



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



**AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM ARMAZÉM UTILIZANDO
CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO**

GUILHERME HENRIQUE DA SILVA MOURA

UBERLÂNDIA-MG

2022



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



**AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM ARMAZÉM UTILIZANDO
CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO**

GUILHERME HENRIQUE DA SILVA MOURA

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. Jader Conceição da Silva

UBERLÂNDIA-MG

2022

Guilherme Henrique da Silva Moura

**AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM ARMAZÉM UTILIZANDO
CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO**

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. Jader Conceição da Silva

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Eng. Mestre Rafael Yuri Medeiros Barbosa

Doutorando do PPGEQ / UFU

Uberlândia, 28 de dezembro de 2022

Dedico este trabalho aos meus pais
Brunno e Zilma, pela confiança e
incentivo. Foi por vocês, heróis da minha
vida, fonte de inspiração e força. Sem
vocês, jamais teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus pela minha saúde e por ter me guiado nessa jornada. Por ter me dado força nos momentos mais difíceis e por proporcionar incontáveis momentos de alegria, muito obrigado, meu Deus!

À minha mãe, heroína da minha vida, minha fonte de inspiração, força e determinação, muito obrigado por viver comigo esse desafio. Obrigado pelos dias em que sorrimos juntos e mais ainda por aqueles que me ensinaste sobre resiliência. Me inspiro em ti e serei eternamente grato por tudo que tens feito por mim.

Ao meu pai, companheiro e amigo, obrigado pelos conselhos, pelas sábias palavras e por estar comigo em todos os momentos. Sem vocês, eu jamais teria chegado até aqui. Me orgulho de levantar todos os dias e saber que estamos vivendo esse sonho juntos. Foi por vocês!

Agradeço aos meus amigos que trilharam esse caminho comigo. Compartilhamos juntos essa jornada e dividimos momentos de alegria e de tristeza. Jamais esquecerei de vocês, e serei eternamente grato por dividirem comigo cada passo dessa caminhada.

Ao grande amor da minha vida, Fabiana, muito obrigado por ser meu porto seguro nos momentos mais difíceis e por vibrar comigo cada momento de felicidade.

A todos vocês, meu muito obrigado!

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 manejo é primordial para assegurar sua integralidade e preservar sua qualidade, 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 teve como objetivo estudar 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, visando identificar o comportamento da temperatura do armazém ao longo de 30 dias de operação típica. Concluiu-se que o comportamento da temperatura do ar no interior do armazém apresentou comportamento diferente nas distintas regiões do armazém analisado. A temperatura mais afetada foi a medida na saída do evaporador nº 1, ao passo que a temperatura do ar na saída dos demais evaporadores praticamente não sofreu alterações significativas.

Palavras-chave: Troca térmica, infiltração de ar, Controle Estatístico de Processo.

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 were used, aiming to identify the behavior of the warehouse temperature over 30 days of typical operation. It was concluded that the behavior of the air temperature inside the warehouse showed different behavior in the different regions of the analyzed warehouse. The most affected temperature was measured at the outlet of evaporator #1, while the air temperature at the outlet of the other evaporators practically did not change significantly.

Keywords: Heat exchange, air infiltration, Mathematical modeling, Statistical Process Control.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Carta de controle típica	12
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	20
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	21
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

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.A: Carga Térmica de Infiltração – Porta Isopainel versus Fechamento Rápido	14
Tabela 3.A: Informações sobre o armazém.	19
Tabela 4.A: Valores médios de temperatura do ar e sua variabilidade.....	22
Tabela 4.B: Tendência de comportamento do processo	24

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 Controle Estatístico de Processo (CEP).....	8
	2.2.1. Gráfico de Pareto	9
	2.2.2. Histograma	9
	2.2.3. Folhas de verificação	9
	2.2.4. Diagrama de fluxo.....	10
	2.2.5. Diagrama de causa e efeito ou diagrama de espinha de peixe	10
	2.2.6. Diagrama de dispersão	10
	2.2.7. Série Temporal.....	10
	2.2.8. Carta de controle:.....	10
	2.2.9. Diário de bordo:	11
2.3.	Considerações sobre a infiltração de ar externo em armazéns	12
2.4.	Considerações sobre a variabilidade em processos industriais	15
3	ELABORAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE	19

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5	CONCLUSÃO.....	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
	APÊNDICE	28

1 INTRODUÇÃO

Armazéns são áreas importantes 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.

