



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



**ESTUDO DO IMPACTO DA INFILTRAÇÃO DE AR EM ARMAZÉNS**

**GIOVANA BARBOSA MENDONÇA**

**UBERLÂNDIA-MG**

**2022**



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



## **ESTUDO DO IMPACTO DA INFILTRAÇÃO DE AR EM ARMAZÉNS**

**GIOVANA BARBOSA MENDONÇA**

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. Fábio de Oliveira Arouca

**UBERLÂNDIA-MG**

**2022**

**Giovana Barbosa Mendonça**

**ESTUDO DO IMPACTO DA RENOVAÇÃO DO AR EM ARMAZÉNS**

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. Fabio de Oliveira Arouca

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, 19 de Agosto de 2022

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, por segurar em minha mão e me guiar a uma jornada maravilhosa, me proporcionando voos lindos, outrora jamais imaginados. Foi nEle que o meu choro de angústia em momentos de desalento se fez calmaria, até se alcançar os mais belos e longos sorrisos em momentos de vitórias. A Ele agradeço a cada desafio vencido, a cada local em que os meus pés e a minha voz alcançaram, feito conforme a Sua vontade. Obrigada meu Deus, foi por Ti!

Agradeço à minha Família. Meus pais, que me apoiaram e me suportaram neste sonho. As orações, os abraços acolhedores, os conselhos, os sorrisos, as lágrimas e cada abdicção valeram a pena! Ao meu irmão, a minha gratidão, por ser o meu exemplo de humildade e honestidade. Agradeço ao meu namorado, por todos os momentos e cada experiência vivenciada juntos, ao longo desta jornada. Esta conquista é, também, de vocês, que sonharam por este momento junto a mim, a cada instante!

Aos meus colegas de curso, o meu muito obrigada, pelas trocas de conhecimento, de boas risadas, de bons momentos, de culturas!

Agradeço ao Programa de Educação Tutorial da Graduação em Engenharia Química (PET-EQ) por todo o desenvolvimento e momentos únicos de muito aprendizado. Agradeço a todos os docentes e funcionários da Faculdade de Engenharia Química, por todo aprendizado e recurso aos quais tive acesso. Agradeço, especialmente, aos Professores Rubens Gedraite e Fabio Arouca, por acreditarem e se dedicarem junto a mim neste Trabalho de Conclusão de Curso.

## 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. Foi proposto um modelo matemático simplificado do processo considerado, como base na equação de balanço global de energia aplicado ao volume de controle definido pelo armazém em estudo. Para realizar a simulação foi utilizado o software Matlab/Simulink™ e considerado o tempo de simulação de 24 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. Foram consideradas perturbações na temperatura de ar externo infiltrado, do tipo pulso único, com amplitude igual a 10°C e diferentes durações variando entre 20s e 120s, e do tipo sequência contínua de pulsos, de amplitude igual a 10°C e duração igual a 120s, cada, aplicados a partir do início da simulação. O período adotado para a sequência de pulsos foi de 1.200 s. Concluiu-se que o comportamento da temperatura do ar no interior do armazém praticamente não é afetado pelo distúrbio do tipo pulso único, independentemente da sua duração. Já para o distúrbio caracterizado como sequência de pulsos, a temperatura do ar no interior do armazém é afetada, apresentando uma variação de aproximadamente 8°C. 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, Modelagem matemática, Matlab/Simulink™.

## 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. In the case of grain storage, its management is essential to ensure their integrity and preserve their quality, avoiding subsequent product losses. The humidity and temperature parameters, when not controlled, can favor 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 in its interior due to the opening and closing of the access door of forklifts. A simplified mathematical model of the considered process was proposed, based on the global energy balance equation applied to the control volume defined by the warehouse under study. To perform the simulation, Matlab/Simulink™ software was used and the simulation time of 24 hours of warehouse operation was considered. The analysis carried out in this work focused solely on the process of air infiltration, without taking into account the other variables that participate in the process, since the focus was to evaluate the impact of the entrance of external air and the exit of the air from the warehouse on its temperature. Disturbances in the infiltrated external air temperature were considered, of the single pulse type, with an amplitude equal to 10°C and different durations ranging from 20s to 120s, and of the continuous sequence of pulses type, with an amplitude equal to 10°C and duration equal to 120s each applied from the start of the simulation. The period adopted for the pulse sequence was 1,200 s. It was concluded that the behavior of the air temperature inside the warehouse is practically unaffected by the single pulse disturbance, regardless of its duration. For the disturbance characterized as a sequence of pulses, the air temperature inside the warehouse is affected, presenting a variation of approximately 8°C. This increase was expected, as the amount of heat introduced into the warehouse with each opening and closing of the loading door implies the introduction of heat into the warehouse.

**Keywords:** Heat exchange, air infiltration, Mathematical modeling, Matlab/Simulink™.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva de reação de processo superamortecido de ordem 2 ou superior submetido a degrau de amplitude $A = 1$ . .....	13
Figura 2.2 – Método da tangente para determinação dos parâmetros do modelo. ....	14
Figura 2.3 – Método dos 63,2% a partir de uma curva de reação do processo. ....	15
Figura 2.4 - Fluxo de ar frio e ar quente na abertura típica de portas em câmaras frigoríficas industriais. ....	16
Figura 2. 5 - Porta de Fechamento Rápido – Ambientes até -35°C .....	18
Figura 2. 6 - Porta de Fechamento Rápido – Ambientes até -35°C. ....	19
Figura 4. 1 - Diagrama de simulação da troca térmica em armazém considerando perturbação pulso na temperatura do ar infiltrado para um valor pré-definido de vazão.....	23
Figura 4.2 - Diagrama de simulação da troca térmica em armazém considerando perturbação do tipo trem de pulsos na temperatura do ar infiltrado para um valor pré-definido de vazão..	25
Figura 5.1 - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 20 segundos.....	26
Figura 5.2 - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 40 segundos.....	27
Figura 5. 3 - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 60 segundos.....	27
Figura 5.4 - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 80 segundos.....	28
Figura 5.5 - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 100 segundos.....	28
Figura 5.6 - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 120 segundos.....	29
Figura 5.7 - Resposta da temperatura do armazém ao distúrbio em <b><i>Tar infiltrado</i></b> .....	30

## LISTA DE QUADROS E FIGURAS

Quadro 2.1 - Quadro com os principais elementos de processo.....	12
Tabela 2.1 - Carga Térmica de Infiltração – Porta Isopainel versus Fechamento Rápido. ....	18
Tabela 3.1 - Informações sobre o armazém.....	22

## 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];

$\eta$ : 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 [m<sup>2</sup>];

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

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

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

$\rho_r$ : 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];

**$\theta p$** : Tempo de abertura / fechamento da porta [s];

**$\theta o$** : Tempo em que a porta permanece aberta [s];

**$\theta d$** : 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];

**$\tau_{ar}$** : 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 [m<sup>3</sup>];

**$P_{operação}$** : 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];

**$\Delta t_{porta}$** : 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;

**$\theta$** : Tempo morto [s];

**$\tau$** : Constante de tempo do processo [s];

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Objetivo Geral .....	1
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 $Q_{pes}$ .....	4
	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 modelos matemáticos.....	8
2.3.	Considerações sobre a infiltração de ar externo em armazéns .....	16
2.4.	Considerações sobre o cálculo de carga térmica em armazéns usando planilha eletrônica.....	19
3	MODELAMENTO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO .....	20
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO .....	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1	Distúrbio na forma de um único pulso no valor de $Tar_{infiltrado}$ .....	26
5.2	Distúrbio em trem de pulsos no valor de $Tar_{infiltrado}$ .....	29
6	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	32
	APÊNDICE .....	33

## **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.

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 o mesmo ficará submetido, 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, serão realizados neste trabalho, os cálculos de carga térmica devido unicamente à renovação do ar em um armazém de grãos, de modo a identificar o impacto da operação normal sobre a temperatura e a umidade do ar no interior do armazém.

