



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM ARMAZÉM UTILIZANDO MÉDIA
MÓVEL**

ALBERTO MAZARIO DE MOURA E SILVA

UBERLÂNDIA-MG

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM ARMAZÉM UTILIZANDO MÉDIA
MÓVEL**

ALBERTO MAZARIO DE MOURA E SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro com habilitação em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

UBERLÂNDIA-MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2023	<p>Silva, Alberto Mazario de Moura e, 1995- Avaliação de temperatura do ar em armazém utilizando média móvel [recurso eletrônico] / Alberto Mazario de Moura e Silva. - 2023.</p> <p>Orientador: Rubens Gedraite. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia química. I. Gedraite, Rubens, 1958- (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Química. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 66.0</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Alberto Mazario de Moura e Silva

**AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM ARMAZÉM UTILIZANDO MÉDIA
MÓVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Engenharia Química

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Jader Conceição da Silva

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Eng. Dr. Vinícius Pimenta Barbosa

Doutor PPGEQ / UFU

Uberlândia, 06 de fevereiro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este trabalho a minha mãe Roseli, a meu pai Alberto e a minha irmã Laura, pelo carinho, estímulo e apoio em todos os momentos de dificuldade. Aos meus avós, Vô Raul, Dona Nica e Dona Ivone, por serem exemplos na minha criação e me abundarem com tanto amor. Agradeço à Deus, por me guiar nos momentos angústia, transformá-los em momentos de vitórias e por me abençoar com muita saúde, alegria e sabedoria. Agradeço ao professor Rubens Gedraite pelo incentivo, motivação e orientação desse trabalho. Por fim, todas as pessoas que, de alguma forma, impactaram e me transformaram na pessoa que me tornei, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Armazéns são instalações mantidas em localizações estratégicas com a finalidade de organizar, alocar e gerenciar mercadorias de modo a regular o fluxo entre oferta e demanda. Tratando-se do armazenamento de grãos, o seu manejo é primordial para assegurar a integralidade e preservar a qualidade dos mesmos, evitando posterior perdas de produto. Os parâmetros de umidade e temperatura, quando não controlados, podem propiciar a proliferação de fungos, acelerando o processo de deterioração. Nesse sentido, este trabalho estudou o comportamento da temperatura de um armazém típico em resposta ao ar infiltrado em seu interior devido à abertura e fechamento da porta de acesso de empilhadeiras. Foram empregados os conceitos estudados na área de conhecimento de Controle Estatístico de Processo e de cálculo de média móvel, visando identificar o comportamento da temperatura do armazém ao longo de 30 dias de operação típica. Para realizar a análise foi utilizada a planilha eletrônica do Microsoft Excel™ e considerado o tempo de predição de 48 horas de operação do armazém. A análise realizada neste trabalho focou única e tão somente o processo de infiltração do ar, sem levar em conta as outras variáveis que participam do processo, pois o foco foi avaliar o impacto da entrada de ar externo e saída do ar do armazém sobre a sua temperatura. Concluiu-se que o comportamento da temperatura do ar no interior do armazém é parcialmente afetada pela movimentação de carga no armazém, apresentando variação em uma das unidades evaporadoras. Este aumento era esperado, pois a quantidade de calor introduzida no armazém a cada abertura e fechamento da porta de carregamento implica na introdução de calor no armazém.

Palavras-chave: Troca térmica, infiltração de ar, planilha de previsão.

ABSTRACT

Warehouses are facilities maintained in strategic locations for the purpose of organizing, allocating and managing goods in order to regulate the flow between supply and demand. When it comes to grain storage, its management is essential to ensure completeness and preserve its quality, avoiding subsequent product losses. Humidity and temperature parameters, when not controlled, can encourage the proliferation of fungi, accelerating the deterioration process. In this sense, this work studied the behavior of the temperature of a typical warehouse in response to the air infiltrated inside due to the opening and closing of the forklift access door. The concepts studied in the area of Statistical Process Control and moving average calculation were used in order to identify the behavior of the warehouse temperature over 30 days of typical operation. To carry out the analysis, a Microsoft Excel™ spreadsheet was used and the prediction time of 48 hours of warehouse operation was considered. The analysis carried out in this work focused solely and solely on the air infiltration process, without taking into account the other variables that participate in the process, since the focus was on evaluating the impact of the entrance of external air and the exit of air from the warehouse on its temperature. It was concluded that the behavior of the air temperature inside the warehouse is partially affected by the movement of cargo in the warehouse, showing variation in one of the evaporator units. This increase was expected, as the amount of heat introduced into the warehouse at each opening and closing of the loading door implies the introduction of heat into the warehouse.

Keywords: Heat exchange, air infiltration, forecast worksheet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo do impacto quantidade de períodos para média móvel.....	11
Figura 2.2 - Fluxo de ar frio e ar quente na abertura típica de portas em câmaras frigoríficas industriais.....	13
Figura 2.3 - Porta de fechamento rápido para ambientes até - 35°C.....	15
Figura 2.4 - Porta de fechamento rápido para ambientes até - 35°C.....	15
Figura 2.5: Exemplo de avaliação de desempenho de malha de controle.....	17
Figura 4.1 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 1º evaporador.....	20
Figura 4.2 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 2º evaporador.....	21
Figura 4.3 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 3º evaporador.....	21
Figura 4.4 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 4º evaporador.....	21
Figura 4.5 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 5º evaporador.....	22
Figura 4.6 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 6º evaporador.....	22
Figura 4.7 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 7º evaporador.....	22
Figura 4.8 – Planilha de Previsão (Base 1 dia).....	26
Figura 4.9 – Planilha de Previsão (Base 30 dias).....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Carga Térmica de Infiltração – Porta Isopainel versus Fechamento Rápido.....	14
Tabela 3.1 - Informações sobre o armazém.....	19
Tabela 4.1 – Valores médios de temperatura do ar e sua variabilidade.....	23
Tabela 4.2 – Tendência de comportamento do processo.....	25
Tabela 4.3 – Previsões estatísticas (Base 1 dia).....	27
Tabela 4.4 – Previsões estatísticas (Base 30 dias).....	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Índices Estatísticos.....	26
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{Q}_{CO} : Calor de condução $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

\dot{Q}_{in} : Calor de infiltração $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

\dot{Q}_{pr} : Calor de produto $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

\dot{Q}_{mo} : Calor de motores $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

\dot{Q}_{il} : Calor de iluminação $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

\dot{Q}_{pe} : Calor de pessoas $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

Q_{cond} : Carga térmica de condução $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

U : Coeficiente global de transmissão de calor $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{h.m}^2.\text{°C}}\right]$;

A : Área de condução de calor da estrutura observada $[\text{m}^2]$;

T_{amb} : Temperatura ambiente $[\text{°C}]$;

T_{ins} : Acréscimo de temperatura devido a insolação direta na estrutura observada $[\text{°C}]$;

T_{cf} : Temperatura interna do Armazém $[\text{°C}]$;

Q_{prod} : Carga térmica de produto $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

D : Quantidade mássica de produto em fluxo por dia $[\text{Kg}]$;

C_{res} : Calor específico do milho $\left[\frac{\text{kcal}}{(\text{kg}.\text{°C})}\right]$;

T_e : Temperatura de entrada do produto no Armazém $[\text{°C}]$;

T_s : Temperatura de saída do produto no Armazém $[\text{°C}]$;

H_{res} : Tempo mínimo que o produto vai permanecer em resfriamento até atingir a temperatura desejada $[\text{h}]$;

Q_{pes} : Carga térmica em virtude ao metabolismo de pessoas no armazém $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

q_{met} : Metabolismo da pessoa no armazém $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{h.pessoa}}\right]$;

t : Tempo de ocupação diária por pessoa no armazém [h];

n_{pes} : Número de pessoas trabalhando no armazém [pessoa];

Q_{ilu} : Carga térmica de iluminação $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

W_a : Potência da Lâmpada [kW];

N_a : Número de Lâmpadas [adimensional];

t_a : Tempo de Iluminação por dia [h];

Q_{vent} : Carga térmica dos motores dos ventiladores $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

N : Número de motores internos [adimensional];

η : Rendimento do motor [adimensional];

P_{ot} : Potência de cada motor [CV];

t_{vent} : Tempo de funcionamento dos motores $\left[\frac{\text{h}}{\text{dia}}\right]$;

Q_{maq} : Carga térmica das máquinas $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

Q_{inf} : Carga térmica média das infiltrações para 24h [kW];

q : Carga de refrigeração sensível e latente para escoamento desenvolvido [kW];

D_t : Fator de duração do tempo de abertura da porta [adimensional];

D_f : Fator de escoamento através da porta [adimensional/];

E : Efetividade da proteção oferecida pela porta [adimensional];

A_p : Área da porta [m²];

h_i : Entalpia do ar infiltrado $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}\right]$;

h_r : Entalpia do ar refrigerado $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}\right]$;

ρ_i : Densidade do ar infiltrado $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right]$;

ρ_r : Densidade do ar refrigerado $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right]$;

g : Aceleração da gravidade $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$;

H : Altura da porta [m];

F_m : Fator de massa volumétrica [adimensional];

P : Abertura diária da porta [adimensional];

θp : Tempo de abertura / fechamento da porta [s];

θo : Tempo em que a porta permanece aberta [s];

θd : Período diário [h];

M_{ar} : Massa do ar [Kg];

$c_{p,ar}$: Capacidade calorífica do ar [$\frac{J}{Kg.K}$];

$c_{p ar,in}$: Capacidade calorífica do ar que infiltra no sistema [$\frac{J}{Kg.K}$];

$c_{p ar,out}$: Capacidade calorífica do ar que sai do sistema [$\frac{J}{Kg.K}$];

T_{ar} : Temperatura do ar [K];

$T_{ar,in}$: Temperatura do ar que infiltra no sistema [K];

$T_{ar,out}$: Temperatura do ar que sai do sistema [K];

τ_{ar} : Constante de tempo do processo [$\frac{J}{K}$];

w_{ar} : Vazão mássica [$\frac{Kg}{h}$];

$h_{ar,in}$: Entalpia do ar que infiltra no sistema [$\frac{J}{Kg}$];

$h_{ar,out}$: Entalpia do ar que sai do sistema [$\frac{J}{Kg}$];

w_{ar} : Vazão mássica [$\frac{Kg}{h}$];

$V_{ar_armazem}$: Volume de ar no armazém [m³];

$P_{operação}$: Pressão de operação [mmHg];

$T_{ar ambiente}$: Temperatura do ar ambiente [°C];