Em se tratando do armazenamento de alimentos (com foco nos grãos, objeto de estudo do presente trabalho), visto que se trata de um longo período ao qual eles 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. Aplicar os conceitos de Controle Estatístico de Processo no estudo do comportamento da temperatura do armazém; e
- 1.2.2. Avaliar a existência regiões de temperaturas diferentes no interior do armazém.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

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

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 na 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 $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

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 $[\text{°C}]$.

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 $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{dia}}\right]$;

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

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

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

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

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

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 trabalho 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.

Uma vez definido o objeto de estudo do presente trabalho, é 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 Controle Estatístico de Processo (CEP)

O CEP é um método sistemático de análise de dados e uso de informações para resolver problemas e controlar operações. Ele pode ser empregado como um sistema de controle de qualidade, agindo como: (i)- um sistema de detecção, o qual atua sobre o resultado do processo ou (ii)- como um sistema de prevenção, atuando diretamente sobre o processo.

Quando se aborda o emprego do CEP, é importante ter em mente que existe a figura do **custo da não qualidade**, que afeta diretamente a rentabilidade do processo. Dentre os custos

de não qualidade, pode-se citar: *(i)*- o custo de prevenção; *(ii)*- o custo de avaliação e *(iii)*- o custo de reparação, que envolve o custo de falhas internas e externas.

Outro conceito importante é o conceito de **especificação**, cuja definição pode ser expressa como sendo requisitos pré-estabelecidos do produto que devem ser alcançados a fim de que o mesmo atenda às necessidades para as quais foi criado. Através das especificações é que se determina a qualidade do lote. Associado ao conceito em tela, está o conceito de **tolerância**, o qual pode ser definido como a faixa de variação admissível para uma dada propriedade.

O **processo** em estudo deve ser entendido como o sistema de trabalho adotado para se produzir determinado produto ou manter determinada condição dentro das especificações, sendo constituído de cinco fatores que influenciam no seu comportamento, a saber: *(i)*- mão-de-obra; *(ii)*- máquina; *(iii)*- métodos; *(iv)*- material e *(v)*- meio ambiente.

Outro aspecto relevante neste tema são as **ferramentas básicas** empregadas para a utilização de CEP que são brevemente descritas na sequência:

2.2.1. Gráfico de Pareto

É um gráfico de barras onde cada barra representa um dos problemas existentes. A altura de cada barra corresponde à incidência do problema que está sendo analisado e estes são ordenados de modo decrescente em relação as frequências de ocorrência.

Essa abordagem foi feita originalmente por J. M. Juran, que estabeleceu a “regra dos poucos vitais e dos muitos triviais”. Através de sua utilização decide-se onde concentrar os esforços de modo a se ter um melhor retorno.

2.2.2. Histograma

É um diagrama de barras de uma distribuição de frequências, que auxilia na visualização da distribuição da característica que está sendo estudada.

2.2.3. Folhas de verificação

São folhas para coleta de dados que ajudam a garantir a qualidade dos mesmos. As mais comuns são as folhas de verificação para distribuições do processo, para itens defeituosos, para localização de defeitos e para causa e efeito.

2.2.4. Diagrama de fluxo

É um diagrama que mostra em qual ordem ocorrem os passos ou atividades de um processo, facilitando a identificação dos pontos do processo em que o controle das atividades deve ser iniciado.