### **1.1. Objetivo Geral**

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o impacto da abertura e fechamento da porta do armazém sobre a sua temperatura 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. desenvolver um modelo matemático simplificado para representar o comportamento da temperatura no interior do armazém em resposta ao impacto da abertura e fechamento da porta do armazém;
- 1.2.2. configurar o modelo matemático no aplicativo computacional Matlab™/Simulink™;
- 1.2.3. simular computacionalmente o modelo e obter informações para a compreensão do que acontece no interior do armazém.

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

$U$ : 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.

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

Em que:

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

$N$ : Número de motores internos [adimensional];

$\eta$ : 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];

$\eta$ : 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  $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$ ;

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

$\rho_r$ : 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]; 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  $\rho_i$  e  $\rho_r$ , anteriormente apresentados.

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

O fator do tempo de duração de abertura da porta ( $D_t$ ) é calculado pela **Eq. (2.11)**, dependente de  $\rho_i$  e  $\rho_r$ , 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;

$\theta p$ : Tempo de abertura / fechamento da porta [s];

$\theta o$ : Tempo em que a porta permanece aberta [min.]; e

$\theta d$ : 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, 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 modelos matemáticos

Completando a revisão bibliográfica, será apresentada a revisão bibliográfica correspondente ao modelamento matemático aproximado do sistema estudado neste Trabalho de Conclusão de Curso. Conceitua-se **modelo** como sendo qualquer artifício que nos permita reproduzir a realidade física de um determinado sistema. A dimensão e a complexidade do sistema dependem do grau de detalhe com o qual se deseja realizar o estudo. (LUYBEN, 1990).

O comportamento dos componentes ou dos sistemas físicos é normalmente tão complexo que seu equacionamento exato pode se tornar intratável pelos métodos matemáticos usuais. O recurso que se dispõe é o de idealizar aquele comportamento, desprezando certo número de minúcias que têm influência ínfima no processo; a cada idealização corresponde a um modelo matemático do componente ou do sistema.

Um dos objetivos principais da simulação do funcionamento de um equipamento ou planta é conhecer melhor o mesmo, identificando gargalos de produção ou modificações

cabíveis no sentido de melhorar o processo em termos energéticos, com relação à especificação de produtos finais, ou ainda, no consumo de matérias primas. Assim, por meio de ferramentas adequadas, conhecimento físico do sistema que estiver sendo analisado e principalmente bom senso, é possível criar modelos que reproduzam (simulem) o comportamento real, ao menos dentro de uma determinada faixa, de um equipamento ou mesmo de um processo inteiro.

Com base na conceituação de modelo, pode-se definir dois tipos principais, a saber *i)* - modelo físico e *ii)* - modelo matemático. O modelo físico é um modelo que reproduz o sistema fisicamente, ou seja, é uma reprodução do que já existe, ou irá existir, em escala diferente. Nesta categoria encaixam-se os protótipos e as plantas piloto. O modelo matemático é um modelo que reproduz o sistema abstratamente, ou seja, representa a realidade por meio de equações matemáticas. A ideia de modelo matemático é simples, mas, muitas vezes, essa ideia simples produz uma gama de intrincadas equações, que tornam complicado seu desenvolvimento.

Antes de discorrer sobre o modelamento matemático de processos, é feita uma breve introdução aos elementos básicos que, associados, representam processos industriais de forma aproximada. A grande maioria dos processos industriais pode ser representada, de forma aproximada, como uma combinação de quatro elementos básicos: *i)* - ganho; *ii)* - atraso de transporte; *iii)* - atraso de transferência e *iv)* - integrador. Na prática, não é comum a presença de integradores puros. Dessa forma pode-se, em princípio, modelar a maioria dos processos industriais através de ganho estático e dos atrasos de transporte e de transferência (GEDRAITE, 2021).

O **atraso de transporte** é o intervalo de tempo, relacionado com o deslocamento de massa ou energia de um ponto a outro do processo e durante o qual a perturbação ainda não chegou ao ponto observado. Também é conhecido como tempo morto, atraso puro, *dead time* ou *pure time delay*. Esse tipo de atraso ocorre quando há um fenômeno de transporte de material ou energia (por exemplo: distância entre o ponto de medição e o ponto onde a variável efetivamente se manifesta, malhas de reciclo ou atrasos associados com a análise da composição química de certos componentes do processo) ou há um cálculo matemático no dispositivo de controle, que ocasiona um atraso na resposta. Aparece em quase todos os processos e raramente sozinho. É inerente ao sistema.

As partes do processo que têm a propriedade de armazenar energia ou material são chamadas de **capacitâncias**. Elas se comportam como se fossem um *buffer* entre a entrada e a saída. Elas se apresentam das seguintes formas: *i)* - inércias, nos sistemas mecânicos; *ii)* -

capacitores, nos sistemas elétricos; *iii*) - tanques, nos sistemas fluídicos; e *iv*) - capacitâncias térmicas, nos sistemas térmicos.

Por outro lado, as partes do processo que resistem à transferência de energia ou material são chamadas de **resistências**. Estas se apresentam das seguintes formas: *i*) - atritos, nos sistemas mecânicos; *ii*) - resistores, nos sistemas elétricos; *iii*) - perdas de carga por atrito (distribuídas ou concentradas), nos sistemas fluídicos; e *iv*) - resistências térmicas, nos sistemas térmicos.

O efeito combinado das propriedades de resistência e capacitância resulta no **atraso de transferência** do processo que, em termos práticos, corresponde a um atraso na resposta de uma saída (variável) do processo com relação a uma entrada. Numericamente, é a **constante de tempo**  $\tau$  que caracteriza um atraso de transferência de um processo. Esta constante pode ser obtida multiplicando-se (em unidades coerentes) o valor da capacitância pelo valor da resistência.

Os modelos matemáticos dividem-se em dois grandes grupos, a saber: *i*) - modelos a parâmetros concentrados e *ii*) - modelos a parâmetros distribuídos. Os **modelos a parâmetros concentrados** são aqueles nos quais a distribuição espacial não importa. Por exemplo, um reator de mistura perfeita é um sistema a parâmetros concentrados. Não importa em que posição se mede a concentração dos reagentes, pois essa concentração é a mesma para todo o reator. Os **modelos a parâmetros distribuídos** são aqueles, nos quais a distribuição espacial é importante. Por exemplo, uma coluna de absorção, na qual a concentração muda ponto a ponto (de uma forma contínua), ou uma coluna de destilação, na qual a concentração muda prato a prato (MELO & PINTO, 2008).

As equações utilizadas na elaboração de modelos matemáticos podem ser classificadas em: Equações de Transporte, Equações de Balanços, Equações da Termodinâmica, Equações Cinéticas e Equações Empíricas (GARCIA, 2005).

O conhecimento do comportamento dinâmico de um processo é muito útil para selecionar o tipo de controlador e seus ajustes mais adequados. Esse conhecimento normalmente deve ser traduzido na forma de um modelo do processo, que é o primeiro passo na análise de um sistema de controle. Uma vez obtido tal modelo, existem vários métodos disponíveis para a análise do desempenho do sistema.

Há diversos modos de se obter o modelo matemático de um processo. Modelos teóricos baseados na Química e na Física do sistema representam uma alternativa. Detalhes sobre esta

forma de se obter modelos, intitulada modelamento fenomenológico, podem ser encontrados em Seborg *et al.* (1989). No entanto, o desenvolvimento de modelos teóricos rigorosos pode não ser prático para processos complexos, se o modelo requer um grande número de equações diferenciais com um número significativo de parâmetros desconhecidos (por exemplo, propriedades físicas e químicas). Uma abordagem alternativa é obter um modelo empírico diretamente a partir de dados experimentais, os quais são também chamados de modelos "caixa preta". A técnica para obtenção de modelos a partir de dados coletados experimentalmente é chamada de identificação de sistemas.

