasis.

Hay que notar que el calor dispensado en el ZOULE está determinado por procesos dinámicos de transmisión de calor mediante conducción, convección y radiación; pero la energía transferida por la noche al fluido refrigerante, nunca podrá ser mayor que la energía almacenada en la zeolita durante el día, la cual es calculada en un estudio termodinámico-estadístico enviado a publicar en la Revista Cubana de Física.

Para la incorporación del bloque fue necesario cambiar el solucionador del modelo original, que era el ode23, por el ode23t, que es más eficiente para los sistemas compuestos por ecuaciones tanto algebraicas como diferenciales, ya que la consideración de una función de la temperatura ambiente con el tiempo complejizaba el modelo original. Esta modificación del comportamiento de la temperatura ambiental simulada, hubo de realizarse no solamente en el bloque ZOULE, sino también en el bloque 'Condensador' y en el bloque 'Compartimiento de refrigeración', ya que ambos experimentaban también intercambio de energía con el medio ambiente.

TABLA 1.
Condiciones iniciales adicionales correspondientes al bloque del dispositivo ZOULE

Variable	Prioridad	Valor	Unidad
Chasis/T	alta	293,0	K
Zeolita/T	alta	293,0	K
Zoule_pipe/T/ev_I	alta	112,215	bar
Zoule_pipe/T/v_I	alta	0,0349971	m ³ /kg

autor

Las condiciones iniciales de la simulación en los bloques originales del modelo 1.454 se mantuvieron inalterables, y solamente se agregaron condiciones iniciales adicionales en las variables correspondientes al bloque ZOULE. Obviamente, la corrida del programa es sensible a los parámetros que se asignan a los diferentes bloques-componentes del sistema. Estos parámetros responden directamente al diseño del modelo de refrigerador que se quiere simular.

Durante las pruebas realizadas en el trabajo se ensayaron 16 variantes de la aplicación con diferentes conjuntos de parámetros, obteniéndose buen desempeño de la simulación en 10 de ellas, lo cual indica la

robustez de las modificaciones introducidas en el programa original 1.454. Los tiempos de ejecución para una corrida estuvieron entre 10 y 20 minutos, lo cual resulta muy rápido en la simulación de la operación de refrigeradores que operan durante 16 horas o más. Para el presente artículo se escogió como caso de estudio no optimizado, la prueba con las características expuestas en la tabla 2. En algunas variantes se realizaron estudios detallados de variables termodinámicas tales como la temperatura, la presión, el volumen, energía interna, entropía, densidad, y otros en puntos determinados dentro de los bloques, lo cual atestigua las amplias posibilidades del Simscape en general.

En la figura 3 se presentan los gráficos entregados por el modelo con los parámetros de la tabla 2, y otros parámetros de oficio contenidos en el modelo original 1.454 y que no son explícitamente modificables por el usuario.

TABLA 2.
Parámetros para la corrida del programa para el caso de estudio ‘ssc_refrigeration_2020_15’

Componente	Parámetro	Valor	Componente	Parámetro	Valor
ZOULE	Coef. convec. natural	20 W/(m ² .kg)	Gas refrig.	Calidad inicial	0,2
ZOULE	Dim. chasis (LxAxH)	3x3x2 m	Compresor	Presión	0,6 MPa
ZOULE	Cv chasis	300 J/(kg.K)	Compresor	Flujo masa	0,004 kg/s
ZOULE	Cv zeolita	1473 J/(kg.K)	Compresor	Constante t	20
ZOULE	Densidad ap. zeolita	1000 kg/m ³	Evaporador	Longitud serpentín	15 m
ZOULE	Cond. Térmica zeolita	0,8 W/(m.K)	Cámara refr.	Masa de aire	1 kg
ZOULE	Diámetro serpentín	0,008 m	Cámara refr.	Área exterior	6 m ²
ZOULE	Longitud serpentín	15 m	Cámara refr.	Área interior	4,5 m ²
Condensador	Longitud serpentín	15 m	Cámara refr.	Cond. térm. espuma	0,03 W/(m.K)
Condensador	Conduc. térm. serp.	400	Cámara refr.	Espesor espuma	0.03 m
Condensador	Densidad serpentín	8940	Cámara refr.	Temp. nominal	277 K
Condensador	Cv serpentín	390 J/(kg.K)	Cámara refr.	ΔT	2 K
Condensador	Diámetro serpentín	0,015 m	Válvula exp.	Área max. garganta	2,7 mm ²
Condensador	Espesor serpentín	5.0e-04 m	Válvula exp.	Área min. garganta	0,1 mm ²
Condensador	Área de convección	1 m ²	Válvula exp.	Temp. max. garg.	230 K
Condensador	Coef. convección	150 W/(m ² .kg)	Válvula exp.	Temp. min. garg.	275 K

autor

En la figura 4 se presentan para comparación los gráficos correspondientes al software desarrollado en el presente trabajo, con los mismos parámetros pero sin el dispositivo adicional ZOULE.