2.2.5. Diagrama de causa e efeito ou diagrama de espinha de peixe

É um diagrama que tem como objetivo, pesquisar as relações entre causas e efeitos que intervêm no processo. As causas ou os fatores são representados por setas que concorrem para o efeito que está sendo estudado. Geralmente os processos são analisados a partir de cinco grupos de fatores, a saber: máquina, método, material, mão-de-obra e ambiente.

2.2.6. Diagrama de dispersão

É um gráfico para duas características que ajuda a verificar a existência de relação causal e a determinar a importância e tendência desta relação.

2.2.7. Série Temporal

Antes de se estabelecer os limites de controle e de se calcular os índices é importante ter certeza de que o processo está estável. Quando as amostras forem retiradas sequencialmente, é necessário fazer um gráfico dos dados em função do tempo, isto é, em função da ordem em que esses dados foram coletados. Tendências e ciclos presentes no processo são facilmente detectados através do uso de tais gráficos.

2.2.8. Carta de controle

É uma ferramenta utilizada para verificar o comportamento do processo durante a sua execução, a fim de se saber se ele está ou não está sob controle. Esta ferramenta é constituída de uma folha onde na frente aparecem os gráficos de controle e no verso o diário de bordo. Para se controlar as variações do processo ao longo do tempo é conveniente retirar-se algumas amostras em intervalos regulares de tempo de modo que estas sejam representativas do lote produzido naquele intervalo de tempo. Os resultados da avaliação destas amostras devem ser registrados num gráfico cartesiano denominado carta de controle. Com base na utilização das cartas de controle pode-se detectar variações na centralização, na dispersão ou em ambas.

2.2.9. Diário de bordo

O Diário de bordo é um complemento da carta de controle que traz em seu verso um espaço próprio para se registrar todas as mudanças ocorridas durante o processo. Este instrumento é importante para a análise do comportamento do gráfico de controle, devendo ter em cada registro a data, a hora e o comentário explicando claramente todas as informações possíveis a respeito das mudanças ocorridas.

Outro conceito importante nesta área do conhecimento é o conceito de **estabilidade**. Diz-se que um processo está estável quando existe a repetibilidade de resultados, dentro de uma faixa pré-estabelecida, e, havendo estabilidade, há a possibilidade de se tentar controlar estatisticamente um processo.

Para que seja possível realizar um bom CEP, é fundamental que a coleta dos dados seja feita de maneira criteriosa. Para atender a este requisito, deve-se atender aos seguintes itens: *(i)*- que dados devem ser coletados; *(ii)*- em que ponto do processo os dados devem ser coletados; e *(iii)*- como os dados serão coletados (tempo, custo versus a precisão do processo de medida).

Para responder as perguntas formuladas no parágrafo anterior, deve-se: *(i)*- selecionar amostras no início do processo e conhecer as limitações do operador; *(ii)*- selecionar amostras separadamente para isolar as fontes de variação; *(iii)*- minimizar mudanças dentro das amostras e *(iv)*- decidir a frequência de amostragem, levando em conta quão crítica é a característica estudada, qual é o controle e a capacidade histórica do processo, o tipo do processo e o custo envolvido.

Neste trabalho foi dada ênfase ao emprego das **cartas de controle**, por ser a ferramenta utilizada para verificar o comportamento do processo durante a sua execução, a fim de se saber se o mesmo está ou não sob controle. Inicialmente era constituída por uma folha de papel, na qual se construíam os **gráficos de controle** na parte da frente e no verso das mesmas são feitas as anotações que compõem o diário de bordo.

Para se controlar as variações do processo ao longo do tempo, é conveniente retirar algumas amostras em intervalos regulares de tempo, de modo que estas sejam representativas do lote produzido naquele intervalo de tempo. Os resultados da avaliação das amostras devem ser registrados no gráfico cartesiano denominado carta de controle. Através das cartas de

controle pode-se detectar as variações na **centralização**, na **dispersão** ou em ambas. Na **Figura 2.1** é apresentada a representação típica de uma carta de controle.