A identificação de sistemas pode ser dividida em duas formas básicas: identificação paramétrica e identificação não-paramétrica. Trata-se de um assunto bastante extenso, sendo que maiores informações sobre ambas as técnicas podem ser encontradas em Garcia (2005). No entanto, a identificação não-paramétrica será abordada aqui de forma resumida, devido a sua importância na obtenção de modelos aproximados, de baixa ordem, de processos industriais.

Na prática, o sinal de entrada de um sistema não é conhecido "a priori", mas é de caráter aleatório e a entrada instantânea não pode normalmente ser expressa analiticamente. Na análise do comportamento de um sistema, deve-se ter uma base para comparar seu desempenho. Esta base pode ser obtida especificando-se certos sinais de teste de entrada e analisando a resposta do sistema a esses sinais. Os sinais de entrada de teste comumente usados em identificação de sistemas para se obter os dados a respeito do comportamento de processos e assim determinar os modelos empíricos desejados, são as funções impulso, degrau, rampa, senoidal, PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*), etc.

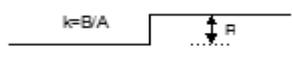
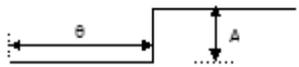
A identificação não-paramétrica emprega basicamente curvas de resposta do processo quando excitados por sinais de entrada do tipo degrau, impulso ou senoidal. A partir dessas curvas, podem-se extrair modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevam o comportamento dinâmico do processo. Esses modelos são pouco precisos, mas podem ser suficientes para se ter uma ideia do comportamento do processo ou podem ser usados para efetuar a pré-sintonia de controladores PID, ou então para entender o comportamento do processo durante situações transitórias ou ainda para analisar o desempenho de um sistema de controle agindo sobre o processo.

A entrada normalmente mais usada para identificar, de forma não-paramétrica, processos industriais é a excitação em degrau. Esses ensaios normalmente permitem gerar, graficamente, modelos empíricos dinâmicos representados por uma função de transferência de

baixa ordem (1ª ou 2ª ordem, eventualmente incluindo um tempo morto) com, no máximo, quatro parâmetros a serem determinados experimentalmente.

**Seborg et al. (1989)** afirmam que muitos dos processos podem ser representados de forma aproximada, pela combinação de quatro elementos tipicamente encontrados em processos industriais, a saber: (i)- ganho, (ii)- atraso de transporte, (iii)- atraso de transferência e (iv)- elemento integrador. No **Quadro 2.1** são apresentadas as principais características destes elementos.

**Quadro 2.1** - Quadro com os principais elementos de processo.

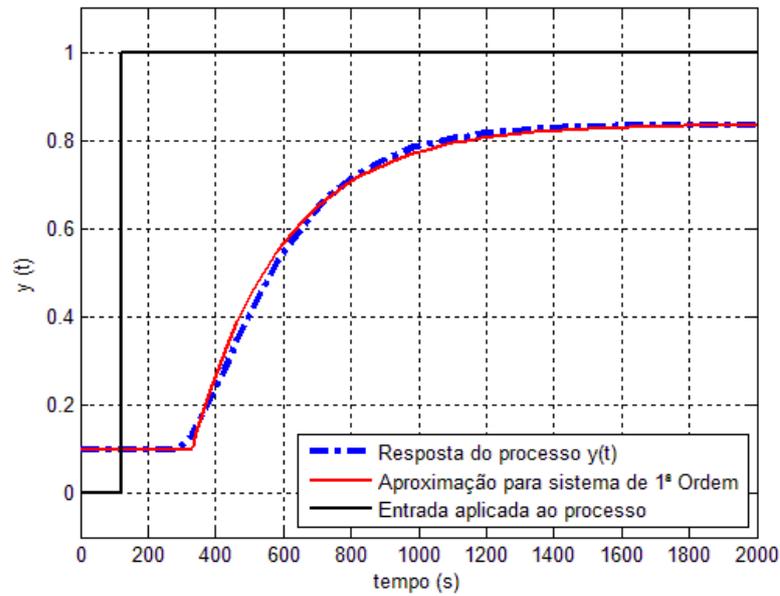
Elemento	Equação	Função transferência	Resposta ao degrau amplitude A = 1
<b>Ganho</b>	$y = k \cdot x$	$\frac{k}{s}$	
<b>Atraso de transferência</b>	$y = A \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	$\frac{1}{\tau \cdot s + 1}$	
<b>Atraso de transporte</b>	$y = 0, \quad p/t < 0$ $y = x, \quad p/t \geq 0$	$e^{-\theta \cdot s}$	
<b>Integrador</b>	$y = \frac{A}{\tau} \cdot t = \alpha \cdot t$	$\frac{1}{\tau \cdot s}$	

A curva de resposta de um sistema estável de ordem superior é a soma de certo número de curvas exponenciais e curvas senoidais amortecidas. Uma característica particular de tais curvas de resposta é que pequenas oscilações são superpostas em oscilações maiores ou sobre curvas exponenciais. Componentes de decaimento rápido têm significância somente na parte inicial da resposta transitória.

A aproximação de sistemas superamortecidos de ordem 2 ou superior por atraso de transferência mais tempo morto pode ser feita pela função de transferência apresentada na **Eq. (2.12)**.

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-\theta \cdot s} \quad (2.12)$$

O tempo morto é incluído para considerar os elementos de ordem mais alta que são desprezados. Na **Figura 2.1** são apresentadas as curvas de reação típica de processos superamortecidos de 2ª ordem ou superior (curva com formato em “S”) e da resposta aproximada pela função de transferência aproximada e a função perturbação do tipo “degrau” que corresponde ao sinal de entrada aplicado ao processo.



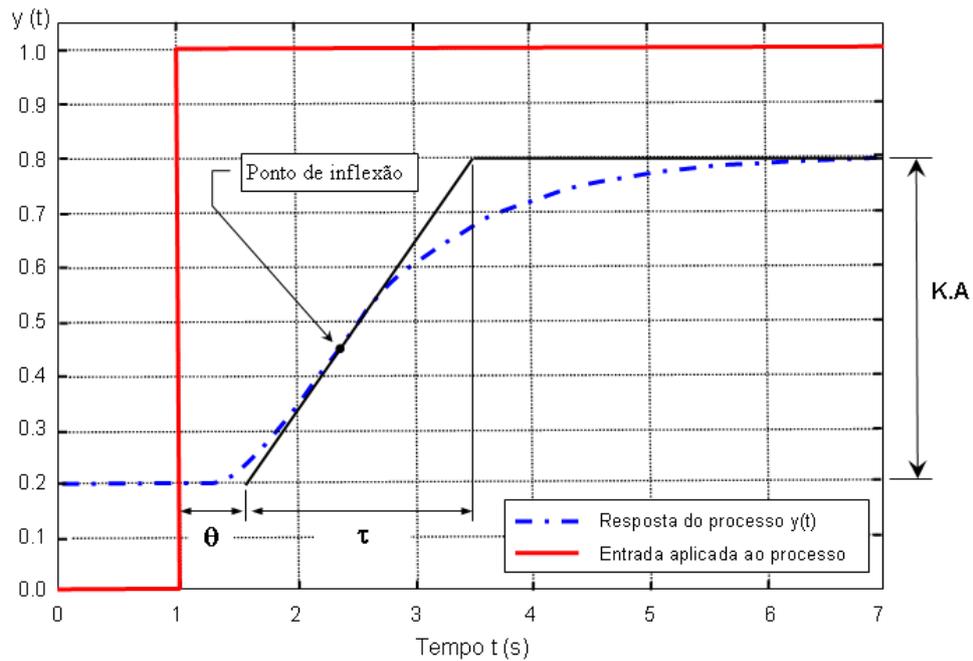
**Figura 2.1** - Curva de reação de processo superamortecido de ordem 2 ou superior submetido a degrau de amplitude  $A = 1$ .