$T_{BU ar ambiente}$: Temperatura bulbo úmido ambiente [$\frac{Kg}{h}$];

$T_{ar no armazem}$: Temperatura ar no armazém [°C];

$M_{ar\ no\ armazem}$: Massa ar no armazém [Kg];

Δt_{porta} : Variação de tempo de abertura da porta [s];

K : Ganho da função de transferência;

A : Amplitude da perturbação degrau;

s : Variável frequência no domínio de Laplace;

θ : Tempo morto [s];

τ : Constante de tempo do processo [s];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo Geral.....	2
1.2.	Objetivos Específicos	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1.	Considerações sobre o cálculo das cargas térmicas atuantes em armazéns.....	3
	2.1.1. Carga térmica devida à condução de calor (Q_{cond}).....	3
	2.1.2. Carga térmica devida ao produto Q_{prod}	4
	2.1.3. Carga térmica devida às pessoas Q_{pes}	5
	2.1.4. Carga térmica devida ao sistema de iluminação Q_{ilu}	5
	2.1.5. Carga térmica devida aos ventiladores Q_{vent}	5
	2.1.6. Carga térmica devida às empilhadeiras Q_{maq}	6
	2.1.7. Carga térmica devida à infiltração de ar Q_{inf}	6
2.2.	Considerações sobre o emprego de séries temporais para análise do processo	8
2.3.	Considerações sobre a infiltração de ar externo em armazéns	12
2.4.	Considerações sobre a variabilidade em processos industriais	15
3	ELABORAÇÃO DOS GRÁFICOS DE ANÁLISE TEMPORAL.....	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5	CONCLUSÃO.....	28
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
	APÊNDICE.....	30

1 INTRODUÇÃO

Os Armazéns são áreas de extrema importância dentre as operações de logística. São instalações mantidas em localizações estratégicas com a finalidade de organizar, alocar e gerenciar mercadorias de modo a regular o fluxo entre oferta e demanda.

No que tange o armazenamento de alimentos (com foco nos grãos, objeto de estudo do presente trabalho), visto que se trata de um longo período no qual os alimentos ficarão submetidos, deve ser realizado de forma adequada, uma vez que o seu manejo é primordial para assegurar a integralidade e preservar a qualidade dos mesmos, evitando posterior perdas de produto.

Um ambiente controlado, ou seja, aquele em que a temperatura e/ou a umidade relativa do ar são conhecidas e controladas, asseguram a conservação do produto por longos períodos. Ambientes quentes, úmidos, pouco ventilados, com grande circulação de máquinas e pessoas, por sua vez, apresentam comportamento contrário e impactam diretamente na viabilidade do produto e, por conseguinte, não são recomendados para o armazenamento de grãos.

Os parâmetros de umidade e a temperatura, quando não controlados ou quando o controle é realizado de modo indevido, podem propiciar a proliferação de fungos, acelerando o processo de deterioração. Em umidade elevada, os grãos tenderão a manter o equilíbrio higroscópico com o ar, o que acarretará um aumento de umidade podendo a favorecer a instalação de fungos.

Para se alcançar e assegurar as condições ideais de estocagem, além, é claro, de um bom processamento/beneficiamento desde o plantio até o condicionamento do produto, faz-se necessário análise da carga térmica demandada pelo ambiente. Um equipamento de refrigeração desejável é aquele que trabalha com uma potência adequada, o que resulta em um bom funcionamento e um rápido alcance de temperatura, ou seja, um menor gasto energético. Além disso, é sabido que um equipamento que trabalha em suas condições básicas de funcionamento apresenta baixo desgaste e índices de manutenções não programadas.

Uma vez exposta a problemática, realizou-se neste trabalho o estudo do comportamento da temperatura do ar em um armazém típico, em resposta à movimentação de carga em seu interior no intervalo de 30 dias de modo a identificar o comportamento da temperatura do ar no interior do armazém.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento temporal da temperatura do armazém levando em conta o impacto da abertura e fechamento da porta do armazém em condição usual de operação.

1.2. Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos que se pretende alcançar com o desenvolvimento deste trabalho, pode-se citar:

- 1.2.1. Analisar o comportamento da temperatura utilizando séries temporais;
- 1.2.2. Utilizar o recurso de médias móveis para a previsão de dados;
- 1.2.3. Suavização dos ruídos presentes nos valores medidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Considerações sobre o cálculo das cargas térmicas atuantes em armazéns

No estudo do tema, existem vários fatores que afetam a temperatura de operação de um armazém frigorificado. No estudo destes fatores, leva-se em consideração as cargas térmicas geradas no ambiente, circulação diária de produtos e equipamentos, iluminação, infiltrações na estrutura e condução de calor externo para o meio interno. A metodologia utilizada é baseada no cálculo da carga térmica imposta ao armazém, respaldada por normas técnicas nacionais (NBR 16401) e internacionais de versões variadas (ASHRAE, 2010).

A Carga Térmica de Refrigeração (CT) é a taxa com que o calor deve ser rejeitado de um ambiente refrigerado para mantê-lo à temperatura de interesse (ASHRAE, 2010) e pode ser calculada como o somatório de suas diferentes contribuições, conforme a Eq. (2.1).

$$CT = \dot{Q}_{CO} + \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{pr} + \dot{Q}_{mo} + \dot{Q}_{il} + \dot{Q}_{pe} \quad (2.1)$$

em que:

\dot{Q}_{CO} : Calor de condução;

\dot{Q}_{in} : Calor de infiltração;

\dot{Q}_{pr} : Calor de produto;

\dot{Q}_{mo} : Calor de motores;

\dot{Q}_{il} : Calor de iluminação; e

\dot{Q}_{pe} : Calor de pessoas.

2.1.1. Carga térmica devida à condução de calor (Q_{cond})

A carga térmica de condução (Q_{cond}), representada pela Eq. (2.2), refere-se ao calor transferido por meio dos elementos estruturais do armazém, tais como: o piso, as paredes, o telhado e as estruturas metálicas porventura existentes. Leva-se em consideração os materiais de construção destes itens e as suas respectivas resistências térmicas. Tipicamente faz-se menção ao inverso do valor das resistências térmicas, que são as condutâncias térmicas, também conhecidas como coeficientes globais de transmissão de calor. Assim, tem-se: coeficiente

global das paredes ($U_{paredes}$) [W/m^2K]; coeficiente global do telhado ($U_{telhado}$) [W/m^2K] e coeficiente global do piso (U_{piso}) [W/m^2K].

$$Q_{cond} = U \cdot A \cdot (T_{amb} + T_{ins} - T_{cf}) \cdot 24 \quad (2.2)$$

Em que:

Q_{cond} : Carga térmica de condução [$\frac{kcal}{dia}$];

U : Coeficiente global de transmissão de calor [$\frac{kcal}{h.m^2.°C}$];

A : Área de condução de calor da estrutura observada [m^2];

T_{amb} : Temperatura ambiente [$°C$];

T_{ins} : Acréscimo de temperatura devido a insolação direta na estrutura observada [$°C$];

T_{cf} : Temperatura interna do Armazém [$°C$].

2.1.2. Carga térmica devida ao produto (Q_{prod})

A carga térmica de produto (Q_{prod}) é representada pela Eq. (2.3) e faz referência ao calor necessário para o resfriamento do produto que é introduzido no armazém, o qual possui período estipulado para retirada. Desconsiderou-se a carga de produto estático, uma vez determinado que o seu acondicionamento no interior do armazém já se encontrava estabelecido.

$$Q_{prod} = \frac{D \cdot C_{res} \cdot (T_e - T_s) \cdot 24}{H_{res}} \quad (2.3)$$

Em que:

Q_{prod} : Carga térmica de produto [$\frac{kcal}{dia}$];

D : Quantidade mássica de produto em fluxo por dia [kg];

C_{res} : Calor específico do milho [$\frac{kcal}{(kg \cdot °C)}$];

T_e : Temperatura de entrada do produto no Armazém [$°C$];

T_s : Temperatura de saída do produto no Armazém [$°C$]; e

H_{res} : Tempo mínimo que o produto vai permanecer em resfriamento até atingir a temperatura desejada [h];

2.1.3. Carga térmica devida às pessoas (Q_{pes})

A carga térmica de pessoas (Q_{pes}), representada pela Eq. (2.4), refere-se ao calor gerado a partir de cada pessoa que ocupa determinado espaço no interior do armazém. Para o cálculo, utiliza-se tabela como referência do calor do metabolismo de indivíduos em ambiente condicionado, de acordo com o estabelecido em norma (ASHRAE, 2010).

$$Q_{pes} = q_{met} \cdot t \cdot n_{pes} \quad (2.4)$$

Em que:

Q_{pes} : Carga térmica em virtude ao metabolismo de pessoas no armazém $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

q_{met} : Metabolismo da pessoa no armazém $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{h.pessoa}}\right]$;

t : Tempo de ocupação diária por pessoa no armazém [h]; e

n_{pes} : Número de pessoas trabalhando no armazém [pessoa].

2.1.4. Carga térmica devida ao sistema de iluminação (Q_{ilu})

A carga térmica de iluminação (Q_{ilu}), representada pela Eq. (2.5) e refere-se ao calor dissipado pelo sistema de iluminação, quando ativado, no ambiente estudado.

$$Q_{ilu} = 0,86 \cdot W_a \cdot N_a \cdot t_a \quad (2.5)$$

Em que:

Q_{ilu} : Carga térmica de iluminação $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

W_a : Potência da Lâmpada [W];

N_a : Número de Lâmpadas [adimensional];

t_a : Tempo de Iluminação por dia [h];

2.1.5. Carga térmica devida aos ventiladores (Q_{vent})

A carga térmica dos ventiladores (Q_{vent}), representada pela Eq. (2.6), refere-se ao calor dissipado pelos motores dos ventiladores presentes no ambiente estudado. Utiliza-se a NBR 16401-1 para obtenção das taxas de dissipação de motores elétricos em ambiente que utiliza ar condicionado.

$$Q_{vent} = \frac{(N \cdot P_{ot} \cdot t_{vent})}{\eta} \quad (2.6)$$

Em que:

Q_{vent} : Carga térmica dos motores dos ventiladores $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

N : Número de motores internos [adimensional];

η : Rendimento do motor [adimensional];

P_{ot} : Potência de cada motor [CV]; e

t_{vent} : Tempo de funcionamento dos motores [h].

