

ARTIGO ORIGINAL

**Modelo preditivo para monitoramento da temperatura em contêineres
reefer**

Predictive model for temperature monitoring in reefer containers

Luis Henrique Lorenzi¹, Carise Elisane Schmidt^{2*} & Leandro Chies³

Avaliação: *Double Blind Review* (009/OJS)

Recebido: 23/12/2024 Aceito: 30/12/2024

Palavras-chave:

Cadeia do frio;
Produtos
perecíveis;
Modelo térmico.

Resumo: Monitorar a temperatura de produtos perecíveis, especialmente em cargas sensíveis à variação de temperatura, é um desafio para os profissionais que atuam na cadeia do frio. A temperatura desempenha um papel crítico na preservação da qualidade dos alimentos, e variações inadequadas podem acelerar a deterioração dos produtos transportados. Um grande desafio durante o transporte é o gerenciamento da temperatura em contêineres *reefer*. Soluções para auxiliar nesse monitoramento têm-se tornado cada vez mais importantes, em virtude do alto valor agregado nas cargas. O objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo preditivo para monitoramento da temperatura interna em contêineres do tipo *reefer*. A proposta faz analogia ao modelo térmico baseado no fluxo de calor, adaptado a produtos com propriedades térmicas semelhantes. Com o auxílio de APIs, foram coletados dados sobre condições climáticas que alimentam o modelo. A metodologia foi testada e validada em condições reais, gerando resultados que acompanham as variações reais da temperatura interna, registradas pelo sensor. Os dados produzidos representam uma informação importante para o monitoramento da temperatura interna do contêiner e a tomada de decisão, visando a manutenção da integridade dos produtos transportados.

Keywords:

Cold Chain;
Perishable
Products;
Thermal Model.

Abstract: Monitoring the temperature of perishable products, particularly in shipments sensitive to temperature variations, poses a challenge for professionals in the cold chain. Temperature plays a critical role in preserving food quality, and improper variations can accelerate the deterioration of transported products. A major challenge during transportation is managing the temperature within reefer containers. Solutions to support this monitoring have become increasingly important due to the high value of the shipment. This study aimed to develop a predictive model for monitoring the internal temperature of reefer containers. The proposed model draws an analogy to a thermal model based on heat flow, adapted to products with similar thermal properties. With the support of APIs, data on weather conditions were collected to feed the model. The methodology was tested and validated under real conditions, yielding results that track the actual internal temperature variations recorded by the sensor. The data generated provide important information for monitoring the container's internal temperature and for decision-making, aimed at maintaining the integrity of the transported products.

URL: https://mobicities.com/index.php/path/article/view/9/Artigo_2

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14884396>

¹ IFSC - Chapecó, e-mail: luislorenzi00@gmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-5904-7440>

^{2*} Autor correspondente: IFSC - Chapecó, e-mail: carise_schmidt@hotmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2274-1953>

³ IFSC - Chapecó, e-mail: leandro.chies@ifsc.edu.br, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7463-4688>

1. Introdução

Dados recentes revelam que 30% dos alimentos produzidos no Brasil são perdidos, o que representa 46 milhões de toneladas. As etapas de distribuição, armazenamento e transporte ocupam uma posição especialmente preocupante nesse cenário, mas podem ser reduzidas (König & Sousa Junior, 2021; Sobral, 2024).

A cadeia do frio está inserida nesse contexto. Ela engloba toda a logística para garantir a manutenção de uma temperatura controlada em produtos sensíveis, desde a fábrica até o consumidor final (Carvalho, 2013).

Atualmente, o transporte rodoviário de produtos perecíveis é realizado de duas formas. Quando destinado ao mercado interno, o produto é acondicionado em recipientes, conforme o tipo de carregamento, e transportado em carretas frigoríficas. Já quando o destino é a exportação ou importação, o produto é acondicionado e transportado em contêineres refrigerados, também conhecidos por *reefer*.

Cargas transportadas por contêineres refrigerados possuem elevado valor agregado e, na maioria das vezes, possuem uma pequena janela de validade quando comparados a outros produtos. Isso ocorre devido à complexidade logística envolvida, que demanda uma execução ágil e altamente confiável para esse tipo de operação (Filina & Filin, 2008).

Para garantir a integridade aos produtos na cadeia do frio, são utilizados dispositivos de monitoramento. Porém, fatores como limitação de recursos e os custos financeiros das atuais tecnologias tornam difícil o seu uso durante o transporte rodoviário. Outro fator importante é que a unidade de refrigeração é alimentada por uma fonte de energia externa. Essas fontes podem ser geradores independentes, conexões elétricas em terminais portuários ou navios, e representam um fator essencial para manter o sistema de refrigeração funcionando. Assim, a garantia de qualidade e integridade dos produtos está associada tanto a um sistema de monitoramento adequado quanto à disponibilidade de fontes de energia externa sempre que necessário.

No cenário atual, prever o trajeto máximo que um veículo pode percorrer até que seja necessário conectar o contêiner a energia é um grande desafio no transporte rodoviário de contêineres *reefer*. Nesse contexto, é importante dispor de dados de previsão da oscilação de temperatura dentro do contêiner.