O valor do ganho  $K$  pode ser obtido dividindo-se a amplitude da variação da saída do processo pela amplitude  $A$  do degrau aplicado, como apresentado na **Eq. (2.13)**.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{\infty}}{A} \quad (2.13)$$

Existem diversos métodos de se determinar os parâmetros  $\theta$  e  $\tau$  do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto, a saber: *(i)*- Método da Tangente, *(ii)*- Método de Miller, *(iii)*- Método de Smith e *(iv)*- Método de Sundaresan, Prasad e Krishnaswamy.

No **Método da Tangente**, originalmente proposto em **Ziegler & Nichols (1942)**, deve-se traçar uma tangente através do ponto de inflexão da curva de resposta do processo. Essa tangente deve ser traçada desde o valor estacionário do processo antes de ocorrer a perturbação até o novo valor estacionário, conforme mostrado na **Figura 2.2**.

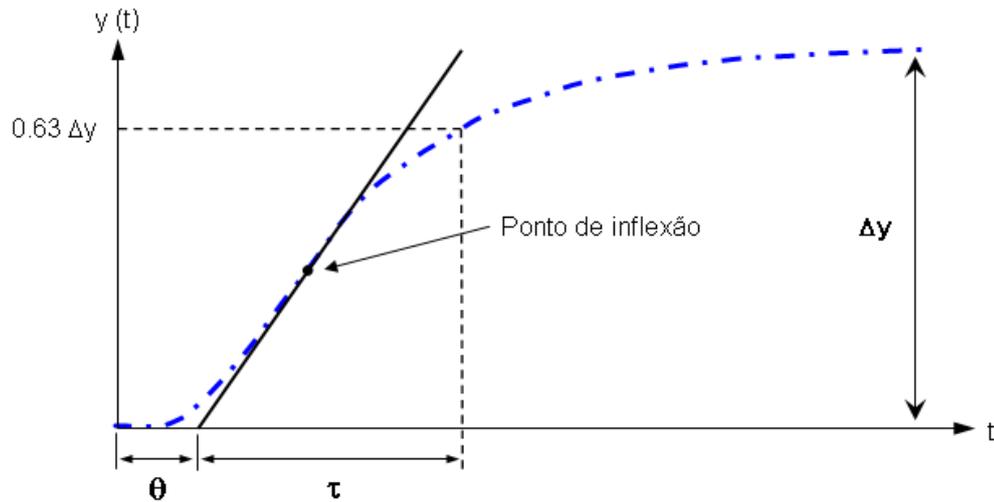


**Figura 2.2** – Método da tangente para determinação dos parâmetros do modelo.

O tempo morto  $\theta$  corresponde ao tempo entre o instante de aplicação do degrau até o ponto em que a tangente traçada encontra com o valor original do regime estacionário do processo antes da perturbação em degrau, conforme mostrado na **Figura 2.2**.

O instante de tempo em que a tangente cruza com a linha que representa o valor estacionário da resposta após a aplicação do degrau representa o valor  $\theta + \tau$ . A constante de tempo  $\tau$  corresponde ao intervalo de tempo entre os instantes em que a tangente traçada se encontra tanto com o valor original do regime estacionário do processo quanto com o novo valor do regime estacionário do mesmo.

No **Método de Miller**, proposto em **Sundaresan et al. (1978)**, o tempo em que a resposta do processo atinge 63,2% de seu valor final corresponde a  $\theta + \tau$ . A determinação do valor de  $\theta$  é feita de forma idêntica à do método da tangente. Sua aplicação pode ser vista na **Figura 2.3**.



**Figura 2.3** – Método dos 63,2% a partir de uma curva de reação do processo.

Considerando a dificuldade de traçar a linha tangente com precisão, é apresentada no **Método de Smith** uma alternativa se determinar os valores de  $\theta$  e  $\tau$  a partir de dois pontos na curva de reação do processo.

A solução analítica para a resposta ao degrau de amplitude  $A$  de um sistema de 1ª ordem com tempo morto é apresentada na **Eq. (2.14)**, para valores de  $t > 0$ .

$$y(t) = A \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{(t-\theta)}{\tau}} \right] \quad (2.14)$$

Suponha que se calcule  $y(t)$  em dois instantes de tempo quaisquer, como por exemplo,  $t_1 = \theta + \frac{\tau}{3}$  e  $t_2 = \theta + \tau$ , como apresentado na **Eq. (2.15)** e na **Eq. (2.16)**.

$$y\left(\theta + \frac{\tau}{3}\right) = 0,284 \cdot \Delta y \quad (2.15)$$

$$y(\theta + \tau) = 0,632 \cdot \Delta y \quad (2.16)$$

Os tempos em que a resposta atinge 28,4% e 63,2% de seu valor final podem ser obtidos a partir da curva de reação do processo, como apresentado na **Eq. (2.17)** e na **Eq. (2.18)**.

$$t_{0,284} = \theta + \frac{\tau}{3} \quad (2.17)$$

$$t_{0,632} = \theta + \tau \quad (2.18)$$

A solução desse sistema de duas equações fornece  $\theta$  e  $\tau$ , conforme apresentado na **Eq. (2.19)** e na **Eq. (2.20)**.

$$\tau = 1,5 \cdot (t_{0,632} - t_{0,284}) \quad (2.19)$$

$$\theta = 1,5 \cdot \left( t_{0,284} - \frac{t_{0,632}}{3} \right) = t_{0,632} - \tau \quad (2.20)$$

Um método similar ao anterior também foi proposto por **Sundaresan et al (1978)**. Neste caso, propõem-se dois tempos,  $t_1$  e  $t_2$  e calcula-se  $\theta$  e  $\tau$  pela **Eq. (2.21)** e pela **Eq. (2.22)**.

$$\tau = 0,675 \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.21)$$

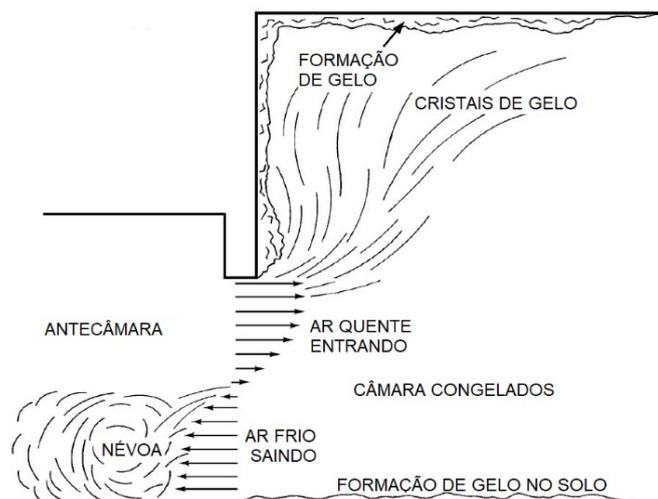
$$\theta = 1,29 \cdot t_1 - 0,294 \cdot t_2 \quad (2.22)$$

Onde  $t_1$  e  $t_2$  são estimados a partir da curva de resposta a uma entrada degrau e correspondem à 35,3% e 85,3% respectivamente, dos valores da variação da resposta em regime estacionário.