En la tabla 3 se muestran los valores calculados a partir de los gráficos de las figuras 3 y 4 como comparación de los resultados obtenidos por el modelo con dispositivo adicional y sin él. Del análisis de esta tabla puede notarse que existen diferencias significativas entre los valores de las variables termodinámicas del caso de estudio y del modelo original, lo cual denota que la aplicación puede ser utilizada para poner en evidencia el efecto del dispositivo adicional sobre un modelo estándar, o las diferencias que se producen entre dos casos de estudio. De esta forma el modelo puede auxiliar en la optimización del diseño del dispositivo para instalaciones de refrigeración de diferentes tecnologías y capacidades; por ejemplo, de frigoríficos de gran volumen, o de sistemas de climatización centrales de edificios, que no fueron examinados en el presente artículo.

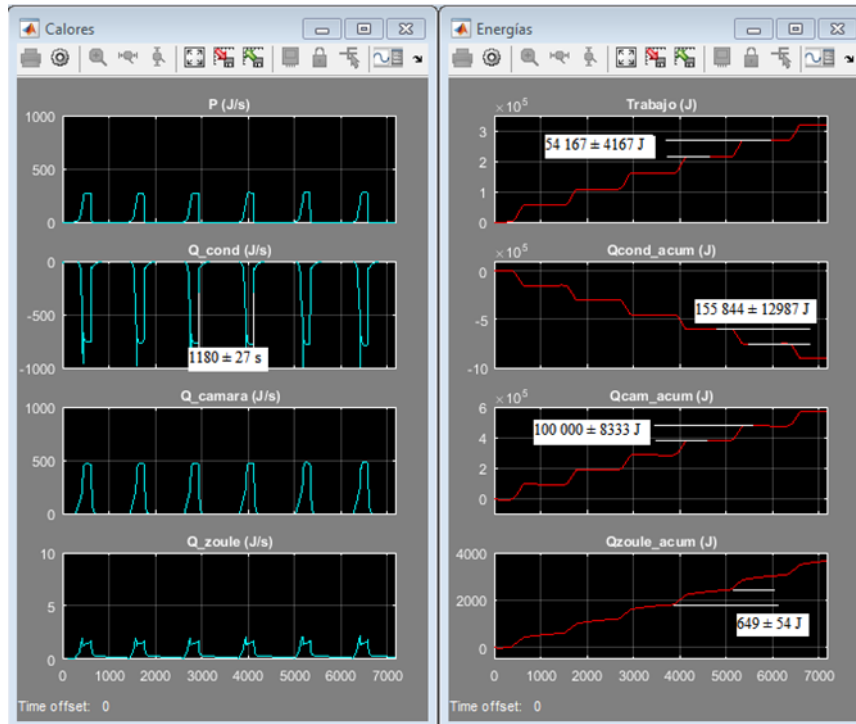


FIG. 3.

Resultados de diferentes variables energéticas en forma diferencial (gráfico izquierdo) e integral (gráfico derecho) en función del tiempo simulado en s; así como algunas mediciones realizadas para el caso de estudio, tales como: el período entre ciclos de refrigeración, trabajo del compresor, calor que sale del condensador (Q_{cond}), calor que entra a la cámara (Q_{cam}) y calor cedido por el ZOULE al líquido refrigerante (Q_{zoule})