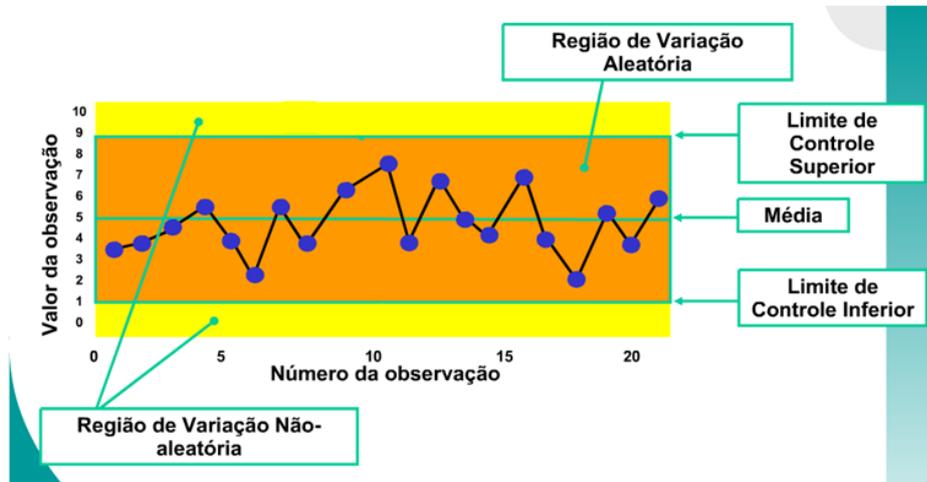


Figura 2.1: Carta de controle típica

Quando são empregadas **variáveis** no controle estatístico de processo, são necessários dois gráficos, a saber: um para controlar a centralização do processo e para controlar a sua variabilidade (dispersão). Cada gráfico de controle tem uma finalidade específica e um não substitui o outro. Considerando o emprego de **cartas de controle para média (\bar{X}) e amplitude (R)**, sabe-se que os **limites para o controle da média** são apresentados na **Equação (2.12a)** e na **Equação (2.12b)**.

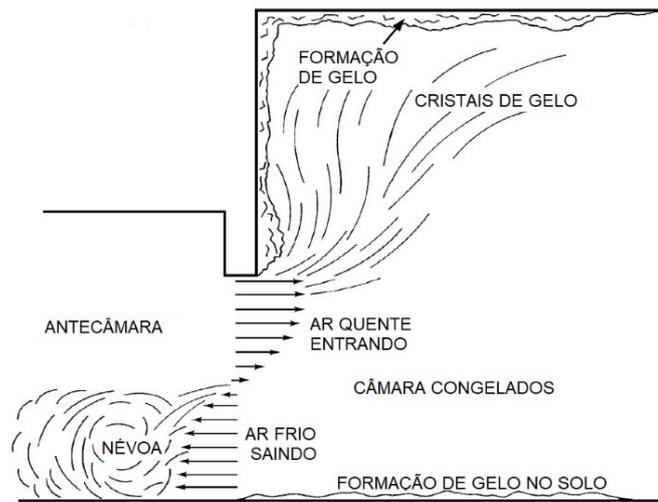
$$LSC_{\bar{X}} = \mu + 3 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.12a)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \mu - 3 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.12b)$$

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.A: 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 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.

Presente na significativa maioria dos processos industriais, a variabilidade 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 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.