2.1.6. Carga térmica devida às empilhadeiras (Q_{maq})

A carga térmica devido à presença de empilhadeiras (Q_{maq}), representada pela Eq. (2.7), refere-se ao calor dissipado pelos motores das empilhadeiras presentes no ambiente estudado. Utiliza-se a NBR 16401-1 para obtenção das taxas de dissipação de motores elétricos em ambiente que utiliza ar condicionado.

$$Q_{vent} = \frac{(N \cdot P_{ot} \cdot t)}{\eta} \quad (2.7)$$

Em que:

Q_{maq} : Carga térmica das máquinas $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

N : Número de motores internos [adimensional];

η : Rendimento do motor [adimensional];

P_{ot} : Potência de cada motor [CV]; e

t_{vent} : Tempo de funcionamento dos motores [h].

2.1.7. Carga térmica devida à infiltração de ar (Q_{inf})

A carga térmica devida à infiltração de ar (Q_{inf}), representada pela Eq. (2.8) conforme ASHRAE (2010), refere-se ao calor infiltrado no ambiente estudado através, por exemplo, do abre-e-fecha das portas. Deve-se considerar os valores de pressão atmosférica, temperatura e

umidade relativa do ambiente externo e interno dos armazéns, conforme sua localização. Para o presente trabalho, considera-se a cidade de Uberlândia.

$$Q_{inf} = q \cdot D_t \cdot D_f \cdot (1 - E) \cdot 86.400 \quad (2.8)$$

Em que:

Q_{inf} : Carga térmica média das infiltrações para 24h $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{dia}}\right]$;

q : Carga de refrigeração sensível e latente para escoamento desenvolvido $[\text{kW}]$;

D_t : Fator do tempo de duração de abertura da porta [adimensional];

D_f : Fator de escoamento através da porta [adimensional]; e

E : Efetividade da proteção oferecida pela porta [adimensional].

A carga de refrigeração sensível e latente (q) pode ser determinada por meio do emprego da Eq. (2.9), proposta por Schmitz (2016).

$$q = 0,221 \cdot A_p \cdot (h_i - h_r) \cdot \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_r}\right)^{0,5} \cdot (g \cdot H)^{0,5} \cdot F_m \quad (2.9)$$

Em que:

q : Carga de refrigeração sensível e latente para escoamento desenvolvido $[\text{kW}]$;

A_p : Área da porta $[\text{m}^2]$;

h_i : Entalpia do ar infiltrado $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$;

h_r : Entalpia do ar refrigerado $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$;

ρ_i : Densidade do ar infiltrado $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$;

ρ_r : Densidade do ar refrigerado $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$;

g : Aceleração da gravidade $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$;

H : Altura da porta $[\text{m}]$; e

F_m : Fator de massa volumétrica [adimensional].

O fator de massa volumétrica (F_m) pode ser calculado com base na Eq. (2.10), sendo função de ρ_i e ρ_r , anteriormente apresentados.

$$F_m = \left(\frac{2}{1 + \frac{\rho_i^{\frac{1}{3}}}{\rho_r}} \right)^{1,5} \quad (2.10)$$

O fator do tempo de duração de abertura da porta (D_t) é calculado pela Eq. (2.11), dependente de ρ_i e ρ_r , anteriormente apresentados.

$$D_t = \frac{(P \cdot \theta p + 60 \cdot \theta o)}{(3600 \cdot \theta d)} \quad (2.11)$$

Em que:

D_t : Fator de duração do tempo de abertura da porta;

P : Número de aberturas diárias da porta do armazém;

θp : Tempo de abertura / fechamento da porta [s];

θo : Tempo em que a porta permanece aberta [min.]; e

θd : Período diário [usualmente, 24 h].

Contudo, neste TCC será estudada somente a carga térmica devida à infiltração de ar pela porta, haja vista ser o aspecto interessante de se quantificar para fins de análise dos afastamentos das condições ideais de operação.

Para desenvolvê-lo, foi interessante lançar mão de uma representação do sistema de modo a que se possa alterar os parâmetros operacionais de interesse livremente, sem o risco de causar prejuízos ao negócio. Esta representação seria o modelo matemático do processo em estudo, o qual está fundamentado nos conceitos apresentados no subitem 2.2.

2.2. Considerações sobre o emprego de séries temporais para análise do processo

A quantificação numérica somado ao processo observacional sobre uma variável ordenada no tempo é denominada série temporal (SOUZA, 1989). A distribuição dos dados por períodos regulares torna-se, desse modo, importante para a obtenção de conclusões assertivas sobre a série de dados distribuídos.

A existência de um sistema causal relativamente constante no processo e que, assim, exerce influência sobre os dados passados e pode manter a influência sobre os resultados futuros é a premissa básica que norteia a análise quantitativa. Tais padrões não são aleatórios e podem

ser detectados graficamente pela análise dos dados e é o princípio utilizado como auxílio na tomada de decisão (MAKRIDAKIS *et al*, 1998).

De maneira prática, tais conhecimentos são utilizados, por exemplo, no controle estatístico de processo com a finalidade de avaliar a estabilidade do processo e, por consequência, sua previsibilidade. Assim como, em processos que apresentam tendência de crescimento, como a quantidade de passageiros transportadas pelo transporte público ao longo dos anos. Por esse motivo, é de suma importância, compreender as influências sobre os dados e decompor as séries temporais em padrões que facilitem sua previsibilidade.

Baseado no modelo clássico, as séries temporais podem ser decompostas em quatro padrões: tendência (T), variações cíclicas ou ciclos (C), variações sazonais ou sazonalidade (S) e variações irregulares (I). Vale ressaltar que todos esses padrões nem sempre são encontrados na mesma série temporal. Por esse motivo, a decomposição é fundamental para encontrar qual ou quais padrões afetam significativamente o conjunto dos dados de estudo. Outro fato relevante, para as previsões, o padrão de variações irregulares não é considerado na equação, pois, teoricamente são imprevisíveis. Assim, o valor da série (Y) pode ser descrito como $Y = f(T, C, S)$ (MORETTIN e TOLOI, 1985). Representado como o modelo aditivo apresentado na Eq. (2.12).

$$Y = T + C + S \quad (2.12)$$

Torna-se necessário compreender os modelos utilizados para a obtenção dos valores correspondentes às variáveis da Eq. (2.12), ou seja, da tendência, das variações cíclicas e das variações sazonais. Na sequência são apresentadas algumas considerações acerca destas variáveis.

2.2.1. Tendência

A tendência é o comportamento da série de dados que aparece no longo prazo. Sua identificação tem por finalidade avaliar o comportamento e a predição dos dados, removendo a sua influência quando da realização de estudos de outros fatores, como também, identificando o seu impacto no comportamento da série temporal.

Para a obtenção da equação de tendência, utiliza-se o método de regressão (por exemplo, o modelo linear), de médias móveis ou a partir do ajuste exponencial.

2.2.1.1. Modelo de regressão e mínimos quadrados

A característica principal desse modelo reside no fato de o tempo sempre ser a variável independente. Assim, o foco é encontrar a equação (seja linear, polinômio de segundo grau, logarítmica, potência ou exponencial) que melhor representa a série temporal.

Por esse motivo, faz-se necessária a utilização de alguma medida de acuracidade para identificar a melhor equação que representa a série de dados. Pela literatura de séries temporais, as medidas de maior destaque são: Erro Absoluto Médio (EAM), Erro Quadrático Médio (EQM) e Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM). Para isso, as três medidas de acuracidade se baseiam no erro (e_t) do dado real com o encontrado pela equação representativa da série temporal (MAKRIDAKIS *et al*, 1998). As equações para o cálculo dos erros citados são apresentadas na sequência.

$$\text{EAM} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t| \quad (2.13)$$

$$\text{EQM} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (2.14)$$

$$\text{EPAM} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \left(\frac{e_t}{Y_t} \right) 100 \right| \quad (2.15)$$

onde:

$$e_t = Y_t - T_t$$

$$T_t = \text{valor da série}$$

$$Y_t = \text{Valor previsto pelo modelo de tendência}$$

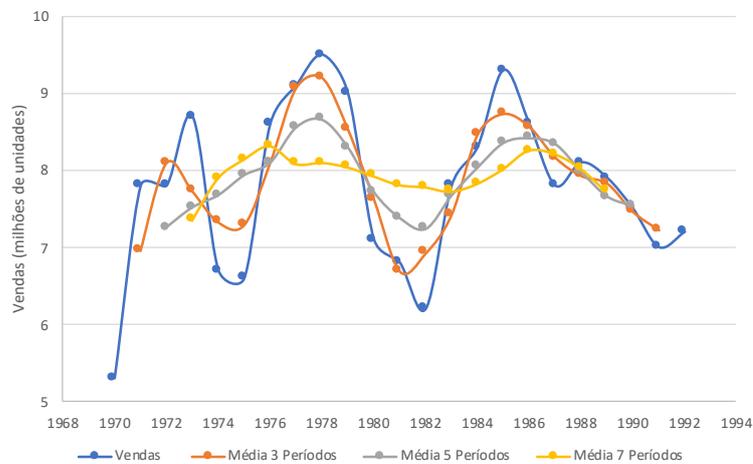
Por fim, o modelo que apresentar os maiores valores de medida de acuracidade baseada nos erros, será o melhor modelo descritivo da série temporal.

2.2.1.2. Modelo de médias móveis

Uma segunda abordagem na obtenção da tendência de uma série temporal é o emprego de médias móveis. Assim, define-se uma quantidade n de períodos (ou ordem da série) que

serão trabalhados e o resultado da média será colocado em seu centro. Devido ao aumento da ordem da média móvel, a série de dados que apresenta significativa variabilidade é “suavizada”. Este comportamento permite compreender a tendência de comportamento dos dados da série temporal de maneira mais assertiva. A título de exemplo, na Figura 2.1 estão representadas as médias de 3, 5 e 7 períodos referente a dados das vendas anuais de carros, caminhões e ônibus fabricados pela General Motors entre 1970 e 1992 (LEVINE et al, 2000). Nota-se o aumento suavização dos dados com o aumento de períodos da média móvel e a indicação da ligeira oscilação em torno de 8 milhões de unidades vendidas no período da série temporal.

