

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM CAMINHÕES BAÚ PARA OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE DE MORANGOS

Maurício Fernandes de Oliveira Assis, mauricio.a3347@ufob.edu.br¹

Iuri Benedito da Silva Santos, iuri.santos@ufob.edu.br¹

Kaelaine Carvalho da Silva, kaelaine.s3106@ufob.edu.br¹

Kathrine Vogado Nepunuceno Paixão, kathrine.p9478@ufob.edu.br¹

¹Centro Multidisciplinar Universidade Federal do Oeste da Bahia, Av. Manoel Novaes, 1064, Centro, Bom Jesus da Lapa/BA, 47600-000

Resumo. O morangueiro (*Fragaria sp.*) é amplamente consumido, mas apresenta elevada perecibilidade devido à sua sensibilidade à temperatura e à rápida desidratação, o que torna o transporte refrigerado um grande desafio. Este estudo avaliou, por meio de simulações numéricas com o software Ansys Fluent®, a influência da posição do sistema de refrigeração na distribuição de temperatura e umidade relativa dentro de um baú frigorífico utilizado no transporte de morangos. Foram analisados dois cenários: Caso A, com o sistema de ar horizontal (convencional), e Caso B, com o ar-condicionado posicionado verticalmente no teto. A modelagem computacional mostrou-se eficiente para analisar os fenômenos de transferência de calor e escoamento. Os resultados indicaram que o Caso B promove melhor circulação de ar, resultando em menor temperatura média (4,696 °C contra 6,190 °C no Caso A) e distribuição mais uniforme de temperatura e umidade relativa. Constatou-se também que as regiões críticas de temperatura no Caso B não afetam diretamente as caixas de morango. O estudo conclui que o posicionamento vertical do sistema de refrigeração melhora significativamente as condições térmicas internas, favorecendo a conservação dos frutos durante o transporte e reduzindo perdas pós-colheita.

Palavras chave. Transporte Refrigerado, Dinâmica dos Fluidos Computacional, Conservação Pós-Colheita.

Abstract. Strawberries (*Fragaria sp.*) are widely consumed fruits but highly perishable due to their sensitivity to temperature and rapid dehydration, making refrigerated transport a major challenge. This study evaluated, through numerical simulations using Ansys Fluent® software, the influence of the cooling system's position on temperature and relative humidity distribution inside a refrigerated truck used for strawberry transport. Two scenarios were analyzed: Case A, with a conventional horizontal cooling unit, and Case B, with the cooling system vertically positioned on the ceiling. Computational modeling proved effective for analyzing heat transfer and airflow phenomena. The results indicated that Case B provided better air circulation, resulting in a lower average temperature (4.696 °C versus 6.190 °C in Case A) and a more uniform distribution of temperature and relative humidity. It was also observed that the critical temperature zones in Case B did not directly impact the strawberry boxes. The study concludes that the vertical positioning of the cooling system significantly improves the internal thermal conditions, enhancing fruit preservation during transport and reducing post-harvest losses.

Keywords: Refrigerated Transport, Computational Fluid Dynamics (CFD), Postharvest Preservation.

1. INTRODUÇÃO

O morangueiro é uma planta amplamente cultivada e consumida em todo o mundo, sendo uma das principais hortaliças-fruto (Alves et al., 2019). Pertencente à família Rosácea e ao gênero *Fragaria* que engloba 23 espécies, o morango é valorizado pelos consumidores devido ao seu aroma, sabor levemente ácido, textura macia e como característica coloração vermelho-brilhante (Lafarga et al., 2019).

Um dos grandes desafios na produção do morango é sua vida pós-colheita, pois ele possui comportamento não-climático (isto é, só pode ser colhido quando reúne características adequadas ao consumo), sendo um produto extremamente perecível devido à sua rápida desidratação, o que pode resultar em perdas de até 40% da produção durante o armazenamento da fruta (Sharma, 2014; Hajji et al., 2018). De acordo com Kumar (2018), a perda de produção é devido às limitações técnicas de colheita, tecnologia inadequada, infraestrutura de armazenamento deficiente e demora no transporte das frutas.