Tendo em vista essa temática, foi proposto este estudo. O objetivo é propor um modelo preditivo para estimar a temperatura interna em contêineres refrigerados, considerando uma carga de produtos perecíveis. Esse processo engloba a utilização de ferramentas para a coleta de dados, previsões da

temperatura ambiente, além da aplicação de conceitos de modelo térmico e fluxo de calor para a geração do modelo de previsão.

2. Referencial teórico

Na literatura, pesquisas que envolvem essa temática ainda são limitadas. Em um estudo realizado por Badia-Melis et al. (2016), foram avaliados métodos de previsão de temperatura para frutas em contêineres *reefer*. Para isso, foram simuladas falhas no sistema de refrigeração do contêiner, em função do perfil de temperatura diário. Para obtenção dos dados, os autores usaram 5 *tags* RFID em cada palete de frutas. Três ferramentas foram avaliadas (método Kriging, modelo de transferência térmica e modelo de previsão de séries temporais com redes neurais artificiais). O modelo de transferência térmica apresentou a menor raiz do erro quadrático médio (RMSE), sendo igual a 1,28 °C. Segundo os autores, métodos fundamentados na transferência térmica são adequados para aplicações em que há fluxo de energia térmica e a alteração da temperatura das mercadorias, conforme suas respectivas propriedades.

No estudo realizado por Pattanaik et al. (2023), os autores apresentam uma solução para mapear o perfil de distribuição de temperatura dentro de contêineres *reefer*, durante o transporte. Três modelos distintos são treinados três modelos distintos (Redes Neurais, XGBoost e Floresta Aleatória), a partir de dados de simulação numérica. Sensores instalados dentro dos contêineres são usados para coletar dados de temperatura em tempo real, os quais são transmitidos para uma plataforma de nuvem IoT para análise. Os resultados revelaram que o modelo de Floresta Aleatória superou os demais, produzindo os menores erros em diversas métricas de avaliação. Os autores ressaltam que modelos baseados em dados podem ser usados como uma alternativa confiável para prever a temperatura dentro de um contêiner refrigerado em um processo de transporte. Além disso, segundo eles, com despesas computacionais menores, os modelos podem ser utilizados para previsão de temperatura em tempo real, fazendo o uso das informações de sensores instalados nos contêineres refrigerados. Contudo, a abordagem possui certas limitações para uma aplicação mais ampla, visto que o uso de sensores é um pré-requisito, tornando necessário sua instalação.

Abreu (2004) apresentou e validou um método simples para estimar a temperatura interna de residências. Segundo a autora, isso permite comparar o comportamento térmico em diferentes ambientes, verificando se as temperaturas internas atendem aos critérios de desempenho térmico estabelecidos pelas normas de conforto da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Dados de temperatura interna e ambiente foram coletados em oito ambientes de três

residências em Florianópolis, ao longo de um ano. O método proposto calcula estimativas para a temperatura interna em diferentes intervalos de tempo (horário, média, máxima e mínima diárias) a partir da temperatura ambiente, utilizando técnicas estatísticas como média móvel e análise de regressão linear. Para validar o método, uma segunda medição de temperatura foi realizada em duas das três residências. A incerteza do método foi avaliada comparando temperaturas internas estimadas e medidas. Apesar de alguns erros inerentes ao método, a faixa de incerteza foi considerada aceitável pela autora para a maioria dos ambientes estudados. Os erros médios de estimativa variaram entre 0,65 °C e 2,0 °C e, em 95% dos casos, eles estavam dentro da faixa de -2,0 °C e 2,0 °C. O maior erro médio de estimativa foi para a temperatura interna máxima, atingindo 2,4 °C. Os resultados mostraram uma correlação entre as temperaturas internas e ambiente, possibilitando a estimativa de uma a partir da outra. Foi evidenciado ainda que as equações para estimativa da temperatura interna são específicas de cada ambiente.

3. Procedimentos metodológicos

A metodologia aplicada neste estudo é composta por uma etapa inicial, que compreendeu a modelagem do problema, seguida pela proposição do modelo preditivo para a temperatura interna do contêiner e obtenção dos seus parâmetros. Na sequência, esse modelo foi aplicado, por meio de simulação computacional, e os resultados validados. Essas etapas são detalhadas a seguir.

3.1 Modelagem

A transferência de calor pode ser compreendida através do fluxo de energia térmica, que ocorre quando há transferência de energia entre dois corpos que possuem temperaturas distintas. Os modelos dinâmicos dos sistemas de controle de temperatura consideram tanto o fluxo quanto o armazenamento dessa energia térmica. O fluxo de calor q , através de substâncias, é diretamente proporcional à diferença de temperatura presente nessas substâncias (Franklin et al., 2013), e pode ser representado conforme expressa a Eq. 1.

$$q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

onde a diferença entre T_1 e T_2 representa a variação de temperatura (ou ΔT), dada em °C, e R a resistência térmica, dada em °C/(J/s). Além disso, o fluxo de calor em uma substância muda a taxa de variação da temperatura de forma inversamente proporcional à capacitância térmica C , que reflete a propriedade de um material em absorver e reter calor (Franklin et al., 2013) como expressa a Eq. 2, onde \dot{T}

representa a taxa de variação da temperatura ao longo do tempo. A capacitância térmica é dada em $J/^\circ C$ e o fluxo de calor em J/s .