Figura 2.1: Exemplo do impacto quantidade de períodos para média móvel



Fonte: adaptado Levine *et al.* (2000)

2.2.1.3. Ajuste exponencial

Por fim, o ajuste exponencial é um método que leva em consideração todos os valores previamente observados e não apenas os mais próximos, como acontece na média móvel. Além disso, esse método leva em consideração o fato de que os dados mais recentes possuem maior influência na previsão; conseqüentemente, devem receber um peso maior do que os valores antigos. Assim, este ajuste torna-se mais eficiente na previsão de curto prazo, ou seja, para o período subsequente da série. Sendo uma das ferramentas utilizadas na análise de dados da planilha eletrônica do Microsoft Excel™. Esse método está baseado na Eq. (2.16).

$$E_i = W Y_i + (1 - W) E_{i-1} \quad (2.16)$$

Onde:

i = um período de tempo qualquer;

Y_i = valor original no período i ;

E_i = valor exponencialmente ajustado no período i ;

E_{i-1} = valor exponencialmente ajustado no período $i - 1$ (período anterior);

W = coeficiente de ajuste ($0 < W < 1$).

O ponto crucial da Eq. (2.16) é a escolha assertiva do coeficiente de ajuste baseado no objetivo da análise. Para tendência de longo prazo, W deve ser um valor próximo a zero. Já para a previsão de curto prazo, o valor deve ser próximo de 1.

2.2.2. Variações sazonais ou sazonalidade

Variações sazonais ou sazonalidade é definida como flutuações dos dados que possuem uma duração inferior a um ano e que se repetem todos os anos. Para a obtenção da sazonalidade, é aconselhável a utilização do método da razão para a média móvel. Basicamente, utilizam-se 5 passos:

1. Obter médias móveis similar a quantidade de períodos sazonais.
2. Nova média móvel a partir de 2 períodos calculados no **passo 1**.
3. Obter o índice sazonal para cada período ao subtrair o valor original da média centrada do **passo 2**.
4. Obter as medidas de síntese (para cada período sazonal) pela média aritmética dos valores encontrados no **passo 3**.
5. Fazer a correção necessária para que a soma dos índices seja zero.

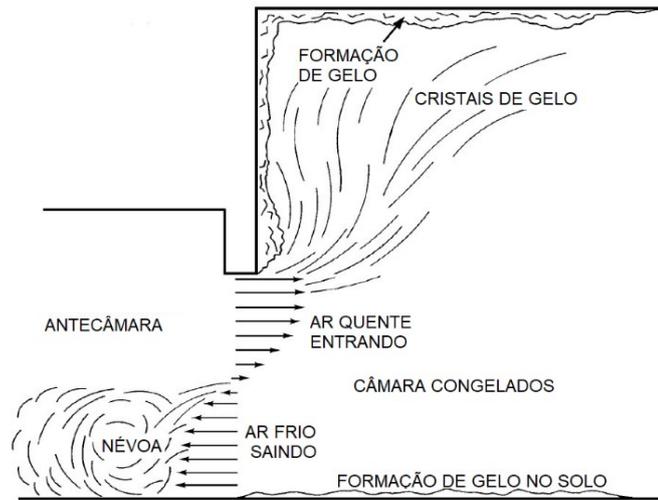
2.2.3. Variações cíclicas ou ciclos

As variações cíclicas ou ciclos são variações nos valores com duração superior a um ano e com uma repetição periódica. Para identificar a existência de ciclos, verificar se existe a alternância entre valores maiores e menores que zero ao longo da série temporal. Assim, com a existência, faz-se necessário identificar se os períodos que se deseja fazer as previsões serão de alta ou de baixa e, semelhante à sazonalidade, a obtenção de índices.

2.3. Considerações sobre a infiltração de ar externo em armazéns

A infiltração do ar externo em armazéns refere-se à troca de ar que acontece principalmente em operações de carregamento e descarregamento dos mesmos. Nestes cenários acontece a troca de ar frio do interior do armazém com o ar quente do exterior, que resulta em aumento na carga térmica de refrigeração. O fenômeno citado é apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Fluxo de ar frio e ar quente na abertura típica de portas em câmaras frigoríficas industriais.



Fonte: SEBRAS (2022).

Fatores como áreas de vão livre da porta, quantidade aberturas de porta, tempo que a porta permanece aberta em cada acesso e as condições de temperatura e umidade interna/externa, acabam por promover a infiltração de ar em armazéns. Quando acontece movimentação elevada nas câmaras frigoríficas e uma significativa diferença entre as temperaturas interna e externa, ocorre ganho da carga térmica de refrigeração em decorrência da infiltração de ar, podendo chegar até a 50% da carga térmica total do armazém (ASHRAE, 2010).

A infiltração de ar no armazém acarreta problemas de segurança e obstrução dos equipamentos de refrigeração, em virtude da formação de gelo nas entradas e redução dos ciclos de degelo. Adicionalmente, favorece a perda de qualidade dos produtos, devido a flutuações de temperatura no interior do armazém e o aumento dos custos de energia e manutenção para assegurar o funcionamento do sistema de frio, que trabalhará durante um intervalo maior de tempo para assegurar a temperatura ideal.

De modo a minimizar os impactos da infiltração de ar, são comumente utilizados dispositivos de proteção, tais como: cortina de ar, cortina de PVC ou portas rápidas, sendo estas últimas as mais recomendadas.

As **portas rápidas**, conforme mostrado nas Figuras 2.3 e 2.4, apresentam vedações mais eficientes, bem como uma considerável redução no tempo em que as mesmas permanecem abertas, através de fechamento automático, com dispositivos de segurança. Outra característica desse tipo de porta é a sua abertura ajustável, conforme utilização, reduzindo os vãos da mesma.

Em armazéns refrigerados, com alta movimentação de empilhadeiras, por exemplo, é comum a permanência das **portas do tipo isopainel** abertas durante todo o processo de carregamento/descarregamento. Mesmo seguindo a orientação de mantê-la aberta o menor tempo possível, há dificuldade em atender esta orientação por parte dos operadores. É assim que a carga térmica devido à infiltração do ar atinge a sua máxima contribuição no montante total da carga térmica. A redução da carga de infiltração se dá a partir da substituição das portas do tipo isopainel pelas portas de fechamento rápido.

Na sequência, é apresentado um comparativo da carga térmica de infiltração para os dois tipos de portas, durante o carregamento de um armazém, utilizando-se empilhadeira de 24 paletes. Os resultados de Carga Térmica infiltrada, para cada um dos tipos de porta é apresentado na Tabela 2.1.

Para a **porta do tipo isopainel**, sabe-se que a abertura se dá no início do carregamento e o fechamento da mesma apenas ao encerrá-lo. Foi considerado o tempo de carregamento de 3 minutos/paleta, totalizando 72 minutos de porta aberta.

Para a **porta do tipo fechamento Rápido**, considera-se que a abertura e fechamento da porta ocorre a cada passagem da empilhadeira. Foi considerado como tempo de carregamento o valor de 20 segundos em cada passagem, totalizando 16 minutos de porta aberta.

Tabela 2.1 - Carga Térmica de Infiltração – Porta Isopainel versus Fechamento Rápido.

Tipo	Carga Térmica de Infiltração	
	(kW)	(kcal/h)
Porta do tipo isopainel	8,62	7.412
Porta do tipo fechamento rápido	1,92	1.647

Fonte: SEBRAS (2022).

Nota-se redução de 78% na carga térmica de infiltração quando utilizado a porta do tipo fechamento rápido, considerando apenas o tempo de abertura da porta, sem interferências no tempo total de carregamento do produto. Cálculos realizados segundo Metodologia ASHRAE.

Figura 2.3 - Porta de fechamento rápido para ambientes até -35°C



Fonte: SEBRAS (2022).

Figura 2.4 - Porta de fechamento rápido para ambientes até -35°C



Fonte: SEBRAS (2022).

2.4. Considerações sobre a variabilidade em processos industriais

Atualmente, o foco das análises dos processos produtivos é a melhoria da qualidade do produto final e o aumento de rentabilidade. No que tange ao aspecto da qualidade, pode-se afirmar que esta representa a adequação do produto ao uso para o qual este foi projetado. Neste cenário, são condições imprescindíveis a qualidade do projeto e a conformidade com as especificações de projeto (MONTGOMERY, 2000). Assim sendo, o processo produtivo pode ser entendido como sendo o responsável pela garantia desta última condição.

A variabilidade, presente na significativa maioria dos processos industriais, é o fator de maior peso na redução da qualidade dos produtos. Ela pode ser entendida como a dispersão do valor de uma variável do processo em torno do seu correspondente valor médio, que é usualmente o valor desejado para aquela variável. A variabilidade é uma condição indesejada

que afeta diretamente os custos de produção e a qualidade do produto final a ser entregue ao cliente.

Dentre os fatores que podem causar variabilidade em um processo da indústria química, pode-se citar: (i)- a qualidade da matéria-prima empregada; (ii)- a má sintonia de uma malha de controle automático; (iii)- um equipamento de processo mal dimensionado e (iv)- operadores mal treinados para a função (VAN DEN BERG *et al.*, 2002).

Em malhas de controle, a variabilidade pode ser devida a diversos fatores, tais como: (i)- oscilações causadas por agarramento ou histerese em válvulas de controle; (ii)- pela má sintonia dos parâmetros do controlador; (iii)- por ruídos presentes no valor medido; (iii)- por perturbações indesejadas impostas ao processo e (iv)- por não linearidades presentes neste. Cumpre destacar que a mitigação da variabilidade em uma parte do processo é imprescindível para evitar a sua propagação para as etapas seguintes do mesmo.

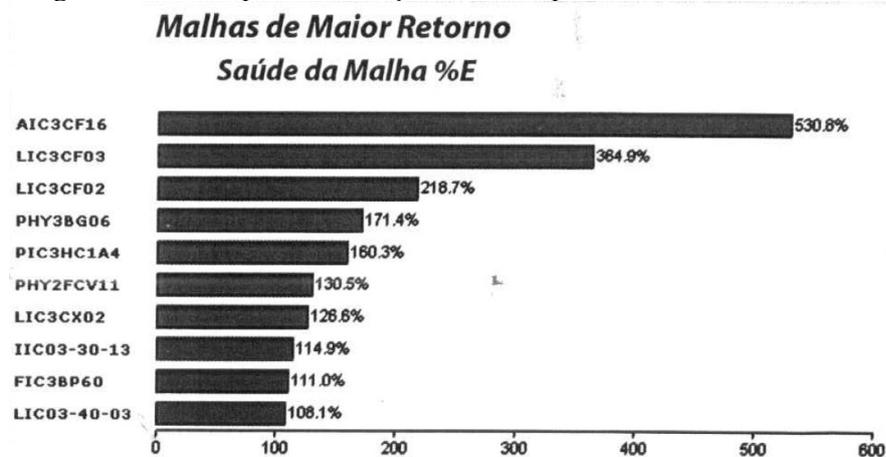
Existem diversas maneiras de se medir a variabilidade apresentada por um processo. No caso específico das malhas de controle, caso o *set-point* seja constante, a variância ou o desvio padrão pode ser empregados como medida da dispersão do valor da variável controlada em torno do valor do *set-point*. A variabilidade pode, também, ser calculada como a razão entre a variância e o valor médio da variável de processo sob controle (BRITAIN, 2003). No caso de o *set-point* ser variável, é recomendado medir a variabilidade apresentada pelo sinal de desvio (erro) do controlador ao invés da dispersão apresentada pela variável de processo medida, podendo-se utilizar índices de desempenho da malha de controle, tal como o *IAE* (*Integral Absolute Error*) ou o desvio padrão do sinal de erro (BRITAIN, 2003).