### 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 2.4**.

**Figura 2.4** - 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 2.5 e 2.6**, 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 empilhadeira, por exemplo, é comum a permanência das portas do tipo isopanel 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 isopanel 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**, abaixo.

- 1) Isopanel: Abertura no início do carregamento e fechamento da mesma apenas ao encerrá-lo. Tempo de carregamento considerado de 3 minutos/palete, totalizando 72 minutos de porta aberta.
- 2) Fechamento Rápido: Abertura e fechamento rápido da porta em cada passagem da empilhadeira. Tempo de carregamento considerado de 20 segundos em cada passagem, totalizando 16 minutos de porta aberta.

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

Tipo	Carga Térmica de Infiltração	
	(kW)	(kcal/h)
<i>Porta de Isopanel</i>	8,62	7.412
<i>Porta Rápida Frigorífica</i>	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 2.5** - Porta de Fechamento Rápido – Ambientes até -35°C



Fonte: SEBRAS (2022).

**Figura 2. 6 -** Porta de Fechamento Rápido – Ambientes até -35°C.



Fonte: SEBRAS (2022).

#### **2.4. Considerações sobre o cálculo de carga térmica em armazéns usando planilha eletrônica**

Considerando o fato de que o conhecimento da carga térmica a ser removida de um armazém é muito importante para o correto dimensionamento do sistema de refrigeração e representa uma valiosa ferramenta de análise de desempenho do processo, foi elaborada uma planilha eletrônica utilizando o aplicativo Excel™ para o cálculo da carga térmica posta em jogo em um período de 24 horas. Os valores das cargas térmicas individuais, expressas em *MW* foram calculados com base nos critérios apresentados na Seção 2 deste TCC, intitulada Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura. A planilha foi inserida no Apêndice deste TCC.

### 3 MODELAMENTO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO

O modelo matemático simplificado do processo parcial de troca térmica do armazém em estudo foi desenvolvido com base nas equações de balanço global de energia e de balanço material da água aplicados ao ar ambiente que entra e que sai do armazém durante as operações de carregamento e descarregamento dele.

O balanço global de energia aplicado ao ar ambiente, considerando a operação em regime variável é apresentado na **Eq. (3.1)**, assumindo que a vazão mássica de ar quente que entra no armazém seja igual à vazão mássica de ar frio que deixa o armazém no momento da abertura e fechamento da porta.

$$M_{ar}c_{p,ar} \frac{dT_{ar}(t)}{dt} = w_{ar} [h_{ar,in}(t) - h_{ar,out}(t)] \quad (3.1)$$

Foram adotadas as seguintes **hipóteses simplificadoras** no desenvolvimento do modelo matemático para uso em regime variável: (i)- considerada unicamente a influência da carga térmica devida à infiltração de ar no interior do armazém devido à abertura/fechamento da porta automática de entrada/saída da empilhadeira; (ii)- a vazão mássica de ar que entra no armazém não é igual à vazão mássica de ar que deixa o armazém; (iii)- o ar quente entra pela região superior da porta e o ar frio sai pela região inferior da porta e (iv)- a circulação do ar no interior do armazém é suficientemente rápida, de modo que os valores das propriedades de termodinâmicas podem ser assumidos como valores médios globais representativos da condição do ar no interior do armazém.

Visando facilitar a implementação do modelo proposto neste TCC em aplicativo de simulação computacional, decidiu-se usar a representação da **Eq. (3.1)** na forma de equação diferencial ordinária.

Desta maneira, a representação do comportamento da temperatura do ar no interior do armazém, com base na **Eq. (3.1)**, considera que a vazão de entrada seja um múltiplo  $n$  da vazão de saída, como apresentado na **Eq. (3.2)**.

$$M_{ar}c_{p,ar} \frac{dT_{ar,out}(t)}{dt} = w_{ar} [nc_{p,ar,in}(t)T_{ar,in}(t) - c_{p,ar,out}(t)T_{ar,out}(t)] \quad (3.2)$$

Considerando, por simplificação, que os valores de calor específico do ar infiltrado e do ar que escapa do armazém não apresentem variação significativa, pode-se escrever a **Eq. (3.3)**.

$$c_{p,ar} \cong c_{p,ar,in}(t) \cong c_{p,ar,out}(t) \quad (3.3)$$

Substituindo a **Eq. (3.3)** na **Eq. (3.2)** e rearranjando os termos, resulta a **Eq. (3.4)**.

$$\frac{M_{ar}c_{p,ar}}{w_{ar}c_{p,ar}} \frac{dT_{ar,out}(t)}{dt} = nT_{ar,in}(t) - T_{ar,out}(t) \quad (3.4)$$

O coeficiente que multiplica o termo à esquerda do sinal de igualdade na **Eq. (3.4)** representa a constante de tempo do processo e é designado pela letra  $\tau_{ar}$ . Assim, isolando a derivada da temperatura do ar no interior do armazém no lado esquerdo da igualdade, resulta a **Eq. (3.4a)**.

$$\frac{dT_{ar,out}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{ar}} [nT_{ar,in}(t) - T_{ar,out}(t)] \quad (3.4a)$$

Resolvendo a **Eq. (3.4a)**, obtém-se o valor da derivada da temperatura do ar no interior do armazém, a qual deverá passar por um processo de integração numérica para fornecer o valor da temperatura do armazém, como apresentado na **Eq. (3.4b)**.

$$\int \frac{dT_{ar,out}(t)}{dt} = T_{ar,out}(t) \quad (3.4b)$$

A parametrização do modelo foi realizada 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 será o parâmetro de interesse para responder à questão de como o ar infiltrado afeta a temperatura do armazém. Foi considerado um valor mínimo de 20 segundos e um valor máximo

de 120 segundos. Estes valores foram escolhidos aleatoriamente, de maneira a permitir o mapeamento da influência do ar infiltrado sobre a temperatura do armazém.

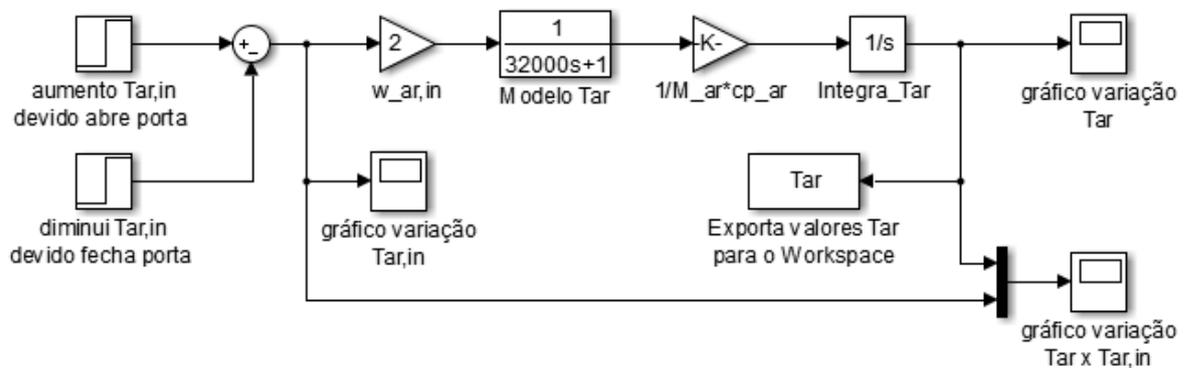
**Tabela 3.1** - Informações sobre o armazém.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$V_{ar\_armazem}$	15.039,43 m <sup>3</sup>
$P_{operacao}$	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 $\frac{kg}{h}$
$\Delta t_{porta}$	de 20 seg. a 120 seg.