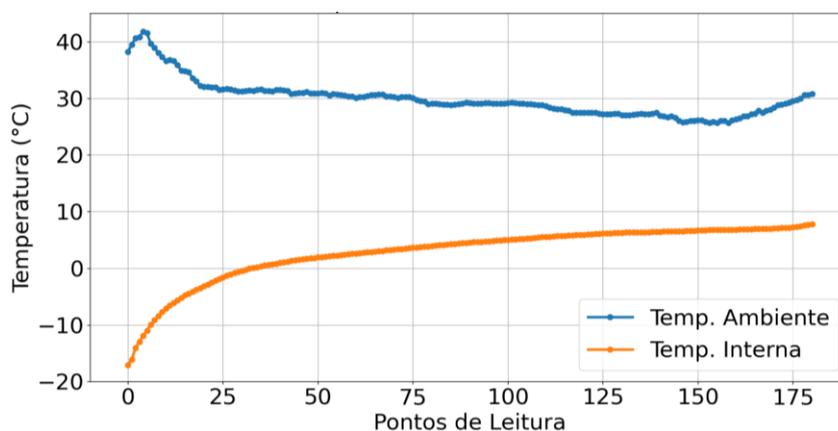
$$\dot{T} = \frac{1}{c} q \quad (2)$$

A relação entre o fluxo de calor e a capacitância térmica desempenha um papel crucial na compreensão das mudanças de temperatura. Isso permite a análise e a previsão das variações de temperatura para cada categoria de produto.

3.2 Modelo Térmico

Para ilustrar como o modelo preditivo é construído e como ocorre a obtenção dos parâmetros desse modelo térmico, foi utilizada uma série temporal com registro das variações da temperatura interna e ambiente durante o transporte rodoviário de uma carga acondicionada em um contêiner refrigerado. A Figura 1 ilustra a variação dessas temperaturas ao longo da série.

Figura 1 – Gráfico da série temporal das temperaturas ambiente e interna de um contêiner



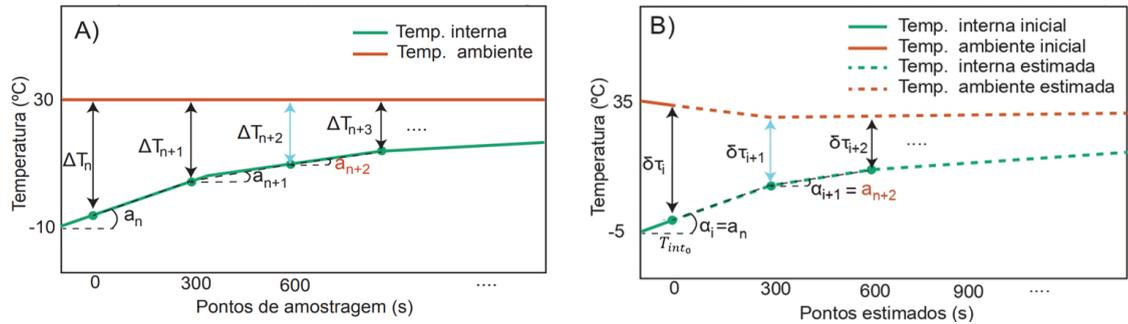
Fonte: Autoria própria (2024)

A série temporal apresentada na Figura 1 foi obtida monitorando a temperatura de uma carga, por meio de sensores instalados *in loco*. Cada ponto temporal é obtido com intervalo igualmente espaçado de 5 minutos, representando um total de 14 horas e 30 minutos. Esse conjunto de dados foi fornecido por uma empresa de Chapecó, Santa Catarina, especializada no desenvolvimento de tecnologias para o monitoramento de temperaturas em cargas. Os dados correspondem a uma carga paletizada de queijo importado, acondicionado em um contêiner refrigerado de 40 pés, vindo da Argentina até a fronteira do Brasil.

A partir dos dados, foram obtidos os parâmetros do modelo térmico. Considerando as Eq. 1 e 2, optou-se por considerar a resistência e a capacitância térmica como constantes que se alteram conforme as condições de transporte. Por isso, o modelo térmico proposto, baseado apenas nas temperaturas ambiente e interna, se aplica apenas sob condições idênticas de transporte.

Os gráficos A e B, exibidos na Figura 2, ilustram como, para uma dada carga, são obtidos os parâmetros do modelo a partir dos dados reais, e gerada a estimativa de temperatura a partir do modelo de previsão, respectivamente.