Além disso, as atividades pós-colheita devem ser feitas no menor tempo possível devido à fragilidade do morango e a sua grande sensibilidade à elevação de temperatura. Assim, essa rapidez visa evitar a elevação da atividade metabólica do fruto, buscando que este chegue nas melhores condições de consumo para o cliente final (Costa, 2006).

Segundo Watkins (2017), uma das partes mais importante para manter a qualidade do morango é a temperatura, pois segundo a regra de Van't Hoff, um aumento de 10 °C na temperatura ambiente pode duplicar as taxas de reações químicas, causando uma diminuição de até um terço da vida útil das frutas, legumes e verduras (FLVs).

Ademais, a distribuição da temperatura irregular nos contêineres refrigerados corrobora para desafios significativos na conservação da qualidade dos produtos em colheita. Nesse sentido, uma melhor distribuição da temperatura pode assegurar uma melhoria na capacidade de refrigeração, mitigar o consumo de energia e garantir uma melhor qualidade do produto. Dessa forma, torna-se necessário aperfeiçoar a distribuição da capacidade do equipamento de transporte (Bin *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a modelagem da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) torna-se uma alternativa viável, visto que a determinação experimental das condições ideais de armazenamento é dificultada pela complexidade dos fenômenos de transferência de calor e pela geometria específica das câmaras frigoríficas (Ghiloufi; Khir, 2019). Por exemplo, Bin *et al.*, (2020) explorou a distribuição de temperatura no contêiner por meio de simulação numérica, que incluiu a velocidade de ventilação e a localização do ventilador.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo aplicar o *software* Ansys® para avaliar a distribuição de temperatura em um baú frigorífico durante o transporte de morangos. Além disso, busca-se analisar uma alternativa da posição convencional do ventilador para obter uma distribuição de temperatura mais eficiente. A simulação visa entender e otimizar a distribuição térmica dentro do baú frigorífico, garantindo a preservação da qualidade dos morangos durante o transporte.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi dividido em pré-processamento, processamento e pós processamento, com detalhes da configuração da modelagem numérica, as especificações das dimensões do baú frigorífico, criação da geometria, geração da malha e condições de contorno. Neste trabalho, foi utilizado o *software* Ansys® (*Ansys Fluent*) em um notebook Acer Nitro 5, I5 12ª geração com 32 GB de memória RAM e placa de vídeo Nvidia RTX 3050.

Inicialmente, a criação da geometria do baú frigorífico foi realizada por meio da ferramenta do Ansys®, *Design Modeler*, com dimensões de 5 metros de comprimento, 2 metros de largura e 3 metros de altura, planejada para acomodar caixas de morango empilhadas, que tinham 2,55 metros de altura. Além disso, os espaçamentos estabelecidos foram de 20 cm nas laterais e 40 cm na parte superior das caixas, visando garantir a circulação adequada do ar refrigerado.

Com isso, foram considerados dois modelos de baús refrigerados: o primeiro, denominado Caso A, com sistema de ar condicionado tipo split horizontal convencional (1,0 m × 0,3 m × 0,3 m); e o segundo, Caso B, com sistema de insuflamento vertical instalado no teto (0,8 m × 0,4 m × 0,2 m). Ambos os modelos foram projetados para manter a temperatura interna controlada e preservar a qualidade dos morangos durante o transporte e armazenamento (Fig. 1)

