

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

ESTELA FERRARI

**ANÁLISE DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO
DE BISCOITOS: UM ESTUDO DE CASO**

CAXIAS DO SUL

2018

ESTELA FERRARI

**ANÁLISE DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO
DE BISCOITOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Engenharia
Mecânica. Área de concentração: Engenharia
Térmica.

Orientador: prof. Me. Sergio da Silva Kucera

CAXIAS DO SUL

2018

ESTELA FERRARI

**ANÁLISE DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO
DE BISCOITOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Engenheira
Mecânica. Área de concentração: Engenharia
Térmica.

Aprovada em 05/12/2018.

Banca Examinadora

Prof. Me. Sergio da Silva Kucera
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Marcelo Godinho
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Joanir Luis Kalnin
Universidade de Caxias do Sul - UCS

“Se você pular em um buraco negro, a sua energia de massa vai retornar para o nosso universo, mas num formato distorcido que contém a informação sobre qual era sua aparência, mas em um estado no qual não pode ser reconhecido facilmente. É como queimar uma enciclopédia. A informação não se perde, se você mantiver a fumaça e as cinzas. Mas é difícil de ler”.

Stephen Hawking

RESUMO

A indústria alimentícia situa-se em um mercado competitivo e crescente no cenário econômico atual. Como forma de atender às demandas geradas pelo mercado, linhas de produção são implementadas com o intuito de aumentar a produtividade sem deixar de zelar pela qualidade dos produtos. Nas linhas de biscoitos recheados há um processo de resfriamento forçado para que o recheio dos biscoitos cristalize, de forma que torne o produto mais saboroso, porém no túnel em estudo este processo não é eficiente. Desta forma, o presente trabalho teve o objetivo de analisar conceitos e propriedades de sistemas de refrigeração a vapor e transferência de calor para compreender o funcionamento e propor soluções para o túnel de resfriamento. Outro ponto fundamental foi o conhecimento das propriedades da gordura existente no recheio dos biscoitos no processo de cristalização, pois devem adquirir uma estrutura desejável no processo de resfriamento para serem consumidos, sem que o produto deixe de considerar as normas brasileiras em relação às quantidades permitidas nos alimentos industrializados. Portanto, através de métodos numéricos foram analisadas as variáveis do biscoito e do túnel a fim de obter o coeficiente convectivo do ar e temperatura de saída do biscoito. Com isso, foram analisadas as propriedades do ar para um biscoito 1 que é produzido e tem temperatura de entrada e saída conhecidas como 40 e 24 °C respectivamente, obtendo um coeficiente convectivo de 272,56 W/m²K. Com o valor do coeficiente convectivo foi possível encontrar a temperatura desconhecida de saída do biscoito 2, resultando em 30,4 °C. Com esse resultado foram discutidos fatores que influenciam este biscoito ao não atingimento da temperatura de 24 °C, e descoberto que para obter esta temperatura sem alteração no túnel é necessário 27 metros de túnel adicionais. Também foram discutidos os fatores que implicam no valor do coeficiente convectivo e que devem ser alterados para satisfazer a diferença de temperatura de 16°C e comparado as cargas térmicas para resfriar o biscoito por transferência de calor de 27,1 kW e a carga do túnel de 25,2 kW. Com a comparação foi concluído que o túnel não tem capacidade de resfriar o biscoito a temperatura adequada necessitando do túnel adicional. Contudo, foi realizada análise econômica por meio de payback, taxa interna de retorno e valor presente líquido que comprovou a viabilidade da empresa de investir no túnel adicional.

Palavras-chave: Resfriamento. Cristalização. Recheio. Coeficiente Convectivo.

ABSTRACT

The food industry is in a competitive market and growing in the current economic scenario. As a way to meet the demands generated by the market, production lines are implemented with the aim of increasing productivity without fail to ensure the quality of products. In the lines of biscuits filled there is a forced cooling process for the filling of cristalize biscuits, so that makes the product more palatable, but the tunnel to study this process is not efficient. In this way, the objective of this work was to analyze concepts and properties of refrigeration systems and steam heat transfer to understand the functioning and propose solutions for the cooling tunnel. Another fundamental point was the knowledge of the properties of existing fat in the filling of the biscuits in the process of crystallization, since they must acquire a desirable structure in the process of cooling to be consumed, without which the product ceases to consider the Brazilian norms in relation to the quantities allowed in industrialized food. Therefore, through numerical methods were analyzed the variables of the cracker and the tunnel in order to obtain the convective coefficient and air outlet temperature of the biscuit. With this, we analyzed the properties of air for a biscuit 1 which is produced and has inlet and outlet temperature known as 40 and 24 °C respectively, getting a convective coefficient of 272.56 W/m²K. With the value of the convective coefficient was able to find the unknown temperature output of the biscuit 2, resulting in 30.4 °C. With this result were discussed factors that influence this cookie to the non-fulfilment of the temperature of 24 °C, and discovered that to obtain this temperature without change in the tunnel is required 27 meters of additional tunnel. Were also discussed the factors that imply the value of the convective coefficient and which must be changed to meet the difference in temperature of 16°C and compared the thermal loads to cool the cookie by transfer of heat from 27.1 kW and the load of the tunnel of 25.2 kW. With the comparison it was concluded that the tunnel has no ability to cool the cookie the proper temperature requiring additional tunnel. However, an economic analysis was performed through payback, internal rate of return and net present value that proved the company's feasibility of investing in the additional tunnel.