autor

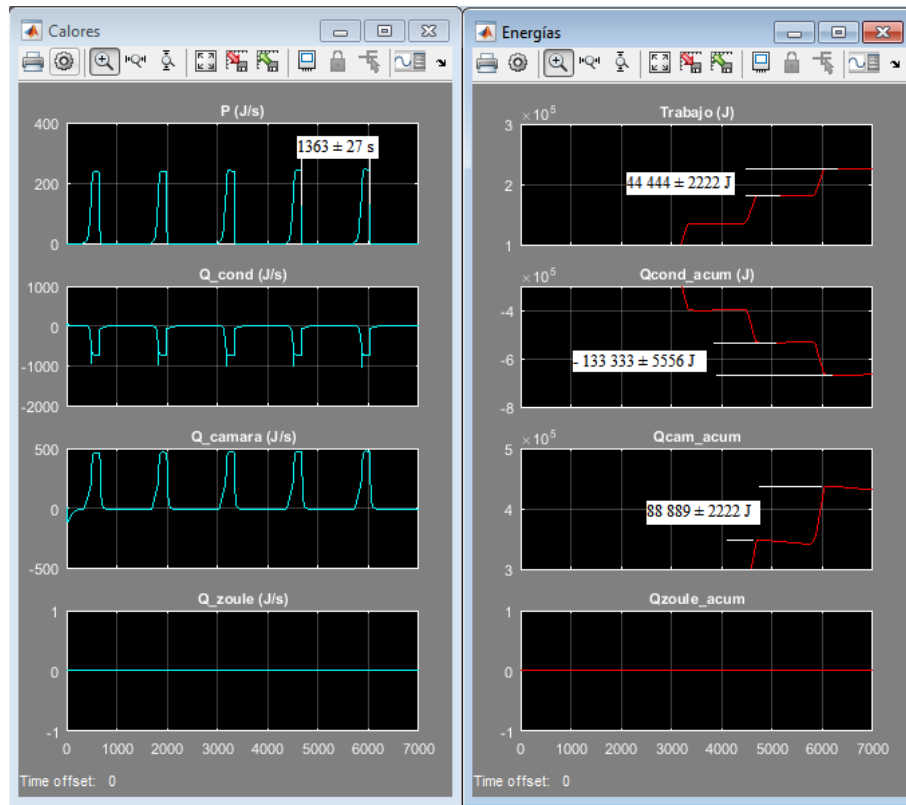


FIG. 4.

Resultados de diferentes variables energéticas en forma diferencial (calores) y en forma integral en función del tiempo simulado; así como algunas mediciones realizadas para el caso de estudio pero sin el dispositivo adicional ZOULE, tales como: el período entre ciclos de refrigeración, trabajo del compresor, calor que sale del condensador (Qcond), y el calor que entra a la cámara (Qcam) autor

TABLA 3.

Comparación de los valores obtenidos para las variables termodinámicas, a partir del software del presente trabajo para el caso de estudio y para el modelo original 1.454 de Simscape.

Modelos	T (s)	W (J)	Qcond (J)	Qcam (J)	Qzoule (J)	Σ (J)
1.454 Simscape	1363 ± 27	44 ± 2222	-133 ± 5556	88 889 ± 2222	----	0
Presente trabajo	1180 ± 27	54 ± 4167	-155 ± 844 ± 12987	100 ± 000 ± 8333	649 ± 54	-1028

CONCLUSIONES

La aplicación realizada logró reproducir el comportamiento de un refrigerador clásico modelado por Simscape. En particular la simulación logra medir parámetros de operación importantes en un refrigerador modificado mediante la incorporación de un dispositivo ahorrador de zeolita-CO2 entre el evaporador y el compresor. En este sentido, el aporte más importante es la determinación del calor transferido por el ZOULE

al fluido refrigerante, el cual es captado por el dispositivo desde el ambiente. De esta manera, el modelo desarrollado cumple con el objetivo central del trabajo, consistente en lograr obtener una herramienta computacional de utilidad en el diseño de dispositivos destinados a instalaciones de refrigeración de otros tipos.

En el proceso de puesta a punto del programa se ensayaron con éxito modelos de diferentes capacidades, mostrando rapidez y robustez, aunque no se simularon instalaciones de gran capacidad tales como frigoríficos.

Igualmente, es de esperar que la aplicación del presente modelo a sistemas de refrigeración no convencionales tendrá que pasar obligatoriamente por la creación de nuevas aplicaciones derivadas de la presente, lo cual será posible gracias a la flexibilidad y robustez de Simscape. No obstante, el modelo tal como ha sido presentado aquí posee prestaciones que lo hacen útil para el análisis de las energías, las temperaturas, la calidad, las presiones y la densidad del gas refrigerante en cualquier punto del refrigerador convencional en cualquier instante de tiempo; y los flujos de energía y de masa entre dos puntos cualesquiera del aparato.