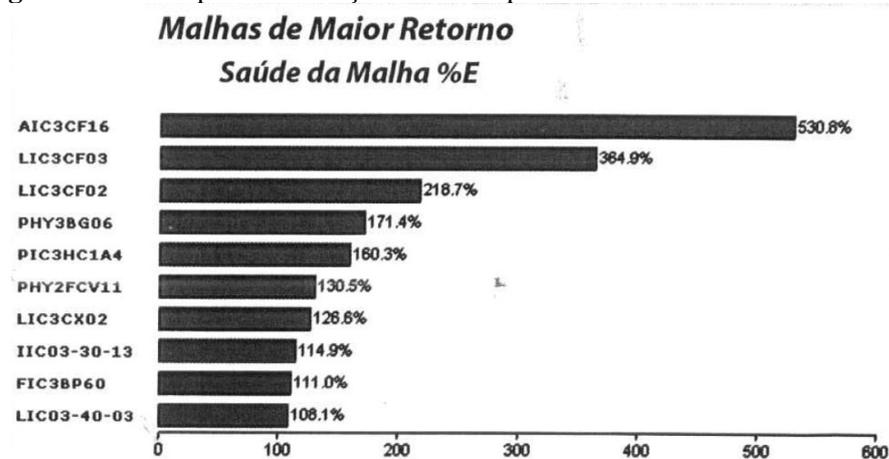
Existem diversas maneiras de se medir a variabilidade apresentada por um processo. No caso específico das malhas de controle, caso o *set-point* seja constante, a variância ou o desvio padrão pode ser empregados como medida da dispersão do valor da variável controlada em torno do valor do *set-point*. 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. 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. A principal diferença em relação aos métodos tradicionais 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, independentemente do número de defeitos que ele apresenta. Essa abordagem torna o método Seis Sigma mais preciso.

3 ELABORAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE

A elaboração das cartas de controle 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.

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.

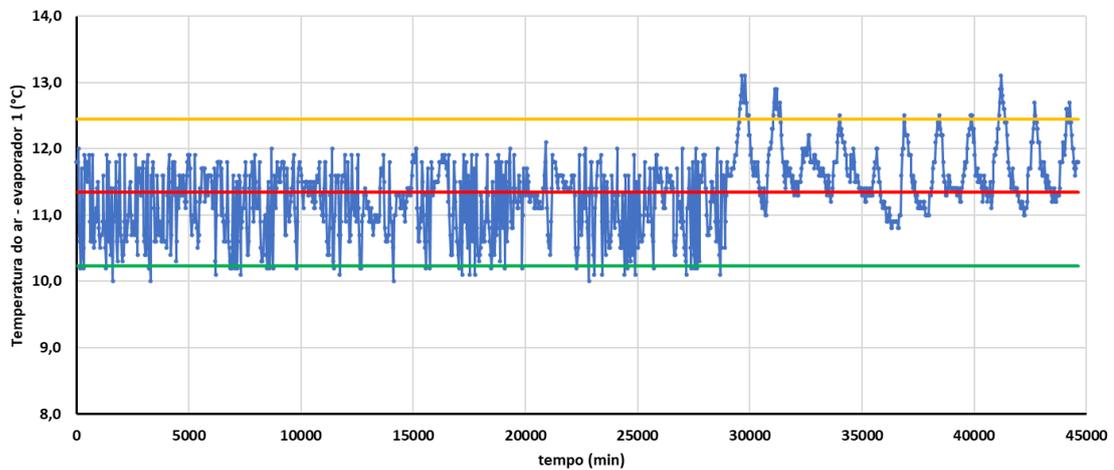
Tabela 3.A: Informações sobre o armazém.

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.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