Figura 2 – Gráficos ilustrando a obtenção dos dados e a estimativa do modelo térmico



Fonte: Autoria própria (2024)

O gráfico A ilustra como o modelo térmico foi construído. Para fins de representação, a temperatura ambiente (externa) é mantida constante em todos os pontos de amostragem. A variação de temperatura em um dado ponto amostral n , (ΔT_n), é dada conforme Eq. 3.

$$\Delta T_n = T_{amb_n} - T_{int_n} \quad (3)$$

onde T_{int_n} indica a temperatura interna contêiner e T_{amb_n} a temperatura ambiente no mesmo ponto amostral n , obtidas por meio de sensores. Considerando um limite mínimo de diferença, a cada nova variação entre dois ΔT_n consecutivos, é realizado o cômputo dessa variação. Isso gera o incremento produzido na temperatura interna, entre esse par de pontos amostrais. Para determinar o coeficiente angular (a_n), que expressa essa taxa de variação, foi utilizada a Eq. 4.

$$a_n = \frac{T_{int_{n+1}} - T_{int_n}}{\Delta t} \quad (4)$$

A taxa de variação expressa por a_n possui uma relação direta com o fluxo de calor. T_{int_n} e $T_{int_{n+1}}$ correspondem aos valores de temperatura atual e posterior, respectivamente; e Δt indica a variação de tempo entre esses pontos. A Eq. 5, derivada da Eq. 4, fornece a temperatura interna no próximo ponto de amostragem.

$$T_{int_{n+1}} = a_n \Delta t + T_{int_n} \quad (5)$$

Assim, os diferentes valores que a_n pode assumir ao longo do tempo estão vinculados a um ΔT_n e podem ser descritos a partir de uma função definida por partes, conforme expresso pela Eq. 6.

$$a_n = \begin{cases} a_0, & \text{se } |\Delta T_1| \leq |\Delta T| \leq |\Delta T_0| \\ a_1, & \text{se } |\Delta T_2| \leq |\Delta T| < |\Delta T_1| \\ a_2, & \text{se } |\Delta T_3| \leq |\Delta T| \leq |\Delta T_2| \\ \vdots & \\ a_k, & \text{se } |\Delta T_{k+1}| \leq |\Delta T| \leq |\Delta T_k| \end{cases} \quad (6)$$

O gráfico B da Figura 4 exibe a estimativa de temperatura gerada pelo modelo para determinada carga. As temperaturas iniciais interna (T_{int_0}) e ambiente do contêiner (T_{amb_0}), são lidas por sensores in loco e utilizadas para calcular a primeira variação de temperatura ($\delta\tau_0$), conforme Eq. 7.

$$\delta\tau_0 = T_{amb_0} - T_{int_0} \quad (7)$$

Com base nessa variação $\delta\tau_0$, a base de dados é consultada, buscando o ΔT_n mais próximo para, então, determinar o coeficiente a_n a ser aplicado, vide Eq. 6. Para representação, considera-se $\alpha_i = a_n$. Assim, o modelo utiliza uma equação linear para estimar a próxima temperatura interna, conforme Eq. 8. As estimativas de variação subsequentes ($\delta\tau_i$), conforme Eq. 9, são realizadas utilizando uma estimativa da temperatura ambiente (τ_{amb_i}), obtida via API *OpenWeatherMap*, além da temperatura interna estimada pela Eq. 8.

$$\tau_{int_{i+1}} = \alpha_i \Delta t + \tau_{int_i} \quad (8)$$

$$\delta\tau_i = \tau_{amb_n} - \tau_{int_n} \quad (9)$$

onde $\tau_{int_{i+1}}$ representa a temperatura interna estimada no ponto de leitura $i + 1$, α_i é o coeficiente angular da reta, τ_{int_i} é a temperatura estimada, ambas no ponto i , e Δt a variação de tempo entre esses pontos. Com o novo $\delta\tau_i$ estimado, são obtidos os próximos coeficientes, consultando a relação apresentada na Eq. 6. O respectivo coeficiente angular (α_i), para a temperatura estimada, é obtido a partir da função definida por partes, conforme Eq. 10.

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha_0, & \text{se } |\Delta T_1| \leq |\delta T_i| \leq |\Delta T_0| \\ \alpha_1, & \text{se } |\Delta T_2| \leq |\delta T_i| < |\Delta T_1| \\ \alpha_2, & \text{se } |\Delta T_3| \leq |\delta T_i| \leq |\Delta T_2| \\ \vdots & \\ \alpha_k, & \text{se } |\Delta T_{k+1}| \leq |\delta T_i| \leq |\Delta T_k| \end{cases} \quad (10)$$

Como etapa posterior, foram inseridas informações adicionais, tais como latitude e longitude e temperatura interna inicial. Na sequência, serão especificadas as ferramentas necessárias para gerar a previsão de temperatura.

3.3 Aplicação do Modelo Térmico

O processo de previsão inicia com a entrada das informações sobre a carga transportada (tipo de carregamento, produto e faixa de temperatura da

mercadoria). Caso uma base de dados ainda não tenha sido obtida para o tipo de carga a ser transportada, ela é gerada utilizando sensores adicionais no contêiner. Esses sensores fornecem as informações ao modelo: as temperaturas interna e ambiente. A partir dessas informações, a metodologia para obtenção dos parâmetros do modelo térmico é aplicada (conforme descrito na Seção 3.2). Considerando o caso estacionário, são obtidas as previsões de temperatura ambiente para o local, utilizando a *API OpenWeatherMap*.

Após a obtenção da primeira variação entre temperatura interna e ambiente, a base de dados e os parâmetros gerados previamente são utilizados para estimar a variação entre essas temperaturas ao longo do tempo, além da temperatura interna. As previsões são atualizadas em intervalos regulares de tempo (M) ou sempre que as informações das APIs puderem ser consultadas.

Para implementação do modelo preditivo, o ambiente de desenvolvimento escolhido foi o Visual Studio Code. Nesse ambiente, foi utilizada a linguagem de programação Python.