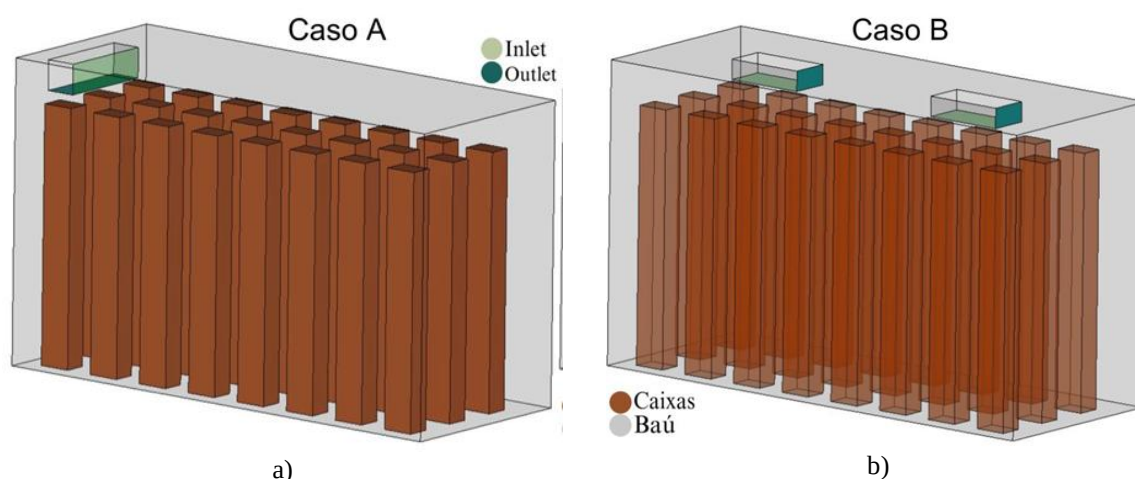


Figura 1. Domínio computacional: a) Caso A; b) Caso B (Autores, 2025)

Em seguida, utilizou-se o módulo *Ansys Meshing*, que oferece uma ampla variedade de recursos para geração de malhas. Em ambos os casos, foi aplicado o método automático da ferramenta com refinamento da malha. As condições de contorno adotadas em cada caso estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Condições de contorno (Autores, 2025)

Região	Pressão (Pa)	Velocidade (m/s) (x y z)	Temperatura (°C)	Fração de água	Caso
Inlet	-	(1 0 0)	0	0,0036	Caso A
Outlet	0	-	25	0,0036	Caso A
Inlet	0	(0 0 0,5)	0	0,0036	Caso B
Outlet	0	-	25	0,0036	Caso B
Caixas	-	noSlip	25	-	Caso A e B
Baú	-	noSlip	25	-	Caso A e B

Para a superfície “*Inlet*” foi aplicado a condição de valores conhecidos e constantes para a velocidade (nas coordenadas x, y e z), temperatura e fração de água. Em seguida, para a “*Outlet*” foi adotado na saída as condições de valores conhecidos e constantes para a pressão, temperatura e fração de água. Ademais, a velocidade foi estabelecida a condição de não escorregamento para as regiões “Caixas” e “Baú”.

Por fim, foi aplicado uma temperatura inicial de 25 °C para as superfícies “Caixas” e “Baú” com o coeficiente convectivo de 0,3 e 1,3 W/m².K, respectivamente. Vale ressaltar, como o estudo avalia qual a posição do ar condicionado tem a melhor distribuição, foi adotado o mesmo coeficiente para ambos os casos. Assim, a fração de água definida foi por meio da análise na tabela psicrométrica, onde relaciona a temperatura, fração de vapor e umidade relativa.

Em relação a fase de processamento, foi definido um fator de relaxamento de 0,3 para energia e 0,5 para pressão, para mais, o modelo de turbulência utilizado foi k-Epsilon e os critérios de convergência foi 10⁻⁵ para a energia e 10⁻⁴ para a pressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos parâmetros adotados e após o processamento, a malha obtida para o domínio computacional é apresentada na Tab. 2.