Existem alguns métodos para se monitorar constantemente a variabilidade apresentada por uma malha de controle, podendo ser online ou offline. Dentre os métodos disponíveis na literatura, foram escolhidos quatro que são citados na sequência. O desempenho de malhas de controle é de fundamental importância para a manutenção do valor da variabilidade dos processos em níveis aceitáveis. Se as malhas funcionam bem, as chances de o processo se manter dentro das especificações requeridas são consideravelmente maiores.

O primeiro método é o de monitoramento contínuo de malhas de controle. Ele permite identificar malhas de controle com desempenho aquém do desejado e que necessitam de auditoria e melhorias dos parâmetros de sintonia dos controladores. Já existem programas de avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle no mercado nacional, capazes de auxiliar na execução de tais tarefas. As malhas são avaliadas em conformidade com certos

índices de desempenho escolhidos pelo usuário. Estes índices atribuem notas a cada malha e a cada área industrial, além de poder atribuir uma nota global para a unidade industrial como um todo. Como exemplo de índices, pode-se citar: o *IAE*; a amplitude das oscilações da malha; o tempo de permanência da malha em modo automático; o deslocamento da haste e o número de reversões de posição do atuador de uma válvula de controle; a saturação da variável de processo ou de saída do controlador dentre outros. As malhas de controle são ordenadas de acordo com as notas ponderadas pela importância econômica correspondente a cada uma e exibidas na forma de um diagrama de Pareto, como mostrado a título de exemplo na Figura 2.5.

Figura 2.5: Exemplo de avaliação de desempenho de malha de controle



Fonte: Oliveira Junior *et al.* (s.d.)

O segundo método de monitoramento da variabilidade se baseia em indicadores de desempenho, popularmente conhecidos como *OEE (Overall Equipment Effectiveness)*, que são indicadores de gerenciamento de ativos do processo que englobam outros indicadores, tais como: disponibilidade, desempenho e qualidade. Este indicador está alinhado com a filosofia *TPM (Total Productive Maintenance)* e depende do percentual de produto(s) produzido(s) com qualidade em relação à quantidade potencial, para a velocidade nominal especificada para o equipamento.

O monitoramento do *OEE* e a sua manutenção em valores elevados trazem diversos benefícios para o processo, tais como: a redução do tempo de parada de equipamentos; a diminuição dos custos de manutenção; o melhor gerenciamento do tempo de vida útil dos equipamentos; o aumento da produtividade; a identificação de gargalos no processo; o aumento da qualidade e a redução do desperdício. O *OEE* se constitui em uma métrica de manufatura que aumenta a visibilidade do desempenho do processo em relação ao estado das máquinas e

equipamentos. A meta consiste em se alcançar um valor elevado de *OEE*, que varie pouco ao longo do tempo, aumentando a previsibilidade do processo.

De maneira análoga, existem *KPIs*, que podem ser traduzidos como indicadores chave de desempenho, específicos para cada classe de ativos (malhas de controle, instrumentos, redes etc.). Também pode-se utilizar como indicadores de desempenho a demanda por matéria-prima, por energia e por utilidades. Nestes casos, é esperado que estes indicadores apresentem a menor variabilidade possível, contribuindo para reduzir a variabilidade do *lead time* e tornando mais fácil cumprir os prazos de entrega dos produtos aos clientes. Complementarmente, contribuem para diminuir a necessidade de manutenção de elevados estoques intermediários na planta, que causa impacto direto no custo do capital.

O terceiro método de monitoramento da variabilidade se baseia na metodologia Seis-Sigma (*Six-Sigma*) que é um método criado para gerenciar defeitos no produto final. Essencialmente, é uma metodologia utilizada para detectar e eliminar defeitos em qualquer processo, que funciona com base na definição de objetivos, na coleta de informações do processo e na análise dos resultados obtidos. A principal diferença em relação a métodos mais antigos de controle de qualidade reside no fato de que a metodologia Seis-Sigma é sensível às características dos processos e não aos produtos defeituosos (WHEELER, 2002).

A implicação deste fato é que cada característica que afeta a qualidade do produto é monitorada e cada situação fora de especificação – para uma determinada característica – é considerada um defeito. Assim sendo, um produto pode conter mais de um defeito ao passo que os métodos clássicos apenas consideram o fato de o produto ser apropriado ou não apropriado ao uso, independente do número de defeitos que ele apresenta. Essa abordagem torna o método Seis Sigma mais preciso.

3 ELABORAÇÃO DOS GRÁFICOS DE ANÁLISE TEMPORAL

A elaboração dos gráficos de análise temporal utilizando média móvel foi feita com base em informações disponíveis na literatura, para um armazém existente em uma indústria produtora de sementes localizada na região do Triângulo Mineiro. As informações utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.1. Os valores de vazões e dos teores de umidade do material sólido e do ar de secagem são valores de operação em regime estacionário.

Tabela 3.1 - Informações sobre o armazém.

Parâmetro	Valor
$V_{ar_armazem}$	15.039,43 m^3
$P_{operacao}$	700 mmHg
$T_{ar\ ambiente}$	24°C
$T_{BU\ ar\ ambiente}$	20°C
$T_{ar\ no\ armazem}$	15°C
$M_{ar\ no\ armazem}$	15.040,49 kg
w_{ar}	1.682,08 $\frac{kg}{h}$
Δt_{porta}	de 20 seg. a 120 seg.

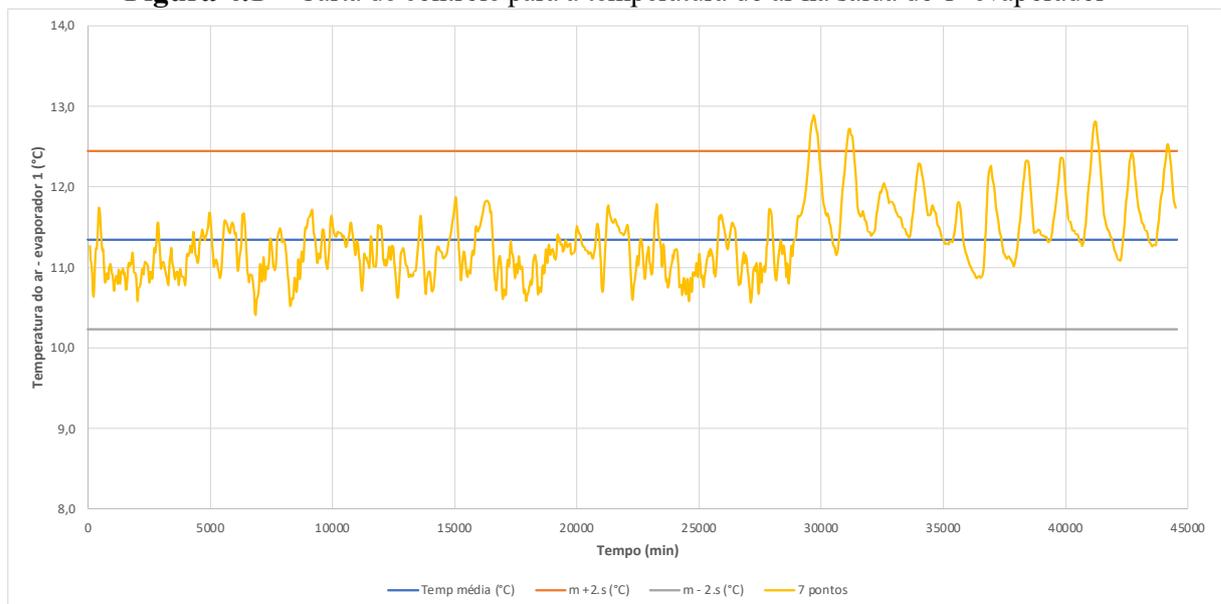
O intervalo de tempo entre a abertura e o fechamento da porta de carregamento do armazém é o parâmetro de interesse para responder à questão de como o ar infiltrado afeta a temperatura do armazém.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cartas de controle foram construídas considerando o intervalo de aproximadamente 30 dias de operação contínua de um armazém típico, durante 24 horas por dia. O armazém considerado estava equipado com 07 evaporadores dispostos no interior do mesmo de maneira a proporcionar uma boa circulação do ar interno, visando uniformizar a temperatura do armazém. Os valores de temperatura do ar utilizados nas cartas de controle foram medidos na saída de cada evaporador instalado no referido armazém no intervalo de 30 minutos entre as aferições da temperatura.

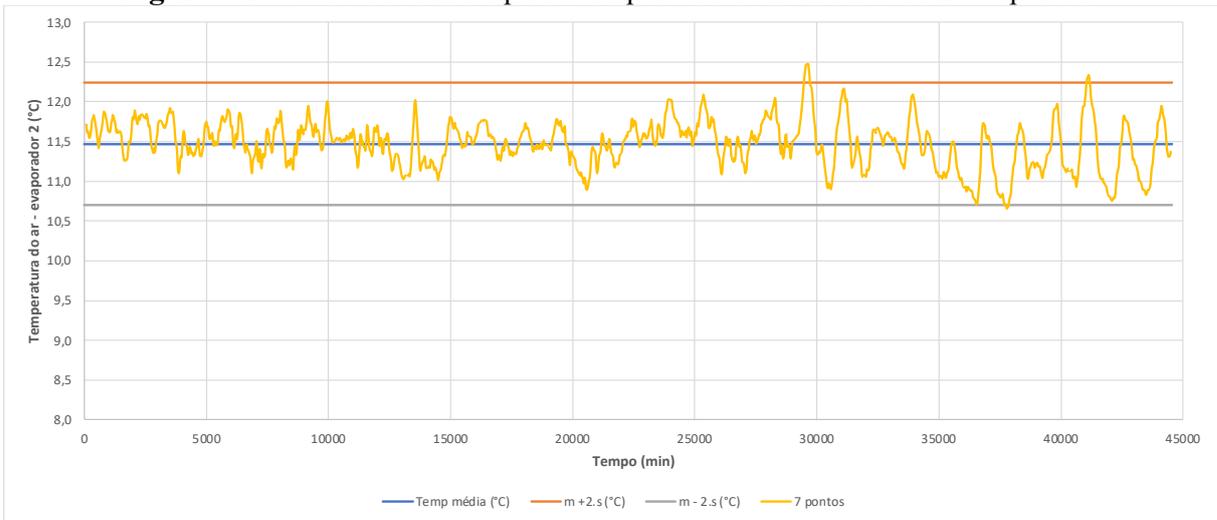
As cartas de controle estão apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.7 e consideram os valores das médias móveis de 7 pontos.