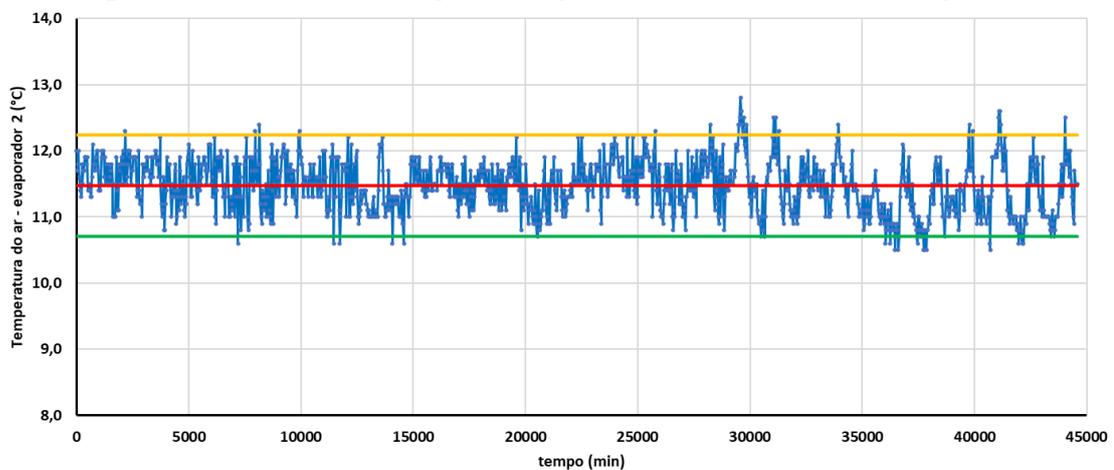
As cartas de controle foram construídas considerando o intervalo de aproximadamente 30 dias de operação contínua de um armazém típico, durante 24 horas por dia. O armazém considerado estava equipado com 07 evaporadores dispostos no interior do mesmo de maneira a proporcionar uma boa circulação do ar 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. As cartas de controle estão apresentadas nas **Figuras 4.1 a 4.7** e na **Tabela 4.1** são apresentados os valores da temperatura média do ar na saída de cada um dos evaporadores, seguido da respectiva variabilidade.