#### 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

Com base nas informações disponíveis na literatura e usando as funções propostas no Capítulo 3 deste TCC, foi elaborado o diagrama de simulação correspondente ao comportamento da temperatura do armazém em resposta aos comportamentos dos valores das vazões de ar infiltrado e de escape e das respectivas temperaturas. O modelo implementado é o correspondente à Eq. (3.4). Ele foi configurado no aplicativo Matlab/Simulink™ e é apresentado na **Figura 4.1**.

**Figura 4.1** - Diagrama de simulação da troca térmica em armazém considerando perturbação pulso na temperatura do ar infiltrado para um valor pré-definido de vazão.



Fonte: autoria própria.

No diagrama de simulação da **Figura 4.1** foram consideradas como variável de entrada perturbadora do sistema o valor da variação do tipo pulso da **temperatura do ar externo infiltrado** no armazém, devido à abertura e fechamento da porta de entrada das empilhadeiras. A vazão de ar foi fixada em 2 kg/s que seria um valor adequado para representar a quantidade de ar deslocado pela movimentação das empilhadeiras. A simulação foi realizada considerando uma ciclo de 24 horas de operação do armazém e o distúrbio postulado.

O bloco de função denominado “**aumento Tar,in devido abre porta**” representa o comportamento da temperatura do ar infiltrado para o interior do armazém o qual foi assumido aumentar de maneira brusca. O bloco de função denominado “**diminui Tar,in devido fecha porta**” representa o comportamento da temperatura do ar interno ao armazém para fora dele o qual também foi assumido diminuir de maneira brusca. Foram utilizados dois blocos de função denominados *step*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™ para representar o comportamento desejado das temperaturas em questão. Estes blocos enviam os respectivos sinais para o bloco de função *sum* – que realiza a diferença entre os sinais dos blocos “**aumento Tar,in devido abre porta**” e “**diminui Tar,in devido fecha porta**” –

gerando assim o sinal de pulso que foi usado para representar a entrada/saída de ar a cada abertura e fechamento da porta de entrada de carga do armazém.

O bloco denominado “**w\_ar,in**” foi utilizado para introduzir o valor da vazão do ar infiltrado/retirado a cada abertura e fechamento da porta de entrada de carga do armazém. Foi utilizado o bloco de função *gain*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™. Este bloco multiplica o sinal proveniente do bloco de função subtrator pelo valor da vazão que foi adotado na simulação, expressa em kg/s. O valor da vazão está apresentado no interior do bloco denominado “**w\_ar,in**”.

O bloco denominado “**Modelo Tar**” foi utilizado para introduzir a dinâmica característica da variação da temperatura no interior do armazém, a qual é característica do processo em estudo. Foi utilizado o bloco de função *transfer fuction*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™. Este bloco aplica um atraso de 1ª ordem ao sinal proveniente do bloco denominado “**w\_ar,in**” considerando o tempo de resposta característico do processo (constante de tempo) que foi calculada com base nas informações disponíveis, como o quociente entre a massa de ar no armazém e a vazão mássica de ar infiltrado/retirado, sendo expressa em segundos. O valor da constante de tempo está apresentado no interior do bloco em tela e vale aproximadamente 32.000 segundos.

Na sequência, o bloco denominado “**1/M\_ar\*cp\_ar**” recebe o sinal do bloco denominado “**Modelo Tar**”, multiplicando-o pelo valor do inverso do produto da massa de ar no armazém pelo calor específico do ar do armazém. O sinal resultante representa o comportamento da derivada da temperatura do ar do armazém em função do tempo, o qual é enviado ao integrador para cálculo do valor da temperatura do ar no armazém.

O bloco de função denominado “**integra\_Tar**” foi utilizado para calcular o valor da temperatura do ar no interior do armazém em resposta à perturbação gerada pela infiltração/escape do ar. Foi utilizado o bloco denominado *integrator*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™.

O bloco denominado “**gráfico variação Tar**” foi utilizado para apresentar o gráfico do valor da variação de temperatura do ar no interior do armazém ao longo do tempo da simulação. Foi utilizado o bloco de função *scope*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™.

O bloco denominado “**gráfico variação Tar x Tar,in**” foi utilizado para apresentar o gráfico do valor da variação de temperatura do ar infiltrado e do ar no interior do armazém ao

longo do tempo da simulação. Foi utilizado o bloco de função *scope*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™.

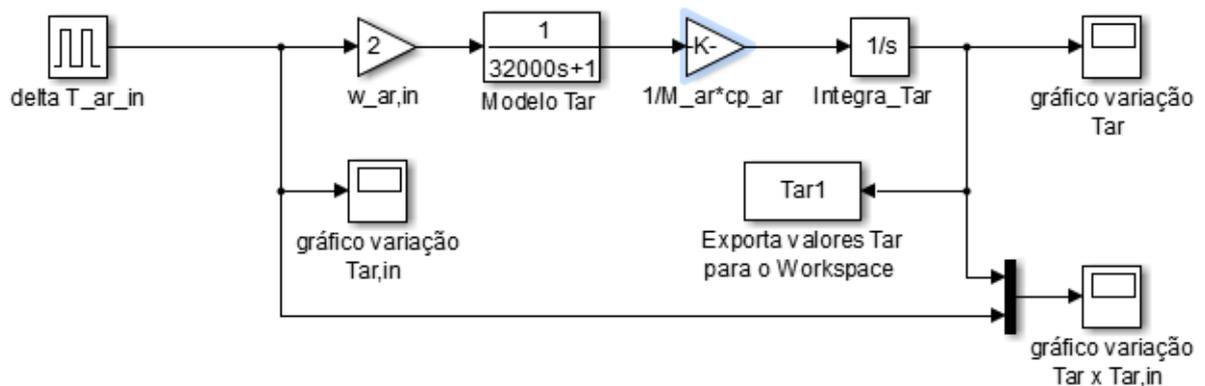
O bloco denominado “**Exporta valores Tar para o Workspace**” foi utilizado para transferir os valores simulados do ambiente Simulink™ para o ambiente Matlab™ de modo a permitir a construção de gráficos e exportar os valores para outros aplicativos, se necessário. Foi utilizado o bloco de função *to workspace*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™.

No diagrama de simulação da **Figura 4.2** foram consideradas como variáveis de entrada perturbadoras do sistema a **vazão mássica** de ar através da porta e a variação da **temperatura do ar externo infiltrado** no armazém, devido à abertura e fechamento da porta de entrada das empilhadeiras. As simulações foram realizadas considerando uma duração de 24 horas de operação do armazém e os distúrbios postulados.

O bloco de função denominado “**delta T\_ar\_in**” representa o comportamento da temperatura do ar infiltrado para o interior do armazém. Foi utilizado o bloco denominado *pulse generator*, disponível na biblioteca de funções do aplicativo Simulink™. Este bloco gera um trem de pulsos de amplitude igual a 10°C e duração igual a 120 segundos a cada 1.200 segundos, que foi usado para representar a entrada de ar infiltrado a cada abertura e fechamento da porta de entrada de carga do armazém.

Os demais blocos utilizados no diagrama de simulação das **Figura 4.2** são os mesmos já apresentados no diagrama de simulação da **Figura 4.1**, cujas funções foram detalhadas nos parágrafos anteriores.

**Figura 4.2** - Diagrama de simulação da troca térmica em armazém considerando perturbação do tipo trem de pulsos na temperatura do ar infiltrado para um valor pré-definido de vazão.