Figura 4.1 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 1º evaporador



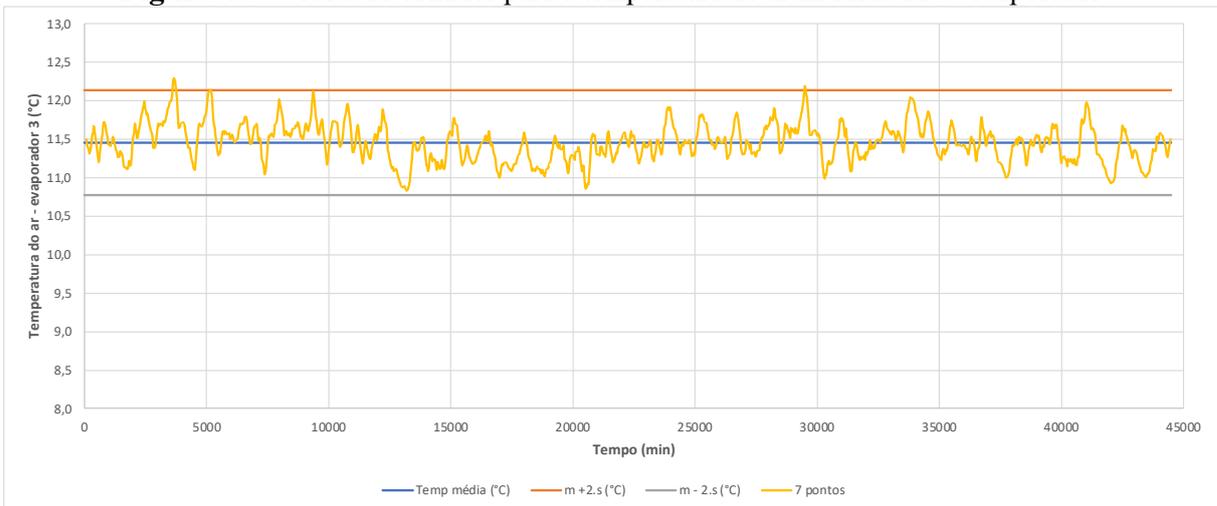
Fonte: autoria própria

Figura 4.2 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 2º evaporador



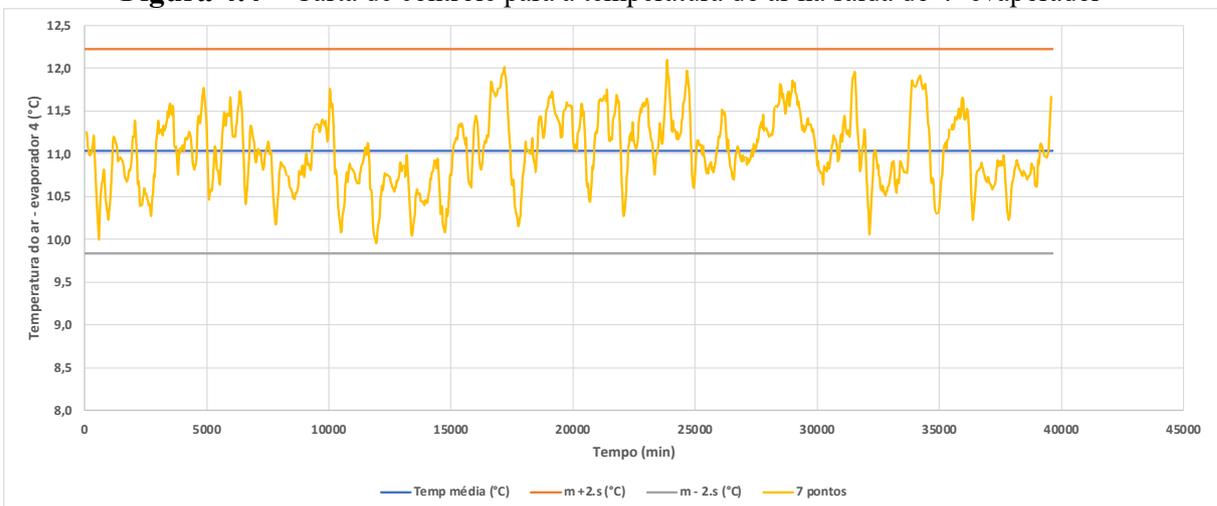
Fonte: autoria própria

Figura 4.3 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 3º evaporador



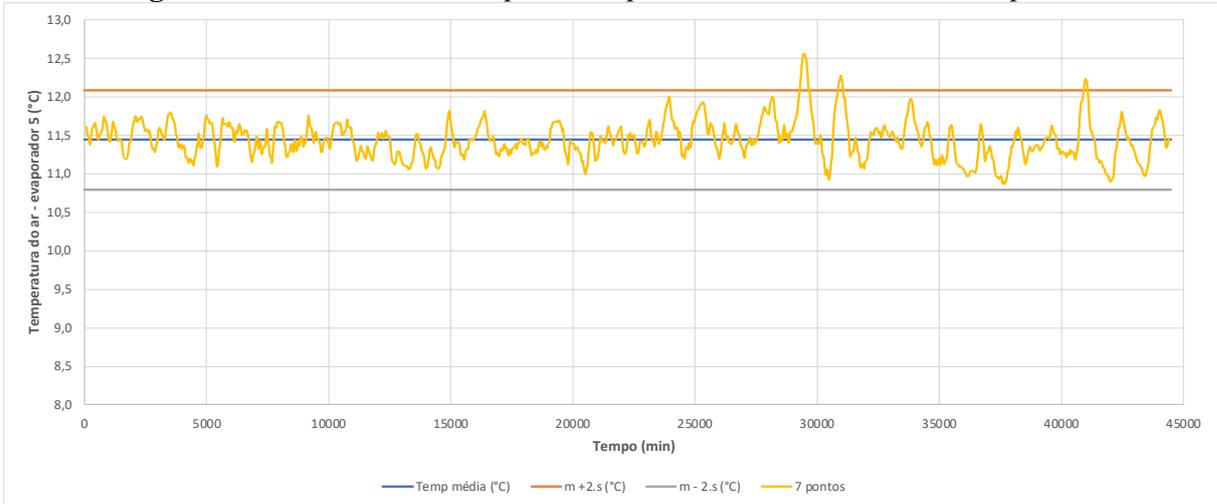
Fonte: autoria própria

Figura 4.4 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 4º evaporador



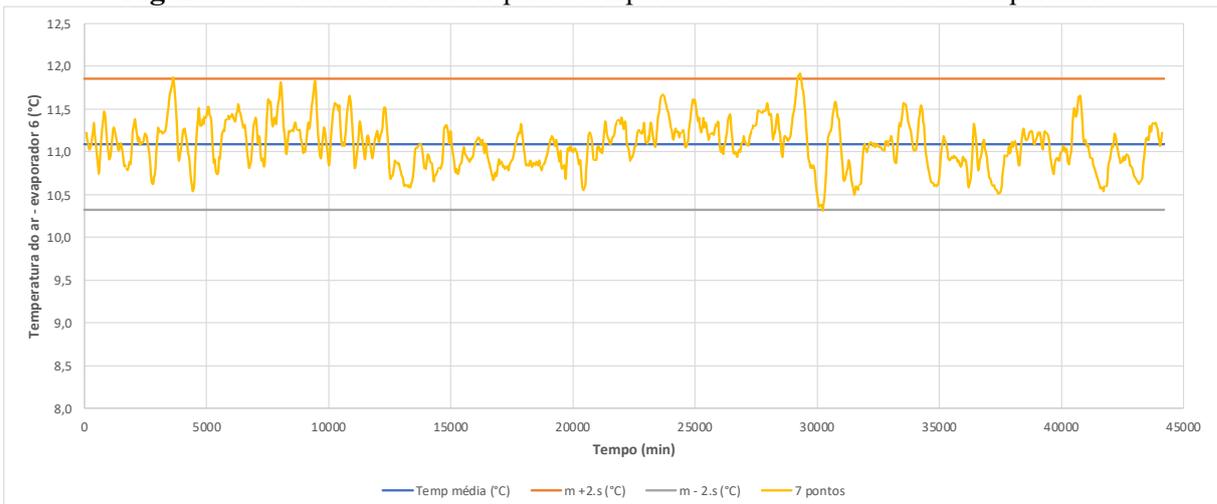
Fonte: autoria própria

Figura 4.5 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 5º evaporador



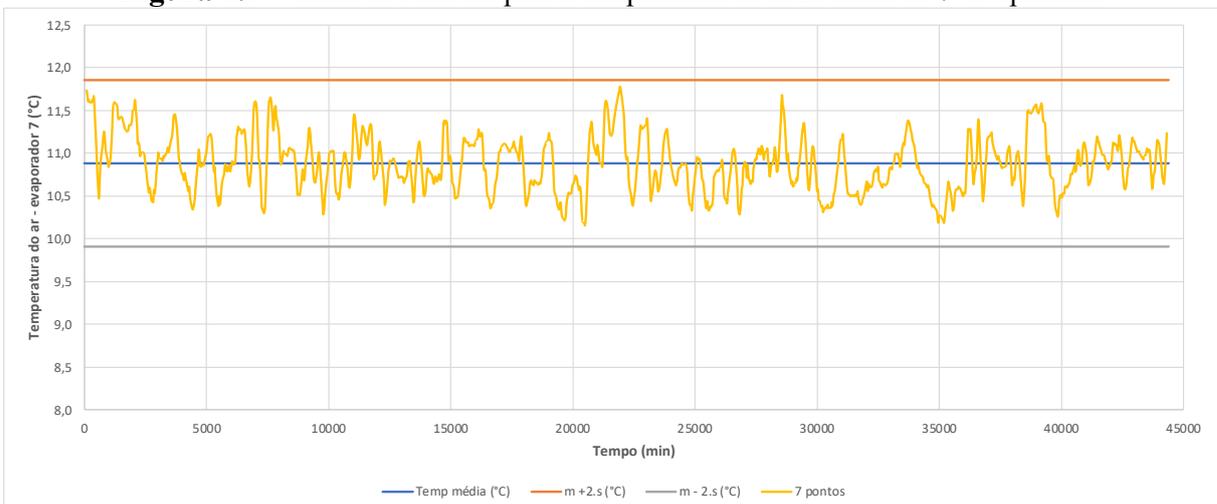
Fonte: autoria própria

Figura 4.6 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 6º evaporador



Fonte: autoria própria

Figura 4.7 – Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 7º evaporador



Fonte: autoria própria

Já na Tabela 4.1 são apresentados os valores da temperatura média do ar na saída de cada um dos evaporadores, seguido da respectiva variabilidade.

