

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NAS PAREDES DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA NOVOS PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Ricardo Panesi

Instituto Federal de São Paulo (IFSP), São Paulo, SP, Brasil

Adler N. de Souza

Instituto Federal de São Paulo (IFSP), São Paulo, SP, Brasil

Resumo: Este artigo apresenta a investigação da transferência de calor nas paredes de sistemas de refrigeradores domésticos usando a técnica de dinâmica de fluidos computacional (CFD) e visa determinar a importância relativa de cada parâmetro nos resultados da modelagem. Um modelo matemático compatível e sistemático é desenvolvido para estudar o efeito desses parâmetros. Os processos de transferência de calor considerados foram condução em sólidos e convecção livre como uma das condições de contorno do modelo para estado estacionário. Experimentalmente, diferentes temperaturas são obtidas (temperatura ambiente, paredes internas e temperatura do volume interno do refrigerador) de acordo com as condições internas e externas assumidas. O consumo de energia é obtido ao mesmo tempo usando um sensor de corrente via Arduino. Portanto, o objetivo principal é apresentar a relação entre o consumo de energia e o isolamento das paredes de refrigeradores domésticos por meio de requisitos de desempenho estabelecido pela Portaria do INMETRO, obtendo-se nesse caso um índice de eficiência energética de 97%.

Palavras-chave: Eficiência energética, CFD, Transferência de calor, Refrigeração, Energia

Abstract: This paper presents the investigation of heat transfer in the walls of domestic refrigerator systems using the computational fluid dynamics (CFD) technique and aims to determine the relative importance of each parameter in the modeling results. A compatible and systematic mathematical model is developed to study the effect of these parameters. The heat transfer processes considered were conduction in solids and free convection as one of the boundary conditions of the model for steady state. Experimentally, different temperatures are obtained (room temperature, internal walls and temperature of the internal volume of the refrigerator) according to the assumed internal and external conditions. The energy consumption is obtained at the same time using a current sensor Arduino. Therefore, the main objective is to present the relationship between energy consumption and insulation of the walls of domestic refrigerators through performance requirements established by the INMETRO standart, obtaining in this case an energy efficiency index of 97%.

Keywords: Energy efficiency, CFD, Heat transfer, Refrigeration, Energy

1 Introdução

A portaria número 322 de 02 de agosto de 2001 do INMETRO estabelece os requisitos de avaliação da conformidade para refrigeradores e assemelhados para a obtenção do selo de identificação da conformidade, na forma da etiqueta nacional de conservação de energia (ENCE). Ou seja, a portaria apresenta as regras para justificar se determinado fabricante de refrigeradores possui altos ou baixos índices de eficiência energética. Para isso, são apresentados determinados requisitos de desempenho que será discutido nesse trabalho através da utilização de um refrigerador como modelo para a identificação do índice de eficiência energética.

Assim, um sistema de refrigeração doméstica com anos de uso (frost-free) e sem produtos em seu interior é modelado numericamente e comparado com dados experimentais. Os parâmetros investigados são o consumo de energia do compressor hermético e o isolamento das paredes do refrigerador, com objetivos futuros de estudar novos parâmetros de eficiência energética. Devido ao aumento do consumo de energia e às preocupações com o aquecimento global, a eficiência energética da refrigeração doméstica ou comercial é uma questão de grande importância. Os sistemas de refrigeração apesar de consumirem uma parte significativa do total de energia utilizada em refrigeração, possuem também além disso práticas inadequadas de conservação de alimentos e que têm um impacto significativo nas doenças transmitidas no comércio de alimentação. (Laguerre et al., 2003). Uma compreensão completa dos mecanismos de transferência de calor e fluxo de ar dentro dos refrigeradores é essencial para melhorar a eficiência desses sistemas (Silva e Melo, 1998).

Maximizar a espessura do isolamento térmico nas paredes do refrigerador é um método promissor para aumentar a eficiência energética Christensen, (1981). Por exemplo, a espessura ideal de isolamento utilizando espuma de poliuretano é de 100 a 150 mm. Além disso, métodos de recuperação de calor residual são cruciais para melhorar o desempenho dos sistemas de refrigeração e reduzir o consumo de energia. (Wong et al., 2004).