Tabela 2. Resultado da malha obtida com refinamento (Autores, 2025)

	Caso A	Caso B
Tamanho do elemento (m)	Número de elementos	Número de elementos
0,2	26978	27041
0,15	61523	61577
0,1	184876	184959
0,075	396017	398046
0,065	582106	584759

A Figura 2 apresenta um gráfico da independência de malha do Caso A e Caso B, avaliando a temperatura média das caixas em relação ao número de elementos, ou seja, avaliando o número de elementos que resultaram de forma precisa, com baixo custo computacional.

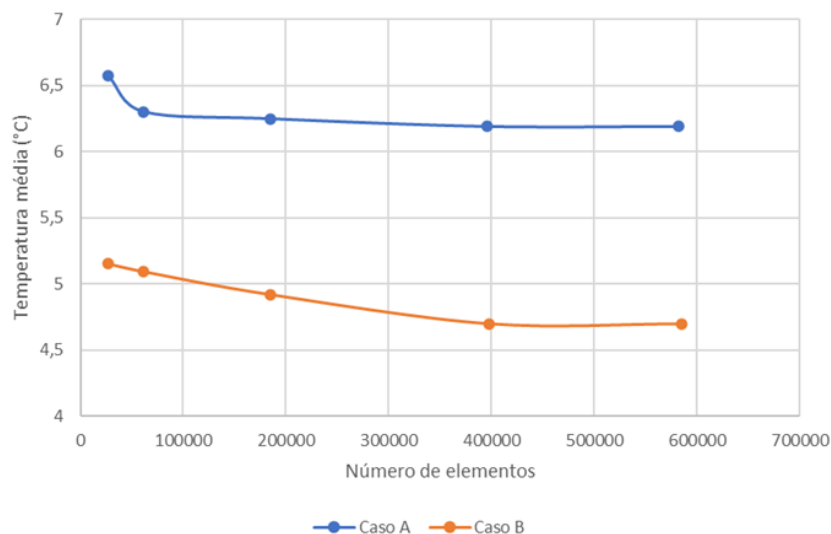


Figura 2. Independência de malha (Autores, 2025)

Com isso, não houve variação significativa na temperatura média das caixas quando o número de elementos variou entre 396017 e 582106 para o Caso A e entre 398046 e 584759 para o Caso B. Além disso, as temperaturas registradas foram de 6,190 °C para o Caso A e 4,696 °C para o Caso B. Dessa forma, a penúltima malha corresponde um resultado com menor custo computacional, sem alteração nos resultados finais.

Ademais, em ambos os casos o tempo de simulação variou de acordo com a resolução da malha utilizada, o tempo mencionado é a média dos casos para cada resolução de malha. Para a primeira malha, o tempo de simulação foi de 30 minutos. Na segunda malha, esse tempo aumentou para 45 minutos. Já para a terceira malha, o tempo de simulação foi de 1 hora e 30 minutos. A quarta malha demandou 3 horas e 30 minutos de simulação, enquanto a malha mais refinada exigiu um tempo significativamente maior, totalizando 7 horas de simulação. Esse aumento progressivo no tempo de simulação reflete o maior número de elementos na malha, que demandam mais cálculos computacionais para serem resolvidos, resultando em uma análise mais detalhada e precisa do fenômeno em estudo.

Outrossim, a Fig. 3 apresenta o comportamento do campo de velocidade do Caso A, em que o ar flui ao longo de todo o comprimento do baú antes de retornar. Com valor máximo de velocidade do ar de 1,531 m/s encontrada na região de saída.