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

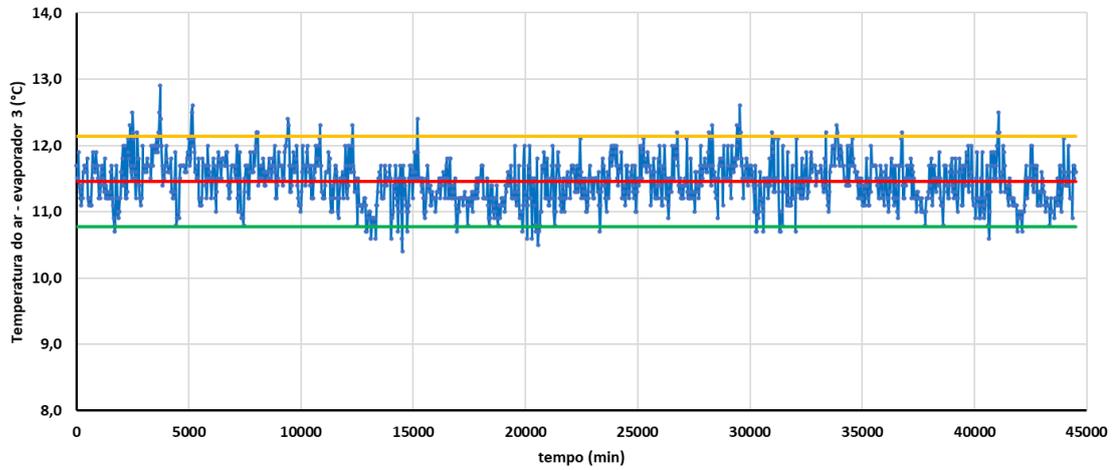


Fonte: autoria própria

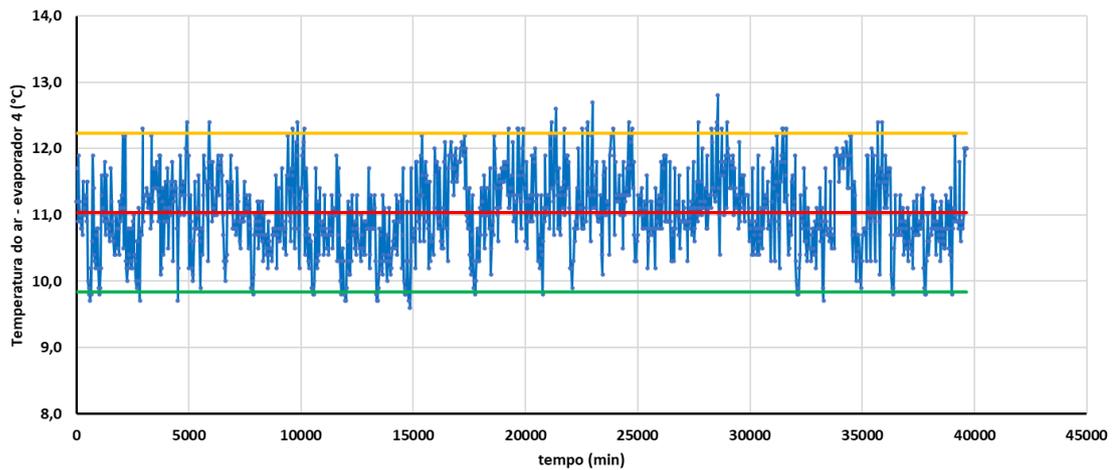
Figura 4.2: Carta de controle para a temperatura do ar na saída do 2º evaporador