Também, o uso de sistemas de aproveitamento de energia em refrigeradores domésticos pode contribuir na economia e nas reduções do custo de energia, reduzindo dessa forma também as emissões de gases de efeito estufa. Pramasick e

Das, (2005). Recentemente, painéis de isolamento a vácuo (VIPs) foram identificados como a próxima geração de isolamento térmico para equipamentos da cadeia do frio. Os VIPs podem atingir condutividade térmica tão baixa quanto 3 mW/mK , sete vezes menor que a espuma de PU (Alam et al., 2011). Thiessen et al. (2016) relataram uma redução de 21% no consumo de energia quando 56% da área de refrigeração foi coberta com VIPs de fibra de vidro. Hammond et al. (2014) calcularam um período de retorno de 9,7 anos quando o refrigerador foi isolado com VIPs com condutividade térmica de 4 mW/mK . Tao et al. (2004) relataram uma redução de 11,1% no consumo de energia com a instalação de VIPs nas paredes laterais de um refrigerador expositivo. A maior parte da eletricidade é consumida em sistemas de refrigeração comerciais ou domésticos. Como o volume externo é determinado, o volume interno de um sistema de refrigeração é importante para relacionar o consumo de energia. Portanto, a distribuição ideal do material de isolamento de acordo com as condições internas e externas do ambiente onde se encontra o refrigerador é muito importante conhecer que implica diretamente no impacto do consumo de energia (Demir 2018). Nesse trabalho, a metodologia inicia-se com as informações de modelagem via computador em seguida é apresentado o roteiro de obtenção do índice de classificação energética. Os resultados experimentais e computacionais são apresentados e as conclusões e referências são fornecias ao final do estudo.

2 Metodologia computacional

Utilizando software de modelagem computacional, é possível economizar tempo e despesas envolvidas no teste de transferência de calor e distribuição de temperatura nas paredes de refrigeradores. Para esta análise, a modelagem e simulação foram realizadas no software comercial COMSOL Multiphysics 5.2, que foi utilizado para construir um modelo tridimensional com o método dos elementos finitos. Para este modelo, foram assumidas as seguintes condições: estado estacionário e modelo compressível. O princípio da simulação baseou-se na transferência de calor em sólidos por condução e convecção.

2.1 Equações gerais

A interface de transferência de calor em sólidos resolve a seguinte equação obtida pelo software Comsol:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_{trans} \nabla T \right) + \nabla(q + q_r) = -\alpha T \frac{dS}{dt} + Q \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade (kg/m^3), C_p é a capacidade térmica específica a pressão constante ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), T é a temperatura absoluta (K), u_{trans} é o vetor de velocidade do movimento translacional (m/s), q é o fluxo de calor por condução (W/m^2), q_r é o fluxo de calor por radiação (W/m^2), α é o coeficiente de expansão térmica ($1/\text{K}$), S é o tensor de tensões de Piola-Kirchhoff de segunda ordem (Pa) e Q são fontes adicionais de calor (W/m^3).

O primeiro termo no lado direito da Equação 1 é o amortecimento termoelástico e leva em conta a expansão e contração térmica em sólidos. Para um problema em estado estacionário, a temperatura não muda com o tempo e os termos derivados no tempo desaparecem. Assim como o termo de transferência de calor por radiação onde nesse estudo é desprezado. O fluxo de calor convectivo nas fronteiras em contato com o fluido é então modelado como sendo proporcional à diferença de temperatura através de uma camada térmica fictícia. Matematicamente, esse fluxo de calor é descrito pela equação obtida via Comsol:

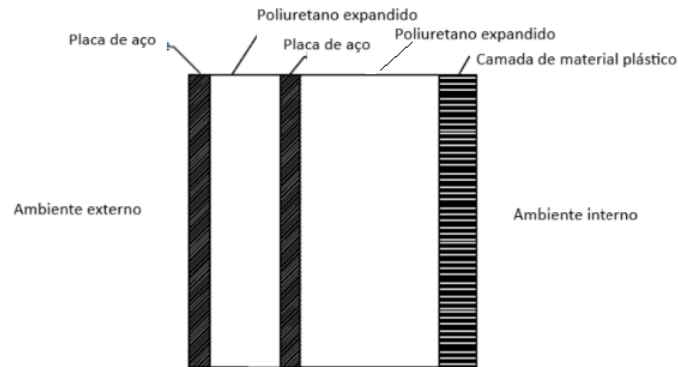
$$-nq = \bar{h}(T_e - T) \quad (2)$$

Onde \bar{h} é o coeficiente médio de transferência de calor e T_e é a temperatura do fluido externo distante da fronteira.

2.2 Domínio do modelo

Os parâmetros geométricos e o modelo das camadas são mostrados na Figura 1. Na Tabela 1 são listadas as dimensões geométricas da seção transversal estudada, e os parâmetros de entrada necessários para a simulação estão listados na Tabela 2.

Figura 1- Seção transversal da parede no modelo de refrigerador



Fonte: Dos próprios autores

Tabela 1- Parâmetros geométricos do modelo

Parâmetro (seção transversal)	Valor (mm)
Chapa de aço carbono	0,5
Espuma de poliuretano	5,0
Espuma de poliuretano	27,0
Revestimento plástico	1,5

Fonte: Dos próprios autores

Tabela 2- Parâmetros do modelo de transferência de calor utilizados

Parâmetro	Valor	Referência
Condutividade térmica da chapa de aço carbono	50 W/mK	COMSOL Multiphysics 5.2
Condutividade térmica da espuma de poliuretano	0,037 W/mK	COMSOL Multiphysics 5.2
Condutividade térmica do revestimento plástico	0,2 W/mK	COMSOL Multiphysics 5.2
Coefficiente de transferência de calor externo	30 W/m ² k	Frank Kreith, Raj M. Manglik. Princípios de Transferência de Calor. Ed. 1, São Paulo, Cengage Learning, 2010.
Coefficiente de transferência de calor interno	30 W/m ² k	Frank Kreith, Raj M. Manglik. Princípios de Transferência de Calor. Ed. 1, São Paulo, Cengage Learning, 2010.

Fonte: Dos próprios autores

3 Classificação da eficiência energética

Quando se trata de escolher um refrigerador, a eficiência energética é uma consideração importante. Um refrigerador eficiente em termos de energia não só ajuda

a reduzir sua pegada de carbono, mas também pode economizar dinheiro em suas contas de eletricidade. De acordo com a Portaria nº 332, de 2 de agosto de 2021, os refrigeradores e similares devem ser classificados de acordo com seu Índice de Eficiência Energética (I_e), que é definido como a razão entre o consumo mensal de energia declarado (CEM) e o consumo padrão (C_p), conforme representado pela Equação 3.

$$I_e = \frac{CEM}{C_p} \quad (3)$$

O Consumo Padrão (C_p) é definido como o consumo de energia equivalente ao Volume Ajustado e pode ser representado pela Equação 4.

$$C_p = a.VA + b \quad (4)$$

Onde:

$$a = 0,0916$$

$$b = 17,083$$

VA = Volume Ajustado

O Volume Ajustado (VA) pode ser representado pela Equação 5.

$$VA = 1,2.(V_r + \sum f.V_c) \quad (5)$$

Onde:

V_r = Volume do compartimento do refrigerador (L)

V_c = Volume do compartimento do congelador (L)

$$f = 1,85$$

Os índices máximos de eficiência para as classes de eficiência energética estão definidos na Tabela 3 disponibilizada pela Portaria nº 332, de 2 de agosto de 2021 e obtida experimentalmente pelo Inmetro.