Tabela 4.1 – Valores médios de temperatura do ar e sua variabilidade

Evaporador	Temperatura do ar (°C)	Variabilidade (%)
1	11,3	9,8
2	11,5	6,7
3	11,5	5,9
4	11	10,8
5	11,4	5,6
6	11,1	6,9
7	11,3	10,2

Fonte: autoria própria

A primeira constatação que pode ser feita é a de que as temperaturas do ar na saída de cada um dos evaporadores apresentaram diferentes dispersões em torno do valor médio, expressas em função da variabilidade do conjunto de medidas.

As temperaturas do ar na saída dos evaporadores 1, 4 e 7 foram as que apresentaram maiores valores de variabilidade, sugerindo com isto que seriam as mais diretamente afetadas pela movimentação do ar infiltrado no interior do armazém. Contudo, não se pode descartar o fato de que a variabilidade observada seja fruto de uma condição temporária inadequada de funcionamento do sistema de refrigeração. Ademais, a carga térmica introduzida com o produto colocado no interior do armazém também poderia ter contribuído para aumentar a variabilidade da temperatura do ar no armazém.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.1, pode-se afirmar que a partir do instante 30.000 minutos ocorreu uma significativa alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 1**. Observa-se nitidamente que o processo em estudo saiu da condição de centralização do seu comportamento, denotando uma perturbação sistemática que poderia ser explicada pela movimentação de carga no armazém.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.2, pode-se também afirmar que a partir do instante 30.000 minutos ocorreu uma significativa alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 2**. Observa-se, contudo, que o processo em estudo manteve seu comportamento em estado estacionário, denotando uma perturbação sistemática menos impactante, que igualmente poderia ser explicada pela movimentação de carga no armazém.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.3, pode-se afirmar que praticamente não houve alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 3**. Observa-se, também, que o processo em estudo não saiu da condição de centralização do seu comportamento, denotando ter sido pouco afetado pela movimentação de carga no armazém.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.4, pode-se afirmar que praticamente não houve alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 4**, sendo possível observar que o processo em estudo manteve seu comportamento em estado estacionário, denotando ter sido pouco afetado pela movimentação de carga no armazém. O que chama a atenção é a maior variabilidade no comportamento da temperatura que poderia ser fruto de uma condição temporária inadequada de funcionamento do sistema de refrigeração ou da carga térmica introduzida com o produto colocado no interior do armazém.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.5, pode-se afirmar que praticamente não houve alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 5**. Observa-se, também, que o processo em estudo não saiu da condição de centralização do seu comportamento e apresentou pouca variabilidade, denotando ter sido pouco afetado pela movimentação de carga no armazém.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.6, pode-se afirmar que praticamente não houve alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 6**. Observa-se, também, que o processo em estudo manteve seu comportamento em estado estacionário; contudo, apresentou maior variabilidade, denotando ter sido mais afetado pela movimentação de carga no armazém. Outra possibilidade seria o funcionamento irregular do sistema de refrigeração, que poderia estar momentaneamente passando por manutenção.

Com base no comportamento da temperatura do ar, observado na Figura 4.7, pode-se afirmar que praticamente não houve alteração na tendência de comportamento da temperatura de saída do ar do **evaporador 7**. Observa-se, também, que o processo em estudo não saiu da condição de centralização do seu comportamento; contudo, apresentou maior variabilidade, denotando ter sido mais afetado por fatores similares ao já apresentado para o **evaporador 6**.

Um resumo da análise realizada é apresentado na Tabela 4.2, que se destina a orientar a análise da tendência de comportamento do processo. A temperatura do ar na saída do

evaporador 1 é a que foi mais afetada pela movimentação de carga no interior do armazém estudado.

Tabela 4.2 – Tendência de comportamento do processo

Evaporador	Centralização do processo	Variabilidade
1	não	elevada
2	sim	média
3	sim	baixa
4	sim	elevada
5	sim	baixa
6	sim	média
7	sim	elevada

Fonte: autoria própria

Outro ponto que poderia ter contribuído para afetar o comportamento da temperatura do ar no interior do armazém estaria associado com a localização da porta de acesso da empilhadeira ao armazém. O armazém estudado possui duas portas de acesso para a movimentação de carga. Uma das portas está localizada em região com menor circulação natural do ar ambiente e a outra está localizada em região com maior circulação natural do ar ambiente.

Tipicamente, o carregamento do armazém estudado é feito pela porta com menor circulação natural do ar ambiente e o descarregamento do armazém estudado é realizado pela porta com maior circulação natural do ar ambiente. Este fato poderia justificar a perda de centralização do processo verificada na temperatura de saída do ar no **evaporador 1**, caso este seja montado mais próximo da porta localizada em região com maior circulação natural do ar ambiente.

Para favorecer a melhor análise de dados, foi utilizado o recurso denominado **planilha de previsão** do Microsoft Excel™. Esta ferramenta permite calcular a projeção de valores futuros a partir de valores passados, com um intervalo de confiança padronizado de 95%. A ferramenta também permite, automaticamente, identificar a presença de sazonalidade e preencher os valores correspondentes aos pontos ausentes com base na média ponderada de seus vizinhos. Por fim, a previsão prevê valores futuros usando dados existentes baseados em tempo e a versão AAA do algoritmo ETS (Suavização Exponencial).

Além de gerar o gráfico, a planilha de previsão também tem como resultado uma tabela com índices estatísticos, tais como: coeficientes de suavização (Alfa, Beta e Gamma) e métricas de erro (MASE, SMAPE, MAE e RMSE). Vale ressaltar que é utilizada a função

FORECAST.ETS.STAT do Microsoft Excel™. No Quadro 4.1 é apresentado o significado de cada índice citado.

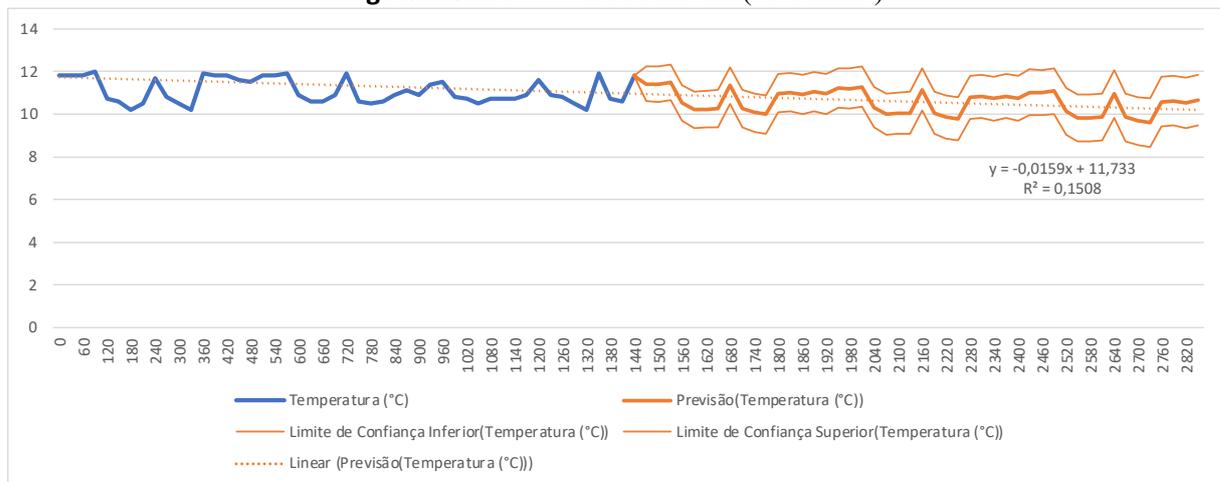
Quadro 4.1 – Índices Estatísticos

Estadística	Significado
Alpha	Quanto maior valor, maior o peso dos dados recentes.
Beta	Quanto maior valor, maior o peso à tendência recente.
Gamma	Quanto maior valor, maior o peso ao período sazonal recente.
MASE	Medida de precisão da previsão.
SMAPE	Medida baseada em erros percentuais da previsão.
MAE	Mede o erro absoluto.
RMSE	Mede o erro absoluto pela raiz do quadrado do erro absoluto.

Fonte: autoria própria

Assim, ao levar em consideração a série temporal, nota-se que quanto maior a base de dados, mais assertiva será a previsão da tendência de longo prazo. Fato constatado no maior valor do parâmetro Alfa para a previsão com 30 dias de dados (Tabela 4.4) do que para dados de apenas 1 dia (Tabela 4.3). Porém, nota-se uma perda na assertividade de curto prazo. Tanto ao analisar o R^2 da Figura 4.8 e da Figura 4.9 quanto o MASE da Tabela 4.3 e Tabela 4.4. Desse modo, a base de 1 dia é mais assertiva na previsão de valores futuros de curto prazo, enquanto a base de 30 dias é eficiente na análise da tendência da série temporal.