Palavras-chave: Cooling. Crystallization. Filling. Convective coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama P-i do ciclo ideal de refrigeração a vapor	15
Figura 2 - Diagrama P-i do ciclo real de refrigeração a vapor	16
Figura 3 - Diagrama P x V do compressor alternativo	18
Figura 4 - Condensador tipo casco e tubo	20
Figura 5 - Evaporador de superfície estendida	22
Figura 6 - Transferência de calor através de uma superfície tubular.....	24
Figura 7 - Estruturas polimórficas dos triglicérides	30
Figura 8 - Isotermas de cristalização de gorduras comerciais de alto e baixo trans indicadas para recheio de biscoito tipo sanduíche	31
Figura 9 – Curva de avrami para a gordura com baixo teor de ácido graxo	34
Figura 10 – Fluxo de caixa	35
Figura 11 - Capotas articuladas do túnel de resfriamento em estudo.....	37
Figura 12 – Unidade de resfriamento do túnel em estudo.....	38
Figura 13 - Curva de sólidos da gordura vegetal hidrogenada utilizada nos biscoitos	39
Figura 14 - Isoterma de cristalização da gordura utilizada, à temperatura ambiente de 25 °C	40
Figura 15 - Isoterma de cristalização da gordura utilizada, à temperatura ambiente de 20 °C	41
Figura 16 – Fluxograma de etapas do processo de redimensionamento	43
Figura 17 – Formato ilustrativo dos biscoitos 1 e 2	44
Figura 18 – Esboço do túnel de resfriamento com as unidades de refrigeração e o direcionamento dos fluxos de vazão de ar.....	45
Figura 19 – Fator de temperatura no plano central da placa plana.....	50
Figura 20 – Distribuição de temperatura ao longo da espessura	51
Figura 21 – Razão da carga térmica de transferência de calor	51
Figura 22 – Gráfico da equação de Avrami para a gordura mantida a temperatura constante de 20°C.....	53
Figura 23 – Sistema de refrigeração do túnel em estudo.....	61
Figura 24 – Sistema de Refrigeração do túnel que produz o biscoito 2	61
Figura 25 – Sistema de insuflação do ar do túnel em estudo	62
Figura 26 – Fluxo de caixa para carga horária de 15 horas.....	63
Figura 27 – Fluxo de caixa para carga horária de 24 horas.....	63

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1 - Classificação de óleos de acordo com a cristalização	30
Tabela 1 - Valores representativos do coeficiente global de transferência de calor.....	24
Tabela 2 - Valores representativos do expoente de avrami e os tipos de crescimento e nucleação	33
Tabela 3 - Fatores de influenciam na produção de biscoitos 1 e 2.....	41
Tabela 4 – Características e condições de operação do túnel de resfriamento.....	42
Tabela 5 – Propriedades físico-químicas do óleo de palma	44
Tabela 6 – Propriedades físico-químicas do óleo de palma utilizado nos recheios de biscoitos	44
Tabela 7 – Condutividade térmica dos componentes do recheio*	48
Tabela 8 – Medidas dimensionais dos bicoitos 1 e 2	52
Tabela 9 – Calor específico (kJ/kgK) para cada componente dos biscoitos	52
Tabela 10 – Propriedades do túnel para cada trecho na produção de biscoito	54
Tabela 11 – Números adimensionais do biscoito tipo 2 para análise da convecção natural ...	55
Tabela 12 – Condutividade Térmica da Massa e Recheio do Biscoito em relação a temperatura de entrada e saída (W/mK).....	55
Tabela 13 – Propriedades do ar ao longo do túnel de resfriamento	56
Tabela 14 – Valores adimensionais para produção do biscoito 1.....	57
Tabela 15 – Coeficiente convectivo para diferentes velocidades do ar.....	57
Tabela 16 – Valores adimensionais para produção do biscoito 2.....	58
Tabela 17 – Valores para o cálculo da carga térmica do biscoito 1	58
Tabela 18 – Valores para o cálculo da carga térmica do biscoito 2	59
Tabela 19 – Valores adimensionais para produção do biscoito 2 à 24 °C	59
Tabela 20 – Valores adimensionais para produção do biscoito 2 em outro túnel de resfriamento	60
Tabela 21 – Análise do investimento do túnel complementar.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Pressão	[Pa]
i	Entalpia	[kJ/kg]
s	Entropia	[kJ/kgK]
Q	Calor	[kW]
W	Potência	[kW]
ṁ	Vazão Mássica	[kg/s]
U	Coefficiente Global de Transferência de Calor	[W/m ² K]
A	Área	[m ²]
T	Temperatura	[K]
c_p	Calor Específico	[J/kgK]
h	Coefficiente Convectivo	[W/m ² K]
K	Condutividade Térmica	[W/mK]
R	Resistência Térmica	[K/W]
e	Espessura	[m]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
v	Velocidade	[m/s]
l	Comprimento	[m]
μ	Viscosidade	[Ns/m ²]
ν	Viscosidade Cinética	[m/s ²]
α	Difusividade	[m/s ²]
t	Tempo	[s]
β	Coefficiente de Expansão volumétrica	[1/K]
V	Volume	[m ³]
C	Constante de Avrami	[-]