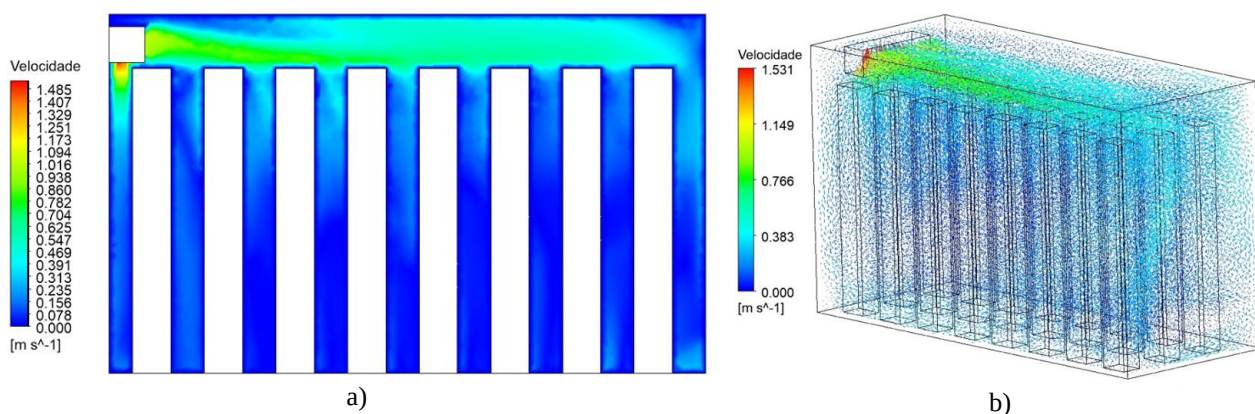


Figura 3. Caso A: a) Campo de velocidade; b) Campo vetorial de velocidade (Autores, 2025)

Ademais, em relação ao caso B a Fig. 4 mostra o campo de velocidade, com valor máximo de velocidade do ar de 3,034 m/s encontrada na região de saída.

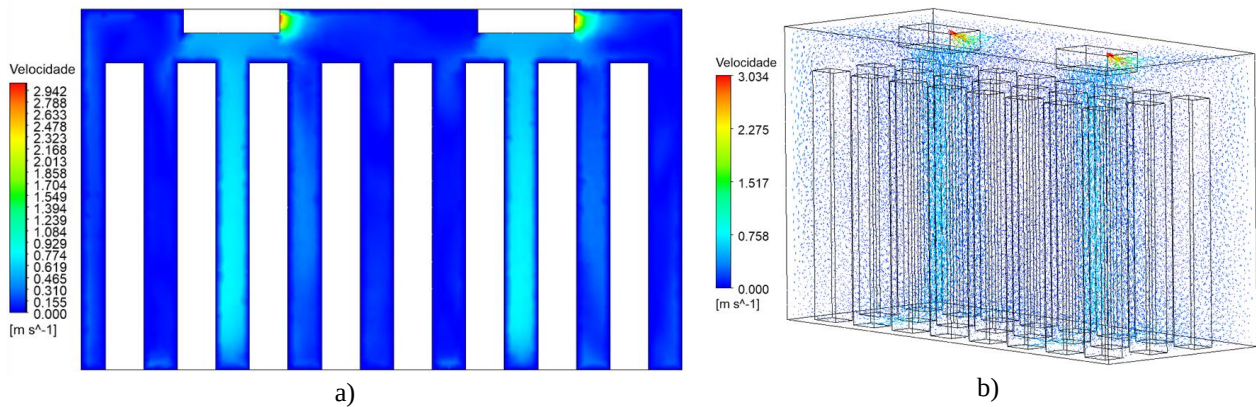


Figura 4. Caso B: a) Campo de velocidade; b) Campo vetorial de velocidade (Autores, 2025)

Desta forma, é evidente que o Caso B demonstra uma circulação de ar mais eficiente em comparação com o Caso A. Isso se deve à presença de duas unidades evaporadoras e ao fato de que o ar, ao atingir o piso do baú, retorna de forma ascendente no Caso B. Além disso, a circulação mais eficiente do ar nesse caso resulta em uma distribuição mais uniforme de temperatura em todo o espaço, assim, a diferença nos valores máximos de velocidade indica uma maior eficiência na circulação do ar no Caso B, contribuindo para uma distribuição mais homogênea de temperatura.

Adicionalmente, em relação a distribuição da temperatura no baú do caminhão, a Fig. 5 a) mostra a distribuição de temperatura no Caso A e a Fig. 5 b), no Caso B.