4. Resultados e Discussão

Para validar o modelo proposto, foram executados testes práticos, visando confirmar a consistência dos dados e avaliar o desempenho do modelo em condições previamente conhecidas. Ao todo, foram realizados 3 testes envolvendo determinação de parâmetros do modelo preditivo e validação, para os quais houve variação no contêiner *reefer* usado e na carga. Durante esses testes, estabeleceu-se como procedimento padrão iniciar a análise após a desconexão do contêiner da fonte de energia (tomada). Isso ocorreu depois que o contêiner atingiu a temperatura configurada no *setpoint* e entrou em regime permanente, encerrando quando o contêiner foi reconectado à fonte de energia.

Testes iniciais foram executados com o objetivo de analisar o comportamento térmico de contêineres refrigerados e identificar pontos de melhoria em condições simplificadas, como quando o contêiner está vazio ou há cargas fictícias. Posteriormente, também foram realizados testes com carga real. O intervalo de atualização das informações da API foi definido como $M = 20$ minutos para todos os testes.

A Tabela 3 apresenta as condições usadas em cada teste, e os respectivos resultados. Inicialmente, há a identificação do contêiner (de A até C), seguida pelo número do teste. Quando esse número é igual a 0, ele indica que o teste foi conduzido para geração dos parâmetros e, caso contrário, que é um teste de validação. Na sequência, para cada teste, é apresentada a carga acondicionada no contêiner e o tempo total de execução do teste. As cinco últimas colunas

apresentam, respectivamente, a faixa de variação da temperatura do sensor usado durante a aquisição de parâmetros do modelo térmico, a faixa de variação da temperatura estimada pelo modelo, as temperaturas iniciais real e estimada, as temperaturas finais real e estimada, e o erro máximo absoluto da estimativa durante a execução do teste. Em todos os testes de validação, foram mantidas as condições em que os parâmetros do respectivo modelo foram obtidos, isso é, mesmo contêiner, mesma mercadoria e na condição estacionária.

Tabela 1 – Especificações e resultados dos testes realizados

Condições de teste			Dados térmicos				
Teste	Carga	Tempo total (h)	Faixa ΔT (°C)	Faixa $\delta\tau$ (°C)	T_{int_0} (°C) τ_{i_0} (°C)	T_{int_f} (°C) τ_{i_f} (°C)	Erro máximo (°C)
A - 0	Vazio	12,20	27,17 a 17,39	-	0,63 -	11,20	-
A - 1	Vazio	7,2	-	26,84 a 20,44	3,4 3,4	8,81 9,2	-1,05
B - 0	Carga Fictícia	28,30	34,64 a 8,35	-	-8,52	20,32	-
B - 1	Carga Fictícia	24,0	-	32,11 a 14,52	-5,1 -5,1	17,27 18,55	-2,46
C - 0	Queijo	9,58	44,79 a 22,84	-	-12,58	6,38	-
C - 1	Queijo	8,75	-	43,18 a 25,87	-10,33 -10,33	4,43 2,61	2,51
C - 2	Queijo	15,33	-	43,71 a 21,74	-10,27 -10,27	10,24 8,33	3,42

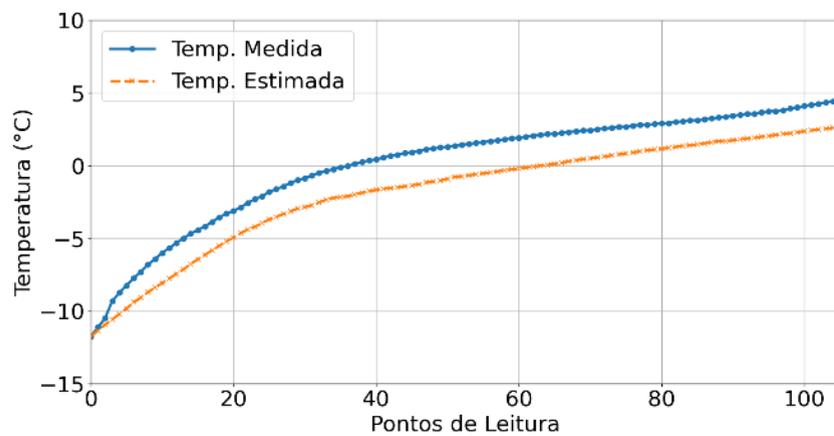
Fonte: Autoria própria (2024)

Os testes iniciais foram realizados em contêineres distintos, denominados A e B, ambos em condições de trajeto estacionário, mas com diferentes cargas, tempos de teste e temperaturas. Para o contêiner A não houve carga, enquanto para o contêiner B foi utilizada uma carga fictícia, representada por um conjunto de pneus e pallets. No contêiner C, os testes foram executados com carga real (queijo), também em condição estacionária.

Quando comparamos os testes dos contêineres A e B, o segundo teve um período de teste mais longo e a temperatura inicial no contêiner foi menor, gerando uma maior faixa de variação da temperatura. Nos testes de validação para esses contêineres, o erro máximo para B foi maior em comparação com A, o que pode ter influência das diferentes condições a que ele foi submetido, como uma faixa de temperatura mais ampla e a influência da carga fictícia.