REFERENCIAS

- Cao, J. (2018). Patente N.º CN 107702374A. República Popular China.
- Espinoza-Need, S. (2015). Patente N.º ES 2589512A1. España.
- Hotta, M., Sugita, S., & Takeda, J. (2019). Patente N.º JP 2019131740A. Japón.
- Iwatsuki, S. (2016). Patente N.º JP 2016038105A. Japón.
- Kasuya, J., & Shimizu, N. (2016). Patente N.º WO 2016199671A1. Japón.
- Romero Paguay, J. A., & Carbonell Morales, T. (setiembre/diciembre de 2014). Sistema de refrigeración solar por absorción para la comunidad de Kumay en Ecuador. *Ingeniería Energética*, XXXV(3), 286-294.
- Romero Paguay, J. A., Carbonell Morales, T., & Quevedo Tumailli, V. F. (mayo/agosto de 2016). Simulación de un sistema de refrigeración solar por absorción. *Ingeniería Energética*, XXXVII(2), 154-162.
- Sharma, A., Vaibhav, K., & Ashish, K. (april de 2015). Zeolite -Water Adsorption Refrigeration System. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4), 537-540.
- Tchernev, D. I. (s.d.). [http://library.pyramidal-foundational-information.com/books/Solar Energy Application of Natural Zeolites](http://library.pyramidal-foundational-information.com/books/Solar%20Energy%20Application%20of%20Natural%20Zeolites) D. I. Tchernev.pdf, en Sand, L B, and Mumpton, F A. *Natural zeolites: occurrence, properties, and use*. United States, pag. 479-485,(1978). Consultado . Obtido em 19 de setiembre de 2020
- The Mathworks Inc. (2015). www.mathworks.com, 8.5.0.197613. Obtido em 17 de setiembre de 2020, de MATLAB Production Server\R2015a.
- Wencheng, H., & Li, W. (s.d.). Patente N.º CN 108144413A. República Popular China.

ANEXO 1.

Código en lenguaje Simscape de la barrera térmica de noche:

```
component barrera_termica_noche
% Barrera térmica para la red de noche. Versión 2
% Este componente abre o cierra una barrera de transmisión de la energía en
% una línea de calor para el paso al refrigerador de la energía almacenada
inputs
pasa = { 0 , '1'}; % Dato de entrada para abrir o cerrar las barreras
end
nodes
```

```

A = foundation.thermal.thermal; % A:right
B = foundation.thermal.thermal; % B:left
end
parameters
area = { 1e-4, 'm^2' }; % Área del serpentín
cond_length = { 20, 'm' }; % Ancho del lecho de zeolita
HCC = { 1, 'W/(m*K)' }; % Coeficiente de conductividad térmica
end
variables
Q = { 0, 'J/s' }; % Flujo calórico total
Ts = { 0, 'K' }; % Diferencia de temperature zeolita-refrigerante
end
branches
Q: A.Q -> B.Q;
end
equations
Ts == A.T - B.T;
if pasa == 0
Q == area*Ts*HCC/cond_length; % Ley de Fourier
else Q == 0.001*area*Ts*HCC/cond_length; % Calor residual
end
end
end
end

```

ANEXO 2.

Código en lenguaje Simscape de la barrera térmica de día:

```

component barrera_termica_dia
% Barrera_térmica_día
% Este componente abre o cierra una barrera de transmisión de la energía del
% ambiente al Zoule en una línea de calor
inputs
pasa = { 0, '1' }; % Dato de entrada para abrir o cerrar las barreras
end
nodes
A = foundation.thermal.thermal; % A:right
B = foundation.thermal.thermal; % B:left
end
parameters
area = { 1e-4, 'm^2' }; % Área del serpentín
HCC = { 20, 'W/(m^2*K)' }; % Coeficiente de convección
end
variables
Q = { 0, 'J/s' }; % Flujo calórico total
Ts = { 0, 'K' }; % Diferencia de temperatura zeolita-chasis

```

```
end
equations
Ts == A.T - B.T;
if pasa == 0
Q == 0.001*area * HCC * Ts; % Calor residual
else Q == area * HCC * Ts; % Convección ambiente->zeolita
end
end
end
```