Tabela 3- Índices máximos de eficiência de consumo de energia para as classes de eficiência energética (% em relação ao Cp) (obrigatórios a partir de 30/06/2022 e válidos até 30/12/2025)

Classificação	Refrigerador	Refrigerador frost-free	Refrigerador congelador	Refrigerador congelador frost-free	Congelador vertical	Congelador vertical frost-free	Congelador horizontal
A ⁺⁺⁺	59,9%	59,9%	59,2%	59,2%	59,9%	59,9%	59,9%
A ⁺⁺	68,4%	68,4%	67,7%	67,7%	68,4%	68,4%	68,4%
A ⁺	77,0%	77,0%	76,1%	76,1%	77,0%	77,0%	77,0%
A	85,5%	85,5%	85,5%	84,6%	85,5%	85,5%	85,5%
B	93,1%	93,1%	93,1%	92,1%	93,1%	93,1%	93,1%
C	97,2%	97,2%	97,2%	96,3%	97,2%	97,2%	97,2%

Fonte: Portaria nº 332, de 2 de agosto de 2021

O consumo mensal de energia (CEM) deve ser calculado usando a Equação 6.

$$CE_M = CE_D \cdot \left(\frac{30}{1000}\right) \quad (6)$$

O CED é o consumo de energia em Wh para 24 horas, com base na temperatura ambiente de 32°C.

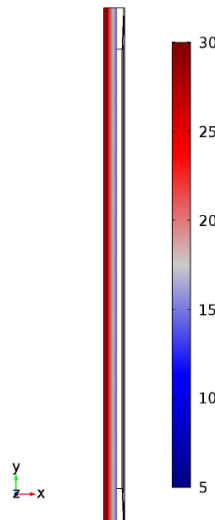
4 Resultados e discussões

4.1 Modelagem computacional

Neste trabalho, os dados experimentais são comparados com os resultados da modelagem, operando a 30 °C com temperatura externa e 4 °C de temperatura interna. A simulação inicial corresponde aos parâmetros indicados nas Tabelas 1 e 2, e os resultados são mostrados na Figura. 2 e na Figura. 3. A figura 2 apresenta a distribuição de temperatura obtida pelo software no sentido da esquerda para direita, isto é, a temperatura maior inicia-se pela face esquerda da figura proveniente da temperatura ambiente. A energia térmica caminha ao interior do compartimento do

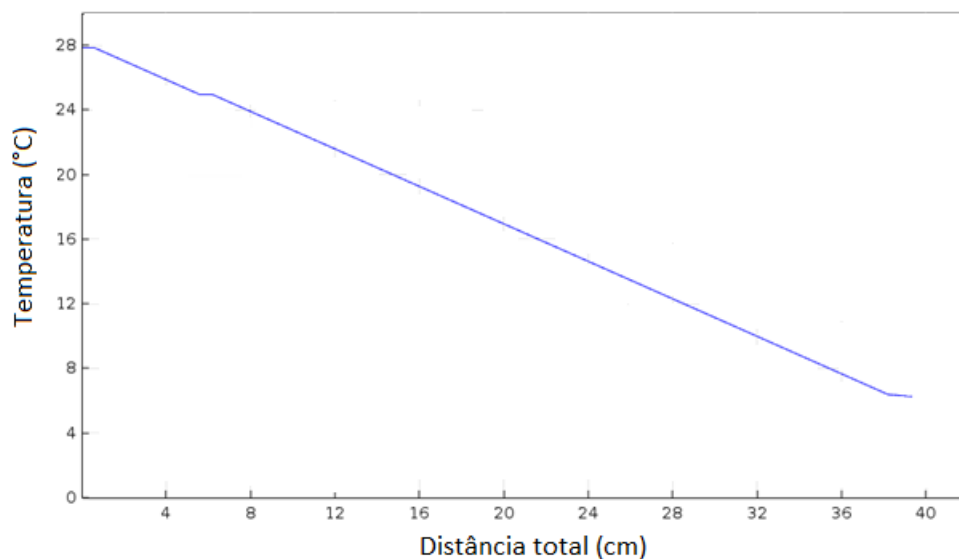
refrigerador apresentando valor menor em azul referente a temperatura interna do refrigerador.