Fonte: autoria própria.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Distúrbio na forma de um único pulso no valor de $T_{ar\text{ infiltrado}}$

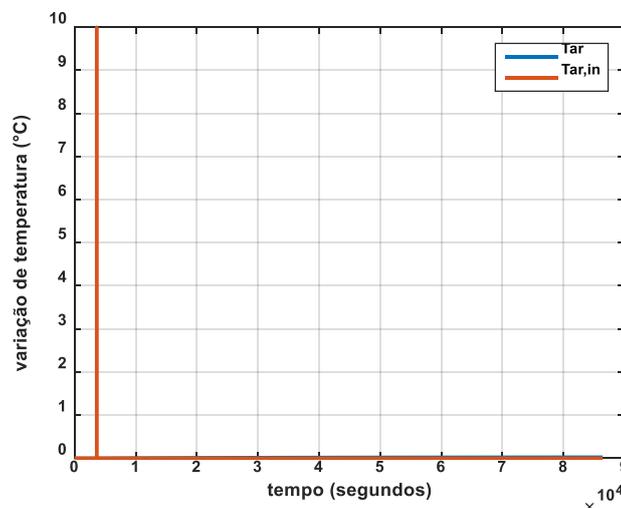
O entendimento do que acontece com a temperatura no interior do armazém se torna mais fácil se for considerada uma variação simples na temperatura de entrada do ar infiltrado. Para esta finalidade, foi considerada a aplicação de uma variação do tipo pulso no sinal de entrada do modelo apresentado na **Figura 4.1**.

O cenário simulado foi o correspondente à variação da temperatura no interior do armazém contemplando uma abertura e um fechamento da porta de entrada da empilhadeira para carregamento/descarregamento de sementes ao longo de 24 horas de operação do armazém. Foram utilizados os valores da **Tabela 3.1**, correspondentes às grandezas que participam do modelo matemático.

Foi assumido – como hipótese simplificadora – que a vazão de ar ambiente infiltrado seja o dobro da vazão de ar frio que escapa pela porta. Importante lembrar que o diagrama de simulação apresentado na **Figura 4.1** usa o conceito de variável-desvio, o qual representa essencialmente a variação da temperatura ao longo do tempo.

A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada com duração de 20 segundos é apresentada na **Figura 5.1**. A variação na temperatura do armazém foi de  $0,02^{\circ}\text{C}$  ao final dos 86.400 segundos.

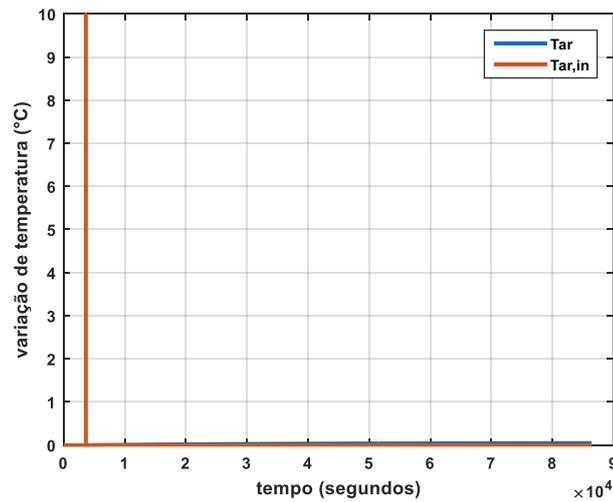
**Figura 5.1** - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 20 segundos.



Fonte: autoria própria

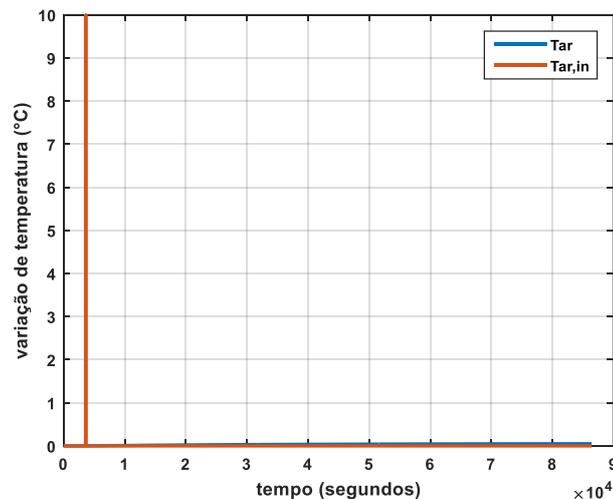
A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada com duração de 40 segundos é apresentada na **Figura 5.2**. A variação na temperatura do armazém foi de  $0,05^{\circ}\text{C}$  ao final dos 86.400 segundos.

**Figura 5.2** - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 40 segundos.



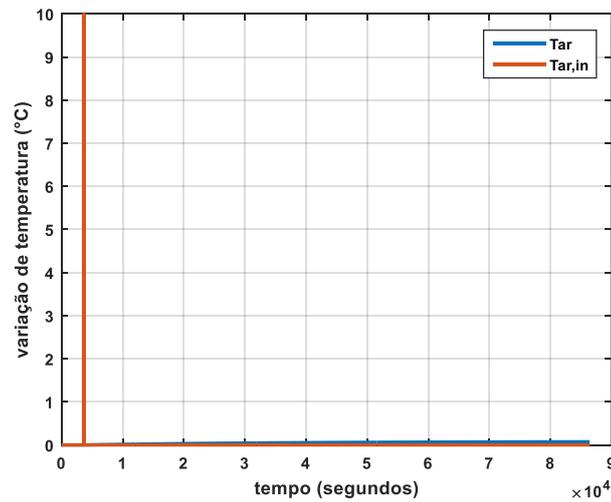
A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada com duração de 60 segundos é apresentada na **Figura 5.3**. A variação na temperatura do armazém foi de  $0,07^{\circ}\text{C}$  ao final dos 86.400 segundos.

**Figura 5.3** - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 60 segundos.



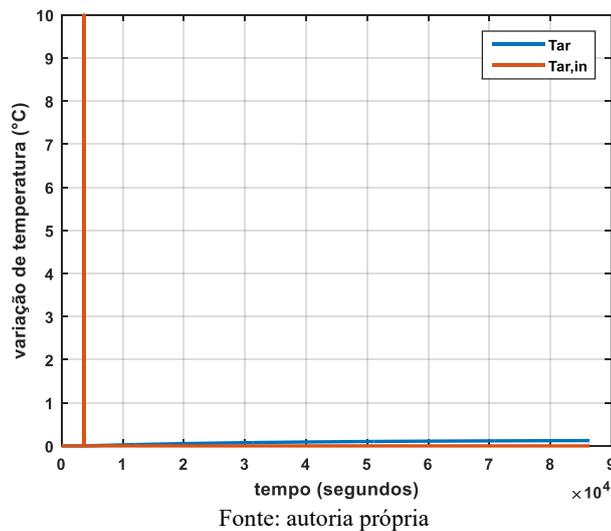
A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada com duração de 80 segundos é apresentada na **Figura 5.4**. A variação na temperatura do armazém foi de  $0,10^{\circ}\text{C}$  ao final dos 86.400 segundos.

**Figura 5.4** - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 80 segundos.



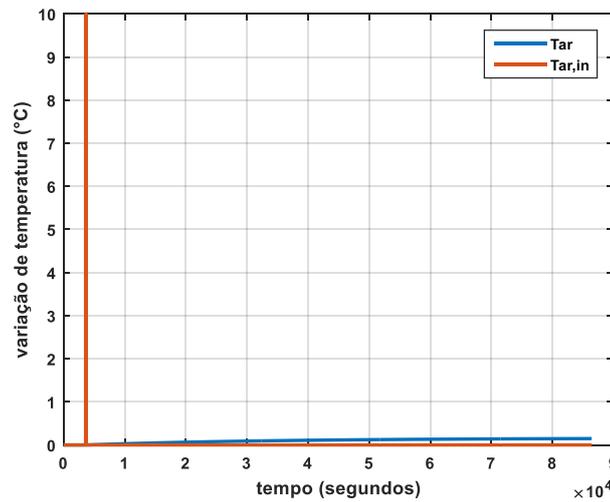
A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada com duração de 100 segundos é apresentada na **Figura 5.5**. A variação na temperatura do armazém foi de  $0,12^{\circ}\text{C}$  ao final dos 86.400 segundos.