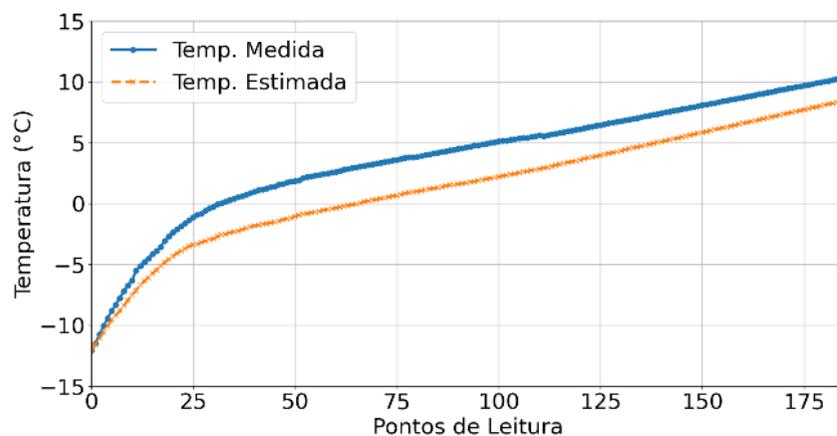
As Figuras 3 e 4 exibem os gráficos comparativos entre a temperatura interna, registrada pelo sensor, e a temperatura interna prevista pelo modelo térmico, para os intervalos de tempo descritos nos testes de validação C-1 e C-2.

Figura 3 – Comparativo entre as temperaturas prevista e medida pelo sensor no teste C-1



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 4 – Comparativo entre as temperaturas prevista e medida pelo sensor no teste C-2



Fonte: Autoria própria (2024)

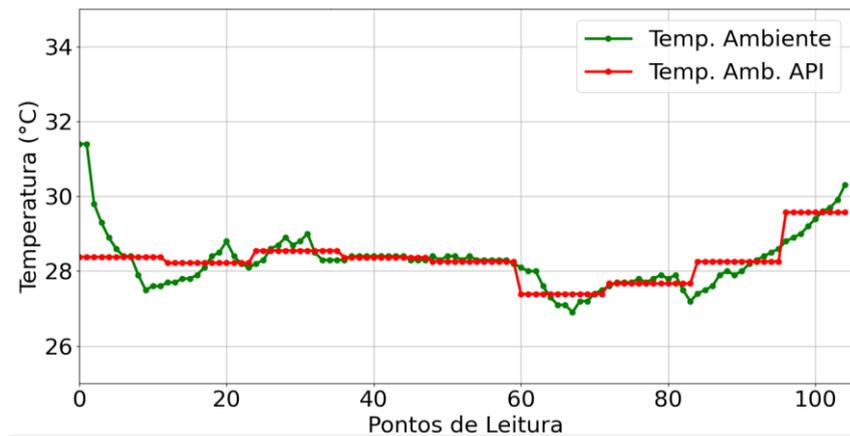
Ao analisar os resultados apresentados nos gráficos da Figura 3 e da Figura 4, em ambos as temperaturas medida e estimada apresentaram um comportamento semelhante em relação ao seu crescimento ao longo dos intervalos de tempo. No teste C-1, o erro de previsão é menor ao final do intervalo do que em pontos intermediários do teste. Isso também ocorre no teste C-2, mas neste caso o erro máximo observado foi maior.

A faixa de temperatura ideal, tolerada para o tipo de mercadoria usado dos testes C-1 e C-2, varia entre -8°C e $+8^{\circ}\text{C}$, conforme informações do transportador. As temperaturas finais, medida pelo sensor e estimada pelo modelo, foram $4,43^{\circ}\text{C}$ e $2,61^{\circ}\text{C}$, respectivamente, no teste C-1, com erro máximo de $2,51^{\circ}\text{C}$. Mesmo com esse erro, ambas as temperaturas estão dentro dos limites estabelecidos para esse tipo de carga. Para o teste C-2, as temperaturas finais, medida pelo sensor e estimada pelo modelo, foram $10,24^{\circ}\text{C}$ e $8,33^{\circ}\text{C}$, respectivamente, com erro máximo de $3,42^{\circ}\text{C}$. Neste caso, ambas as temperaturas ficaram fora da faixa tolerada para a mercadoria.

Observa-se ainda que a temperatura prevista pelo modelo térmico é menor que a temperatura medida pelo sensor em ambos os testes. Analisando os dados de forma mais detalhada, observou-se uma diferença entre a temperatura ambiente

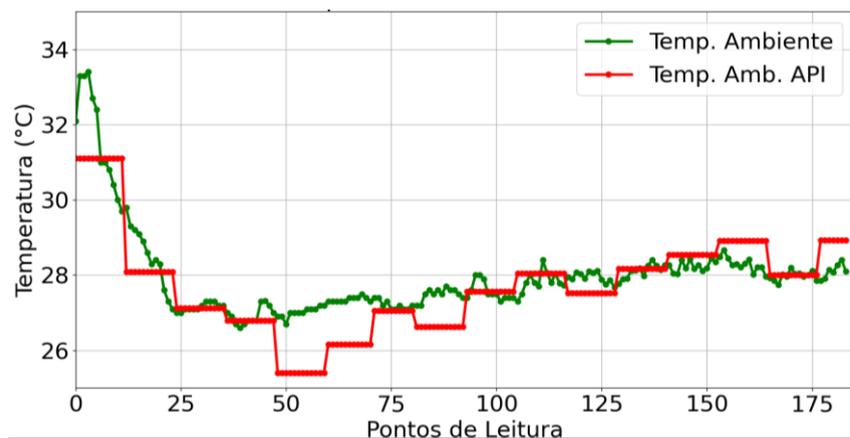
média obtida pela API e a temperatura ambiente lida pelo sensor. Os gráficos apresentados na Figura 5 e na Figura 6 ilustram essas diferenças para os testes C-1 e C-2, respectivamente.