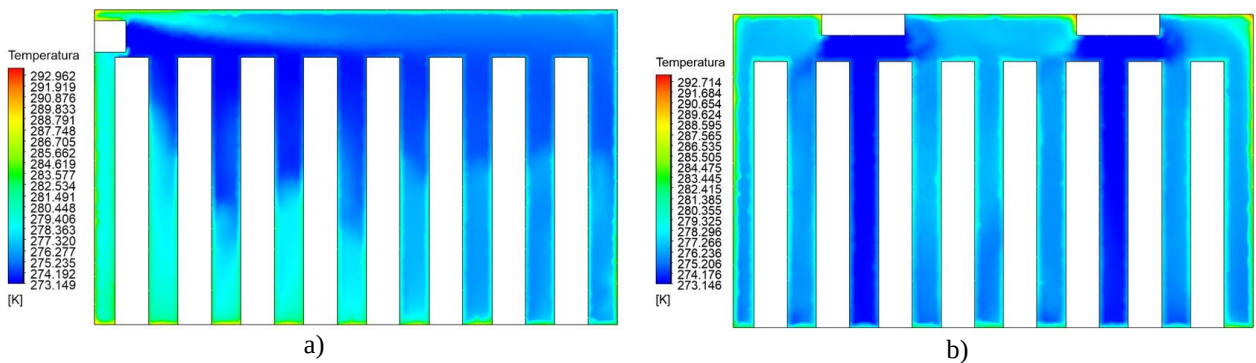


Figura 5. Campo de temperatura: a) Caso A; b) Caso B (Autores, 2025)

Ao observar os resultados, é possível destacar que o Caso B apresenta uma distribuição de temperatura mais uniforme em comparação com o Caso A. Isso se deve à circulação mais eficiente do ar no Caso B, conforme discutido anteriormente. No Caso A, o valor médio de temperatura registrado foi de 6,190 °C, enquanto no Caso B foi de 4,696 °C. Essa diferença nos valores médios de temperatura reflete a influência da circulação do ar na distribuição térmica dentro do baú refrigerado.

Além disso, os pontos de maior temperatura do Caso A é na região inferior do baú, ou seja, a tendência é os frutos nessas regiões tenham uma vida útil menor e uma qualidade afetada pela temperatura. Por outro lado, a região onde encontra-se as maiores temperaturas do Caso B é na parte superior do baú, onde há o espaço para circulação do ar, isto é, não há impacto direto nas caixas.

De maneira adicional, a Fig.6 ilustra visualmente a distribuição da umidade relativa para os Casos A e B. Ao observar essas figuras, podemos verificar como a circulação do ar afeta diretamente a distribuição da umidade relativa dentro do baú refrigerado. Essa análise reforça a importância de uma circulação eficiente do ar para garantir uma distribuição uniforme da umidade relativa e, consequentemente, a preservação da qualidade dos morangos durante o transporte.