Figura 4.8 – Planilha de Previsão (Base 1 dia)

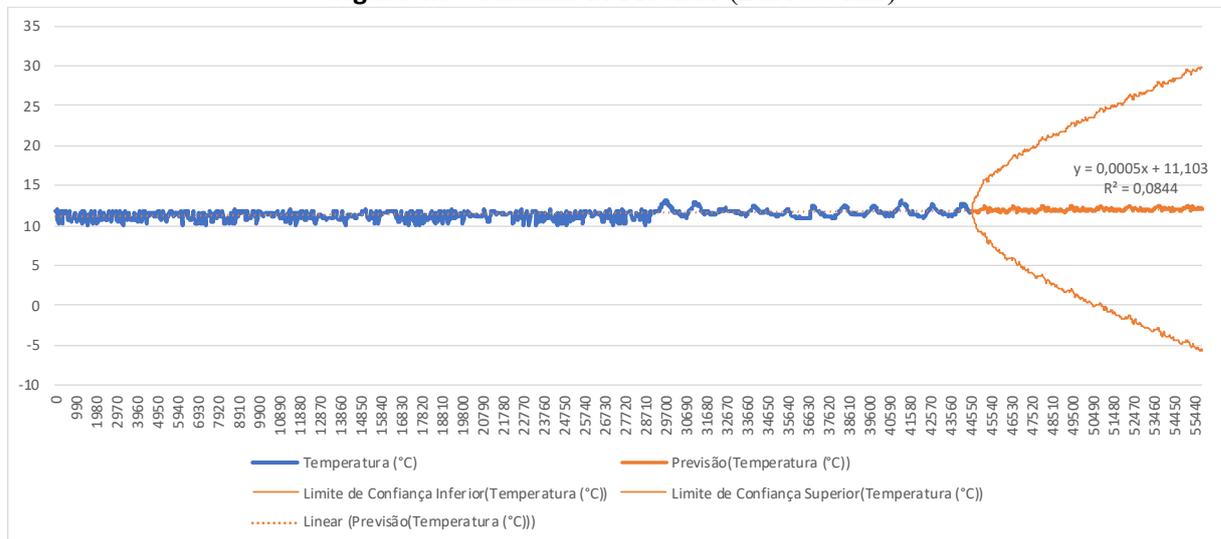


Fonte: autoria própria

Tabela 4.3 – Previsões estatísticas (Base 1 dia)

Estatística	Valor
Alpha	0,13
Beta	0,00
Gamma	0,00
MASE	1,32
SMAPE	0,05
MAE	0,55
RMSE	0,60

Fonte: autoria própria

Figura 4.9 – Planilha de Previsão (Base 30 dias)

Fonte: autoria própria

Tabela 4.4 – Previsões estatísticas (Base 30 dias)

Estatística	Valor
Alpha	0,90
Beta	0,00
Gamma	0,10
MASE	0,51
SMAPE	0,01
MAE	0,15
RMSE	0,19

Fonte: autoria própria

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho, permitiu a avaliação de situações tipicamente encontradas em operações de armazenamento de sementes em armazéns refrigerados.

Foi utilizado o Controle Estatístico de Processo para representar o comportamento da variável de processo de interesse no estudo que é a temperatura do ar no interior do armazém. Em que pese o fato de a análise realizada apresentar limitações quanto à fenomenologia envolvida no processo, os resultados obtidos permitiram verificar a coerência do comportamento da temperatura do armazém com a movimentação da carga, sendo possível avaliar a contribuição da infiltração do ar ambiente no armazém estudado.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a temperatura do armazém é afetada pela abertura e fechamento repetitivo da porta do carregamento e descarregamento, apresentando um aumento em seu valor da ordem de 1°C no pior cenário avaliado. Pode-se, ainda, concluir que a abertura e fechamento esporádico da porta do armazém, não apresenta influência sobre a temperatura dele.

Além disso, a utilização da média móvel de 7 pontos no estudo permitiu uma suavização nas oscilações da série temporal e, assim, favoreceu a percepção mais assertiva da tendência da temperatura nas medições. Somado à análise de média móvel, a análise dos resultados da ferramenta **planilha de previsão** do Microsoft Excel™, conclui-se que para a análise da tendência do processo, o correto é utilizar a maior série temporal possível. Já para a previsão de valores futuros, os dados mais recentes possuem maior peso e, assim, é mais assertivo utilizá-los na previsão de curto prazo.

Adicionalmente, esse trabalho permitiu que um conteúdo abstrato que diz respeito ao comportamento dinâmico de um sistema seja traduzido de maneira simples e observável ao estudante do curso de graduação, facultando a este a melhoria do processo de apropriação do conhecimento.

É recomendada a continuidade deste trabalho, contemplando o funcionamento do sistema de refrigeração no modelo e – se possível – a realização de medições experimentais da vazão de ar infiltrado com os respectivos valores de temperatura e umidade para validar o estudo realizado neste TCC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16401-1 – Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projeto das instalações.** 2008. 60 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16401-1 – Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** 2008. 7 p.
- ASHRAE. **ASHRAE Refrigeration 2010** - SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- BRITTAİN, H. **Performance Assessment for Management – ISA Show Houston Fall 2003.** Disponível em: <https://www.techplus.com.br/tecnicas-controle-avancado/> Acesso em: 10 dez. 2022.
- LEVINE, D. M., BERENSON, M. L. e STEPHAN, D. – **Estatística: Teoria e Aplicações usando o Excel.** Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- MACAGNAN, M. H. **Capítulo 8 - Carga Térmica.** Unisinos, São Leopoldo, Outubro, 2015.
- MAKRIDAKIS, S., WHEELWRIGHT, S.C., HYNDMAN, R.J. **Forecasting: methods and applications.** 3rd ed.- New York: Wiley, 1998.
- MORETTIN, P.A. e TOLOI, C.M.C. **Previsão de séries temporais.** . São Paulo: Atual ,1985.
- OLIVEIRA JUNIOR, H.G.; OLIVEIRA, L.C.R.; TORRES, B.S. **Métodos de monitoramento, redução e controle de variabilidade em processos industriais.** *Intech*, 92, s.d., pp. 16-22.
- SCHMITZ, M. I. **Determinação de parâmetros termodinâmicos para projetos de equipamentos de refrigeração de carrocerias refrigeradas.** Lajeado, RS: Centro Universitário UNIVATES, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.
- SEBRAS. **Infiltração em câmara frigorífica industrial: como reduzir os impactos?** Disponível em: <https://sebras.com.br/2019/10/14/infiltracao-camara-frigorifica-industrial/>. Acesso em: 10 de agosto de 2022.
- SOUZA, R. C. **Modelos estruturais para previsão de séries temporais: abordagens clássica e bayesiana.** Rio de Janeiro, *17º Colóquio Brasileiro de Matemática.* 1989.
- VAN DEN BERG, R.A.; VAN DE MORTEL-FRONCZAK, J.M.; ROODA, J.E. **Sources of Process Time Variability.** Eindhoven University of Technology, 2002 (*white paper*)
- WHEELER, J. M. **Getting Started: Six-Sigma Control of Chemical Operations.** *CEP Magazine*, 98 (6), 2002, pp. 76-81.

APÊNDICE

ANÁLISE QUANTITATIVA DA CARGA TÉRMICA DEVIDO A

INFILTRAÇÃO DE AR (Q_{inf})

No subitem 2.1.7 do TCC, foi apresentada qualitativamente a correlação da Equação 2.8, para determinação da carga térmica oriunda da infiltração de ar Q_{inf} . Este apêndice tem como objetivo a determinação quantitativa do mesmo de modo a determinar a carga térmica média, em MW, para um dia de operação (24 horas).

$$Q_{inf} = q \cdot D_t \cdot D_f \cdot (1 - E) \cdot 86.400 \quad (2.8)$$

Para tanto, considerou-se as Equações 2.9, 2.10 e 2.11, na realização dos cálculos do mesmo, bem como os valores apresentados na Tabela A.1.

$$q = 0,221 \cdot A_p \cdot (h_i - h_r) \cdot \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_r}\right)^{0,5} \cdot (g \cdot H)^{0,5} \cdot F_m \quad (2.9)$$

$$F_m = \left(\frac{2}{1 + \frac{\rho_i^{\frac{1}{3}}}{\rho_r}} \right)^{1,5} \quad (2.10)$$

$$D_t = \frac{(P \cdot \theta_p + 60 \cdot \theta_o)}{(3600 \cdot \theta_d)} \quad (2.11)$$

Tabela A.1 - Parâmetros Correlação Carga Térmica de Infiltração do Ar (Q_{inf})

Parâmetro	Valor
P	200
θ_p	20 s
θ_o	1 min
θ_d	24 h
A_p	10 m ²
h_i	33,43 $\frac{KJ}{Kg}$
h_r	12,19 $\frac{KJ}{Kg}$
g	9,8 $\frac{m}{s^2}$
H	5 m

Os valores de densidade do ar $\left[\frac{m}{s^2}\right]$, para cada respectiva temperatura $[^{\circ}C]$, foram obtidos com base na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Densidade do ar $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ versus temperatura $[^{\circ}C]$

Parâmetro	Valor
35	1,1455
30	1,1644
25	1,1839
20	1,2041
15	1,225
10	1,2466
5	1,269
0	1,2922
-5	1,3163
-10	1,3413
-15	1,3673
-20	1,3943
-25	1,4224

Fonte: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/massa-especifica-do-ar.html>

O mesmo aplica-se ao fator de escoamento através da porta e efetividade da proteção oferecida pela porta, como apresentado na Tabela A.3 e na Tabela A.4. É válido destacar que, quando não existem dispositivos de proteção, o valor da efetividade será nulo.

Tabela A.3 - Valores usuais para fator fluxo de porta

Condição	Fator fluxo de porta (D_f)
Porta aberta para ar livre ou grande sala	1,0
Tráfego igual a uma entra e saída por minuto, com diferença de temperatura interna e externa de 16 K	0,8
Diferenças de temperatura de 7 e 10 K	1,1
Recomendado para diferenças de temperaturas menor que 11 °C	1,1
Recomendado para diferenciais de temperatura maiores que 11 °C	0,8

Fonte: ASHRAE (2010)

Tabela A.4 - Valores de efetividade para alguns dispositivos de proteção de portas

Dispositivo	Efetividade (E)
Cortina de ar vertical	0,79
Cortina de ar horizontal	0,76
Cortina de tiras de plástico	0,93
Cortina de ar mais cortina de plástico	0,91

Fonte: MACAGNAN (2015)

Considerou-se, também: (i)- a altitude da cidade de Uberlândia, equivalente a 863 m; (ii)- a temperatura do ar infiltrado, igual a 27°C e (iii)- a temperatura do ar refrigerado 10°C.

Obteve-se, então, os valores apresentados na Tabela A.5 com base nas informações anteriormente apresentadas.

Tabela A.5 - Parâmetros da Correlação Carga Térmica de Infiltração do Ar (Q_{inf})

Parâmetro	Valor
F_m	1,0159
q	103,2 MW
D_t	0,047

Resultando, então, em um valor de Carga Térmica de Infiltração (Q_{inf}) de 4,85 MW, com base em 200 aberturas de portas, em 24 horas.