Figura 5 – Comparativo entre as temperaturas ambiente fornecidas pela API e pelo sensor no teste C-1



Fonte: Autoria própria (2024)

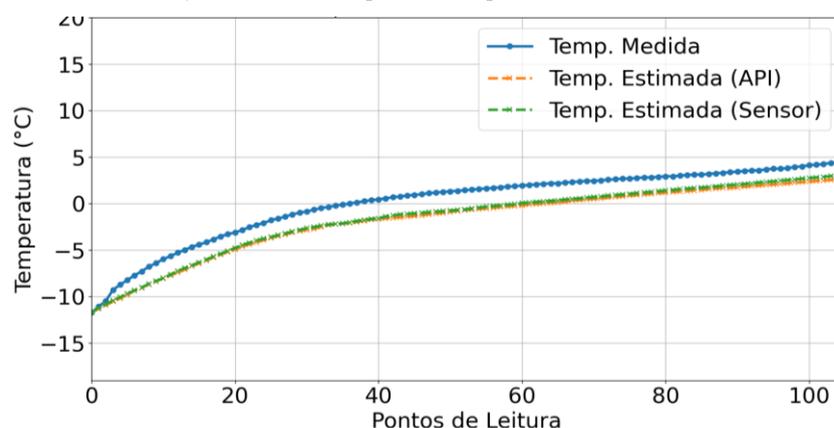
Figura 6 – Comparativo entre as temperaturas ambiente fornecidas pela API e pelo sensor no teste C-2



Fonte: Autoria própria (2024)

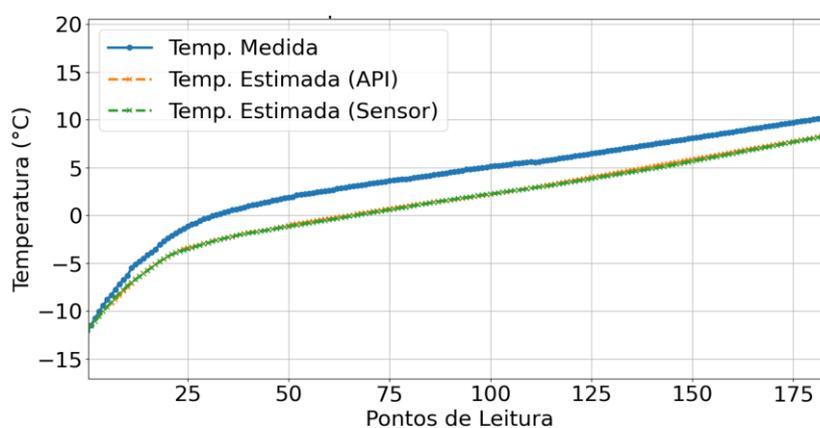
Visando avaliar a representatividade do erro de estimativa gerado pela diferença entre a temperatura ambiente medida pelo sensor e a temperatura ambiente fornecida pela API, foram realizadas novas simulações com os dados do contêiner C. Nelas, utilizou-se a temperatura ambiente medida pelo sensor ao invés da temperatura ambiente estimada pela API. Dessa forma, as temperaturas previstas pelo modelo para os testes C-1 e C-2 foram recalculadas e então comparadas com os testes originais. A Figura 7 e a Figura 8 ilustram esse efeito no erro de previsão do modelo, considerando os dados dos testes C-1 e C-2, respectivamente.

Figura 7 – Comparativo entre a temperatura medida e as temperaturas estimadas a partir das informações fornecidas pelo API e pelo sensor, no teste C-1



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 8 – Comparativo entre a temperatura medida e as temperaturas estimadas a partir das informações fornecidas pelo API e pelo sensor, no teste C-2



Fonte: Autoria própria (2024)

Usando os dados da temperatura ambiente medida pelo sensor para gerar a previsão, o erro máximo obtido no teste C-1 obtido foi de 2,04°C, enquanto para o teste C-2, o erro máximo foi de 3,22°C. Observa-se, nos respectivos gráficos que a discrepância observada entre a temperatura medida pelo sensor e a temperatura fornecida pela API tem um efeito bem limitado no erro de previsão do modelo.

Analisando de forma geral os resultados da Tabela 3, destacam-se alguns pontos. A partir das simplificações realizadas na fase de modelagem do problema, foi possível construir um modelo simples e de fácil processamento. Contudo, essas simplificações também parecem constituir a causa principal dos erros de previsão observados. Apesar da limitação observada em situações em que a carga é sensível às oscilações de temperatura, a ferramenta ainda produz informações úteis para o monitoramento da temperatura. Nesses casos, uma margem maior de segurança deve ser considerada. Uma ação antecipada de reconexão do contêiner à uma fonte de energia, por exemplo, pode garantir o monitoramento adequado e a integridade dos produtos.