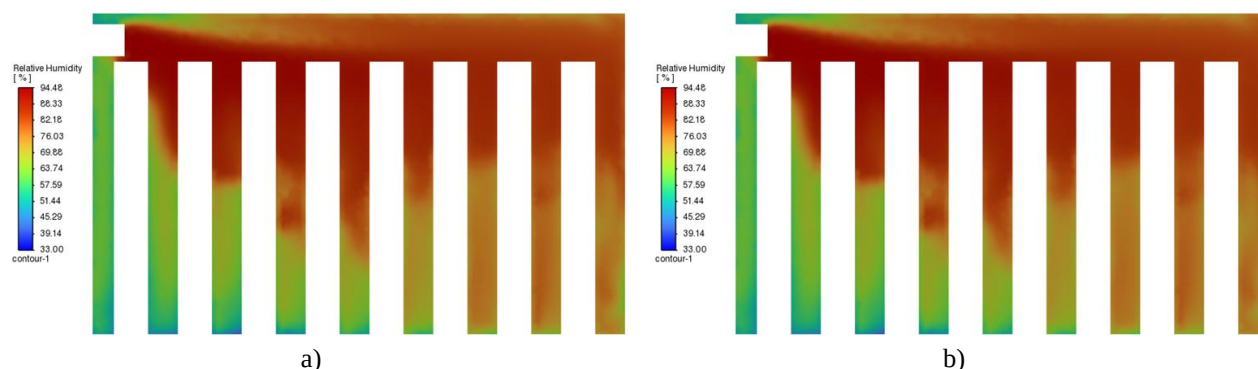


Figura 6. Campo de umidade relativa: a) Caso A; b) Caso B (Autores, 2025)

Ao analisar os resultados dos Casos A e B, foi possível observar que o Caso B apresentou uma distribuição mais uniforme da umidade relativa em comparação com o Caso A. Isso também se deve à circulação mais eficiente do ar no Caso B, que contribui para uma distribuição mais homogênea da umidade relativa em todo o espaço do baú refrigerado. Assim, essa distribuição contribui significativamente para manter os morangos frescos e suculentos durante o transporte, garantindo assim sua qualidade até o destino final.

3. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o posicionamento do sistema de refrigeração influencia diretamente a eficiência térmica no interior de baús frigoríficos utilizados para o transporte de frutas perecíveis, como o morango. O Caso B, com sistema de ventilação vertical, apresentou desempenho superior ao Caso A, garantindo uma distribuição mais uniforme de temperatura e umidade relativa, condições fundamentais para prolongar a vida útil e preservar a qualidade dos frutos.

Dessa forma, a aplicação de simulações CFD se mostra uma ferramenta eficaz na otimização de projetos de transporte refrigerado, permitindo identificar configurações mais eficientes sem a necessidade de inúmeros testes experimentais. Recomenda-se, portanto, a adoção do posicionamento vertical como alternativa viável para o transporte de produtos sensíveis à temperatura.

4. REFERÊNCIAS

- Bin, Li & Guo, Jiaming & Xia, Jingjing & Wei, Xinyu & Shen, Hao & Cao, Yongfeng & Lu, Huazhong & Lü, Enli. (2020). "Temperature Distribution in Insulated Temperature-Controlled Container by Numerical Simulation. *Energies*". 13. 4765. 10.3390/en13184765.
- Costa, H., & Ventura, J. A., 2006. "Manejo integrado de doenças do morangueiro". *SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO*, 3, 17-28.
- Ghiloufi, Z., & Khir, T., 2019. "CFD modeling and optimization of pre-cooling conditions in a cold room located in the South of Tunisia and filled with dates". *Journal of food science and technology*, 56(8), 3668-3676.
- Hajji, S., Younes, I., Affes, S., Boufi, S., & Nasri, M., 2018. "Optimization of the formulation of chitosan edible coatings supplemented with carotenoproteins and their use for extending strawberries postharvest life". *Food Hydrocolloids*, 83, 375-392.
- Kumar, S., Shukla, A., Baul, P. P., Mitra, A., & Halder, D., 2018. "Biodegradable hybrid nanocomposites of chitosan/gelatin and silver nanoparticles for active food packaging applications". *Food packaging and shelf life*, 16, 178-184.
- Lafarga, T., Colás-Medà, P., Abadías, M., Aguiló-Aguayo, I., Bobo, G., & Viñas, I., 2019. "Strategies to reduce microbial risk and improve quality of fresh and processed strawberries: A review". *Innovative food science & emerging technologies*, 52, 197-212.
- Sharma, N. (Ed.), 2014. "Biological controls for preventing food deterioration: strategies for pre-and postharvest management". John Wiley & Sons
- Watkins, C.B. "Postharvest physiology of edible plant tissues". In: DAMODARAN, S., PARKIN, K.L. (Eds.) *Fennema's Food Chemistry*. 5a ed. Boca Raton: CRC Press, ch. 16, 1017-1085, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315372914>.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.