Figura 2- Distribuição de temperatura na seção transversal da parede do compartimento inferior no modelo de refrigerador



Fonte: Dos próprios autores

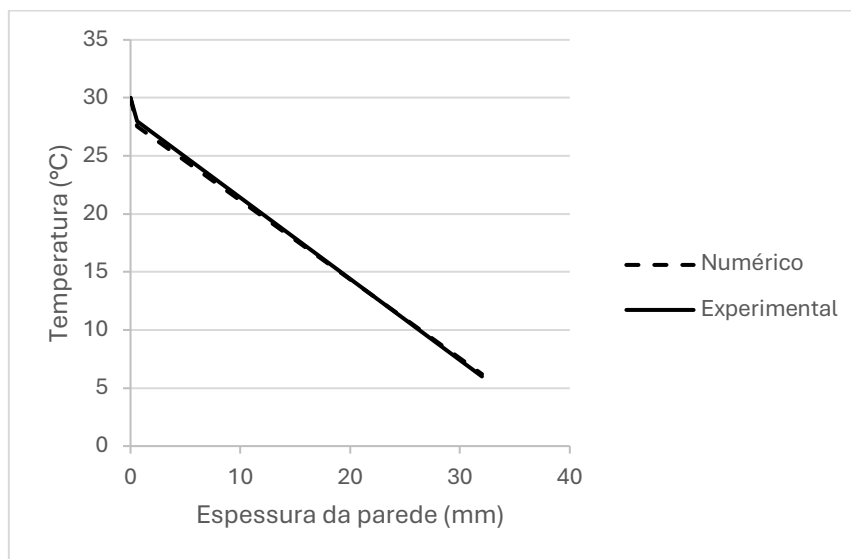
Figura 3- Gráfico de distribuição da temperatura na seção transversal da parede no modelo de refrigerador



Fonte: Dos próprios autores

A Figura 3 mostra a distribuição de temperatura no metal, plástico e isolante térmico obtida de forma computacional. No metal, a representação é uma linha constante, enquanto, ao atingir o isolamento, a temperatura diminui ao longo da espessura correspondente com grande resistência térmica. Em seguida, ao atingir a camada plástica no final da seção, a linha volta a ser representada por uma linha constante próxima a do metal, já que a camada plástica não é considerada um bom isolante térmico. Percebe-se ainda por essa figura que a parede externa do refrigerador se encontra próxima de 28°C (para uma temperatura ambiente de 30°C) enquanto a parede interna está próxima de 6°C. Já a figura 4 mostra a comparação numérica e experimental entre a queda de temperatura do ambiente externo e interno do refrigerador.

Figura 4- Comparação experimental e simulado da queda de temperatura entre o ambiente externo e interno



Fonte: Dos próprios autores

4.1.2 Relação entre o fluxo de calor nas paredes e o consumo de energia

Como relação entre o consumo de energia e as paredes do refrigerador destaca-se a taxa de calor transferida determinada numericamente nas paredes do refrigerador. A parede em estudo corresponde apenas ao compartimento inferior do equipamento. De acordo com as figuras 2 e 3 que representa apenas um lado do

refrigerador a taxa de transferência de calor calculada foi de 60,078 W. Essa taxa de calor é calculada pelo Comsol ao simular o programa dada pela equação (1). Se considerarmos cinco lados de paredes idênticas obteríamos um valor total aproximado de 300,4 W. Considerando que o refrigerador adotado opera termodinamicamente em um ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor por meio do refrigerante 134a, a Tabela 4 indica os parâmetros termodinâmicos encontrados de acordo com as temperaturas tiradas em campo de entrada do compressor igual a -5°C e saída igual a 65°C do compressor.