**Figura 5.5** - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 100 segundos.



A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada com duração de 120 segundos é apresentada na **Figura 5.6**. A variação na temperatura do armazém foi de 0,15°C ao final dos 86.400 segundos.

**Figura 5.6** - Resposta da variação da temperatura do ar no armazém ao distúrbio do tipo pulso correspondente à variação da temperatura do ar infiltrado durante 120 segundos.



Fonte: autoria própria

Importante destacar que nesta simulação não foi levado em conta o funcionamento do sistema de controle da temperatura do armazém e que a carga térmica devida à introdução do produto no armazém foi desconsiderada.

De um modo geral, o impacto de uma única abertura da porta sobre a temperatura do armazém pode ser considerado desprezível. A temperatura do armazém tende a aumentar com o tempo, em função da entrada do ar quente, cujo valor da vazão é o dobro da vazão de saída do ar frio. A tendência de aumento é limitada e tende a um valor finito, pois este sistema apresenta a característica de autorregulação.

O próximo passo é avaliar se a ocorrência de várias aberturas/fechamentos seguidos da porta poderia ter maior influência sobre a temperatura do armazém ao final dos 86.400 segundos.

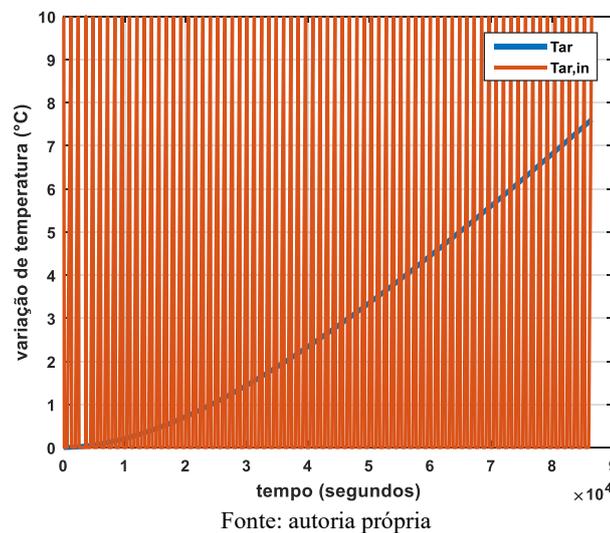
## 5.2 Distúrbio em trem de pulsos no valor de $T_{ar\ infiltrado}$

O cenário simulado foi o correspondente à variação da temperatura no interior do armazém contemplando várias aberturas e fechamentos da porta de entrada da empilhadeira para carregamento/descarregamento de sementes ao longo de 24 horas de operação do armazém.

Foram utilizados os valores da **Tabela 3.1**, correspondentes às grandezas que participam do modelo matemático.

Foi igualmente assumido – como hipótese simplificadora – que a vazão de ar ambiente infiltrado seja o dobro da vazão de ar frio que escapa pela porta. Foi considerado um distúrbio do tipo trem de pulsos, de amplitude igual a  $10^{\circ}\text{C}$ . e duração igual a 120 s, aplicado no instante  $t = 0$  s da simulação. O período adotado para o trem de pulsos foi de 1.200 s. Importante lembrar que o diagrama de simulação apresentado na **Figura 4.2** usa o conceito de variável-desvio, o qual representa essencialmente a variação da temperatura ao longo do tempo. A resposta da variação de temperatura do armazém à perturbação postulada é apresentada na **Figura 5.7**.

**Figura 5.7** - Resposta da temperatura do armazém ao distúrbio em  $T_{ar}$  infiltrado.



O comportamento apresentado pela temperatura no interior do armazém está coerente com o esperado, pois a quantidade de calor introduzida no armazém a cada abertura e fechamento da porta utilizada pela empilhadeira no momento de entrada será maior do que a quantidade de calor que deixa o armazém no momento de saída da empilhadeira acarretando o aumento contínuo da temperatura do armazém.

Importante destacar que o objetivo da simulação foi avaliar a carga térmica introduzida pela troca de ar no interior do armazém decorrente exclusivamente da abertura/fechamento da porta. Assim sendo não foi levado em consideração a carga térmica gerada pela introdução do *pallet* contendo o produto e nem a carga térmica gerada pela movimentação da empilhadeira no interior do armazém. Também não foi considerada a retirada do calor pelo sistema de refrigeração.

## 6 CONCLUSÃO

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

Foi utilizado um modelo a parâmetros concentrados para representar o processo. Em que pese o fato de o modelo 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 de dois tipos de distúrbio individualmente.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a temperatura do armazém é afetada pela abertura e fechamento repetitivo da porta do armazém, apresentando um aumento em seu valor da ordem de 8°C. 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 modelo proposto 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.
- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos.** São Paulo, SP: EDUSP, 2005, 678p.
- GEDRAITE, R. **Resumo sobre as características das respostas de sistemas.** Comunicação Pessoal: UFU/MG, 2021.
- LUYBEN, W. L. **Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers.** 2nd Ed. McGraw-Hill 1990;
- MACAGNAN, M. H. **Capítulo 8 - Carga Térmica.** Unisinos, São Leopoldo, Outubro, 2015.
- MELO JR., P.A.; PINTO, J. C. C. da S. **Introdução à Modelagem Matemática e Dinâmica Não Linear de Processos Químicos.** Rio de Janeiro, RJ: COPPE - UFRJ, 2008.
- SCHMITZ, M. I. **Determinação de parâmetros termodinâmicos para projetos de equipamentos de refrigeração de carrocerias refrigeradas.** Lajeado, 2016.
- SEBORG, J. M.; EDGARD, T.F & MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control.** Wiley 1989;
- 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.
- SUNDARESAN, K. R.; KRISHNASWAMY. P. R. **Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency and Laplace domains.** The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 56, n. 2, p. 257-62, Apr. 1978.
- ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. **Optimum settings for automatic controllers.** Transactions of the ASME, v. 64, n. 11, p. 759, Nov. 1942.

## APÊNDICE

### ANÁLISE QUANTITATIVA DA CARGA TÉRMICA DEVIDO A

#### INFILTRAÇÃO DE AR ( $Q_{inf}$ )

Na sessão 2.2.1 do presente trabalho, foi apresentada qualitativamente a correlação 2.8, abaixo, 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, abaixo, na realização dos cálculos do mesmo.

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

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

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

**Tabela 3.2:** Parâmetros Correlação Carga Térmica de Infiltração do Ar ( $Q_{inf}$ )

Parâmetro	Valor
$P$	200
$\theta_p$	20 s
$\theta_o$	1 min
$\theta_d$	24 h
$A_p$	10 m <sup>2</sup>
$h_i$	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 via tabela, a qual é apresentada abaixo.

**Tabela 3.3:** 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

---

O mesmo aplica-se ao fator de escoamento através da porta e efetividade da proteção oferecida pela porta, segue tabelas abaixo. Sendo válido destacar que, quando não existem dispositivos de proteção, o valor da efetividade será de 0.

**Figura 5.4:** 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: ASHRA (2010).

**Figura 5.5:** 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, a altitude da cidade de Uberlândia equivalente a 863 m, temperatura do ar infiltrado 27°C e temperatura do ar refrigerado 10°C.

Obteve-se, então, os seguintes dados a partir das correlações apresentados na Tabela abaixo.

**Tabela 3.4:** Parâmetros 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 uma Carga Térmica de Infiltração ( $Q_{inf}$ ) de 4,85 [MW], com base em 200 aberturas de portas, em 24 horas.