O modelo preditivo utilizado oferece simplicidade na aplicação, visto que os coeficientes fornecem uma visão clara da relação entre as variáveis. Além disso, ele

é eficiente em termos computacionais em comparação com métodos mais complexos, sendo adequado para situações que exigem rapidez e eficiência nos cálculos. A facilidade de aplicação do modelo, em diferentes condições de carga, o torna uma ferramenta interessante para suporte à tomada de decisão no setor logístico. Por fim, a abordagem proposta neste trabalho é uma opção viável para modelar e prever a estimativa de temperatura em contêineres refrigerados do tipo reefer, desde que consideradas as condições climáticas e de carga envolvidas.

5. Considerações finais

A manutenção da cadeia do frio é essencial para preservar a qualidade e a integridade dos produtos perecíveis durante o transporte. Temperaturas fora da faixa de segurança para a carga podem gerar perdas significativas, reforçando a importância de ferramentas preditivas para evitar tais situações. O estudo ressaltou os desafios logísticos e tecnológicos associados ao transporte de contêineres refrigerados, como a necessidade de fontes de energia para manter a temperatura ideal, a influência das condições climáticas e a complexidade logística envolvida.

Com o objetivo de desenvolver e aplicar um modelo preditivo simples, baseado em uma função linear definida por partes, buscou-se estimar a temperatura interna em contêineres *reefer*. Mais especificamente, o estudo buscou propor e avaliar um modelo matemático que pudesse prever a variação de temperatura interna, considerando as condições climáticas o tipo de carga envolvidos.

Foram selecionadas APIs para obtenção de informações, como a temperatura ambiente, fundamental para a aplicação do modelo. A validação dos resultados gerados foi realizada por meio de testes práticos, comparando os dados previstos com as medições reais de temperatura interna fornecidas pelo sensor.

Os testes mostraram que o modelo é capaz de estimar a temperatura interna de contêineres refrigerados, desde que modelado em condições semelhantes. As variações no erro máximo das previsões dependem do tipo de mercadoria. Isso destaca a necessidade de ajustar os parâmetros térmicos do modelo para cada tipo de carga. Para não comprometer a carga, ao usar os dados de previsão, é necessário considerar uma margem de erro e, no caso de cargas perecíveis, prever uma ação antecipada de reconexão do contêiner à energia.

Os resultados sugerem que a abordagem representa uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, capaz de auxiliar na manutenção da integridade da carga em contêiner refrigerados. O modelo preditivo é de fácil aplicação, o que permite a escalabilidade da ferramenta sem exigir grande capacidade computacional, quando comparado com modelos mais complexos. Além disso, ele oferece informações

importantes para operações com contêineres refrigerados, que permitem antecipar tomadas de decisões logísticas. Do ponto de vista prático, isso auxilia no planejamento de rotas, possibilitando a definição prévia dos pontos de parada do veículo e, assim, reduzindo a necessidade de paradas desnecessárias para a manutenção da carga térmica.

Referências

- Abreu, A. L. P. (2004). *Método Estimativo da Temperatura Interna de Edificações Residenciais em Uso*. [Tese, Universidade Federal de Santa Catarina].
- Badia-Melis, R., McCarthy, U., & Uysal, I. (2016). Data estimation methods for predicting temperatures of fruit in refrigerated containers. *Biosystems Engineering*, 151(1), 261-272.
- Carvalho, C. C. (2013). *Otimização Dinâmica da Logística de Distribuição de Produtos Alimentícios Refrigerados e Congelados*. [Tese, Universidade Estadual de Campinas].
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de Controle para Engenharia*. (6 ed.) Pearson.
- König, C. C., & Sousa Junior, E. S. (2021). *Perdas e Desperdícios de Alimentos: causas principais*, https://institutobrf.com/assets/site/media/publicacoes/IBRF_Artigo_Perdas_e_Desperdicios_de_Alimentos_causas_principais.pdf.
- Filina, L., & Filin, S. (2008). An analysis of influence of lack of electricity supply to reefer containers serviced at sea ports on storing conditions of cargoes contained in them. *Polish Maritime Research*, 15(4), 96-102.
- Pattanaik, S, Bagchi, S., Nayak, A. K., Katre, P. G., & Jenamani, E. M. (2023). *An approach for estimation of temperature profile inside a reefer container during transportation* [Paper presentation]. 2023 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON), South Carolina, United States.
- Sobral, P. J. A. (2024). *Perdas pós-produção e pré-consumo geram um grande desperdício de alimentos no Brasil*. <https://jornal.usp.br/?p=731106>.

Contribuição dos Autores:

Luis Henrique Lorenzi: Coleta de dados; Implementação computacional; Apresentação dos resultados; Escrita.

Carise Elisane Schmidt: Análise dos dados; Validação; Supervisão do trabalho; Revisão do Texto;

Leandro Chies: Planejamento e delineamento do estudo; Análise dos dados; Validação; Supervisão do trabalho; Revisão do Texto.