Tabela 4- Parâmetros termodinâmicos do R134a

Situação	T($^{\circ}\text{C}$)	P(bar)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
Entrada do compressor	-5	2,434	244,3	0,9219
Saída do compressor	60	18,89	286,6	0,9219
Saída do condensador	----	18,89	145,7	----
Entrada do evaporador	----	2,434	145,7	----

Fonte: Dos próprios autores

Aplicando a primeira lei da termodinâmica em regime permanente e desprezando-se as energias cinética e potencial e adotando a taxa de calor de 300,4W obtida via simulação, determina-se dessa forma a vazão em massa de refrigerante:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporador}}}{h_e - h_s} \quad (7)$$

Substituindo os valores:

$$\dot{m} = \frac{0,3004}{244,3 - 145,7} = 0,003047 \text{ kg/s}$$

A potência do compressor é determinada por:

$$W_{\text{comp}} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (8)$$

$$W_{\text{comp}} = 0,003047(286,6 - 244,3) = 0,1288 \text{ kW}$$

Consultando a Figura 5 observa-se que a potência do compressor medida é de 140W (potência máxima alcançada), portanto uma diferença de 8% entre a potência calculada e a potência medida.

4.2 Classificação de eficiência energética

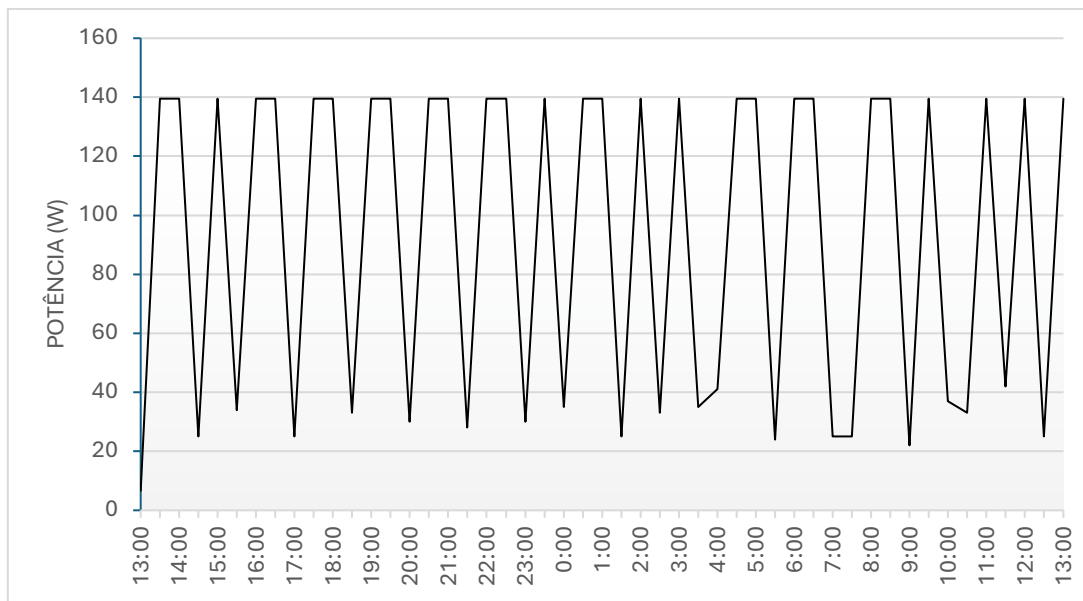
A Tabela 5 mostra os valores coletados do equipamento de refrigeração.

Tabela 5- Parâmetros medidos e calculados do refrigerador

Parâmetros	Valor
V_r	260 L
V_c	110 L
C_p	68,03
CE_D	2213,976 Wh
CE_M	66,4192 kWh
I_e	97%

Percebe-se pela Tabela 5 que o índice I_e obtido, de acordo com a Tabela 3, corresponde a classificação C. Índice mais baixo de classificação. O resultado da potência registrada ao longo de 24 horas é mostrado na Figura 5. O consumo mensal de energia declarado em kWh é obtido pela média da potência registrada multiplicada pelo tempo de 24h e, em seguida, multiplicada por 30 dias.