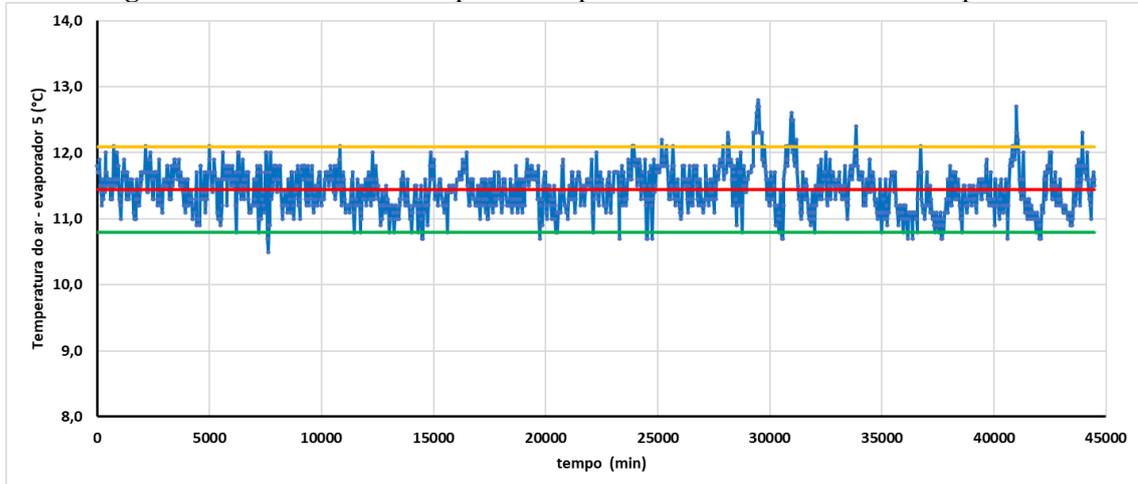
Fonte: autoria própria

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

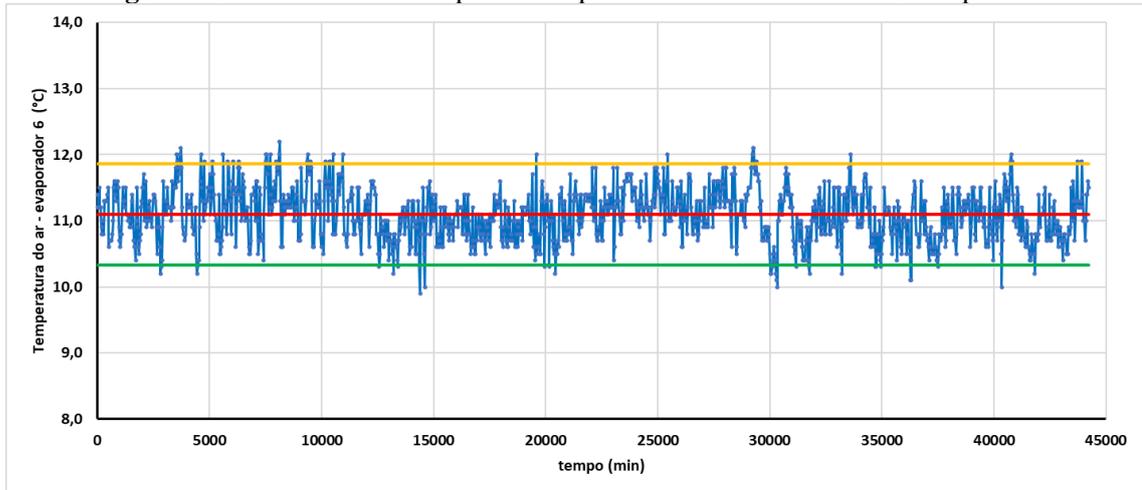
Fonte: autoria própria

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

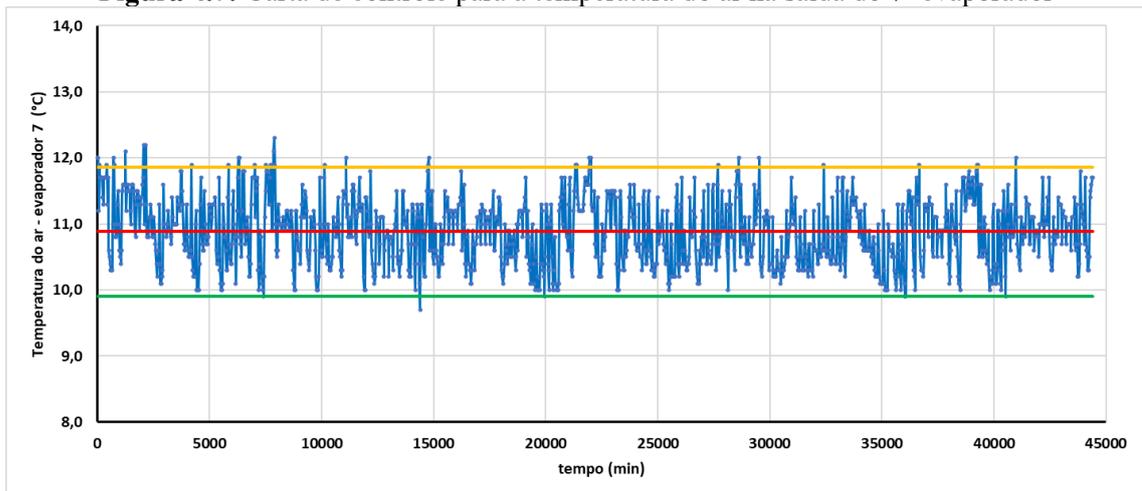
Fonte: autoria própria

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

Tabela 4.A: 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 não saiu da condição de centralização do seu comportamento, 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 não saiu da condição de centralização do seu comportamento, 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 não saiu da condição de centralização do seu comportamento; 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.B: 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.

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 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, 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.

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 trabalho.

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, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **ASHRAE Refrigeration 2010** - SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 2010.

BRITTAIN, 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.

MACAGNAN, M. H. **Capítulo 8 - Carga Térmica.** Unisinos, São Leopoldo, Outubro, 2015.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control.** 4 ed., New York, NY: John Wiley & Sons, 2000, 816p.

SCHMITZ, M. I. **Determinação de parâmetros termodinâmicos para projetos de equipamentos de refrigeração de carrocerias refrigeradas.** Lajeado, 2016.

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.

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
θp	20 s
θo	1 min
θd	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 (<i>E</i>)
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.