Figura 5- Potência registrada ao longo de 24 horas



Fonte: Dos próprios autores

5 Conclusões

O artigo apresentou um estudo de transferência de calor através da parede de um modelo de refrigerador doméstico frost-free. O objetivo principal foi relacionar o consumo de energia no compressor utilizando o método numérico comparando-o ao método experimental. Foi determinado o índice máximo de eficiência de consumo de energia de acordo com a classificação da tabela 3. Obtendo-se experimentalmente o índice de 97% considerado o menor da classificação. Para melhorar esse índice recomenda-se as seguintes modificações:

- Diminuição do consumo declarado CEM (compressores com maior COP);
- Monitoramento do termostato que controla o funcionamento do compressor;
- Modificações nas paredes que contém as respectivas espessuras de isolamento térmico e outros materiais do refrigerador;

Destaca-se que durante os experimentos a temperatura ambiente (30°C) foi diferente da temperatura adotada pela Portaria nº 332, de 2 de agosto de 2021 (32°C), isso pode ter contribuído pelo resultado do baixo valor do índice. O uso de simulação computacional auxilia de forma significativa os estudos de transferência de calor em meios sólidos e gasosos pela aplicação das principais equações físicas na

transmissão de calor por condução e convecção. Com o estudo numérico foi possível identificar a taxa de transferência de calor em uma das paredes do equipamento, estabelecendo dessa forma uma relação entre a taxa de calor simulada e o consumo de energia do compressor. Após os resultados encontrou-se uma diferença de apenas 8% entre o resultado numérico e o experimental da potência do compressor. Os resultados podem auxiliar em trabalhos futuros como por exemplo o projeto de paredes de refrigeradores e o consumo do componente compressor.

Conflito de interesses

Os autores declaram que não existe conflito de interesses nesse trabalho.

Referências

ALAM, M.; SINGH, H.; LIMBACHIVA, M. **Vacuum insulation panels (VIPs) for building construction industry a review of the contemporary developments and future directions**. Applied Energy, v. 88, n. 11, p. 3592-3602, 2011.

ASHAE HANDBOOK OF FUNDAMENTALS. S.I Edition, American Society of Heating, 2009.

CHRISTENSEN, L. B. **The insulation of freezers and refrigerators – how thick it should be?** International Journal of Refrigeration, v. 4, p. 73-76, 1981.

COMSOL MULTIPHYSICS. User's guide materials library.

DEMIR HAKAN. **Determination of optimum insulation thickness distribution for refrigerators**.

Journal of Natural and Applied Sciences. DOI: 10.19113/sdufbed.56037, 2018.

HAMMOND, E.; EVANS, J. **Application of vacuum insulation panels in the cold chain – analysis of viability**. International Journal of Refrigeration, p. 58-65, 2014.

LAGUERRE, O.; FLICK, D. **Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators**. Journal of Food Engineering, v. 62, p. 79-88, 2003.



FRANK K.; RAJ, M.; MARK, B. **Princípios de Transferência de Calor**. Ed. 1, São Paulo, Cengage Learning, 2010.

PORTARIA 322 DE 02 DE AGOSTO DE 2021. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Refrigeradores e Assemelhados – Consolidado. MINISTÉRIO DA ECONOMIA INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA-INMETRO.

PRAMACIK, A. K.; DAS, P. K. **Heuristics as an alternative to variational calculus for optimization of a class of thermal insulation systems**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, p. 1851-1857, 2005.

SILVA, L. W.; MELO, C. **Heat transfer characterization in roll-Bond evaporators**. M.Sc. Dissertation, Federal University of Santa Catarina, Brazil, 1998.

TAO, W.; HUAG, C.; HSU, C.; LIN, J. **Performance study of an energy-efficient display case refrigerator**. Chemical Engineering Communications, p. 550-565, 2004.

THIESSEN, S.; KNABBEN, F.; MELO, C. **An Experimental Study on the Use of Vacuum Insulation Panels in Household Refrigerators**. In: INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE, West Lafayette, IN, United States, 2016.

WONG, K. L.; CHOU, H. M.; HER, B. S.; YEH, H. C. **Complete heat transfer solutions of an insulated regular cubic tank with an SSWT model**. Energy Conversion and Management, v. 45, p. 2813-2831, 2004.