a	Expoente de Avrami	[-]
n	Período de tempo	[dias]
j	Taxa de Juros	[%]
\dot{V}	Vazão Volumétrica	[m³/s]
L	Calor Latente	[kJ/kg]
ω	Umidade Absoluta	[g/m³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	AMBIENTE TRABALHO.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVO GERAL.....	13
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	14
2.1.1.1	Ciclos de refrigeração a vapor teórico e real	14
2.1.2	Componentes do ciclo de refrigeração a vapor	17
2.1.2.1	Compressor	17
2.1.2.2	Válvula de Expansão	19
2.1.2.3	Trocadores de Calor.....	20
2.1.2.3.1	<i>Condensador.....</i>	<i>20</i>
2.1.2.3.2	<i>Evaporador.....</i>	<i>21</i>
2.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	23
2.2.1	Coefficiente global de transferência de calor e resistências	24
2.2.2	Números adimensionais e correlações	25
2.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BISCOITOS RECHEADOS.....	29
2.3.1	Normas pertinentes à quantidade de ingredientes em produtos industrializados.....	34
2.4	ANÁLISE DE INVESTIMENTOS	35
2.4.1	Taxa interna de retorno	35
2.4.2	Valor presente líquido	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	CARACTERIZAÇÃO E DISCUSSÃO DA SITUAÇÃO ATUAL.....	37
3.2	ETAPAS DE TRABALHO	42
3.2.1	Definição das propriedades do biscoito	43
3.2.2	Definição das propriedades do túnel.....	45
3.2.3	Definição das cargas térmicas do processo de resfriamento.....	46
3.2.1	Verificação do tempo de nucleação	48
3.2.2	Definição da quantidade de calor a ser removida.....	49

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	PROPRIEDADES DO BISCOITO	52
4.2	PROPRIEDADES DO TÚNEL.....	53
4.3	VERIFICAÇÃO DO TEMPO DE NUCLEAÇÃO	54
4.4	CARGAS TÉRMICAS	56
4.5	QUANTIDADE DE CALOR A SER REMOVIDA	56
4.6	PARÂMETROS QUE AFETAM A NÃO CONFORMIDADE DO PRODUTO	59
4.7	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	62
5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

O mercado competitivo atualmente requer que as empresas saibam adaptar seus sistemas com as mudanças de forma eficaz e ágil (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2007). Assim, a indústria alimentícia cresce a cada ano, aumentando o número de consumidores e a qualidade dos produtos, objetivando grande produção em curto espaço de tempo, reduzindo os custos e agilizando o processo. Portanto para acelerá-los muitas empresas tendem a automatizar seus procedimentos, através de máquinas que realizem o trabalho de um funcionário, diminuindo o tempo produtivo e aumentando a confiabilidade; porém necessitando de profissionais qualificados que tenham conhecimento das máquinas.

Além disso as empresas buscam melhorar o sistema de gestão, por exemplo, o sistema Toyota, a fim de reduzir gastos e aumentar a produtividade, melhorando os lucros empresariais e qualificando seus colaboradores. A gestão Toyota determina uma meta definida, em que para alcançar seu objetivo é necessário entender o sistema como um todo, visualizando-o de diversas maneiras (DENNIS, 2008).

Todos os processos existentes em determinada linha de produção são projetados para que cada equipamento ou sistema seja eficiente ao exercer sua função. Com o aumento da competitividade os planejamentos devem ser rotineiros, a fim de pensar no futuro e de como podem afetar o projeto realizado no momento, afinal os objetivos podem alterar-se (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2007).

Na produção de alimentos uma linha inicia na obtenção da matéria-prima e procede até o produto acabado. No caso de uma indústria de biscoitos, a massa é preparada a partir da seleção de ingredientes necessários, moldada, cozida e resfriada à temperatura ambiente. Caso o alimento contenha recheio, este é adicionado à massa antes do resfriamento final, que se processa através de um túnel que tenha a capacidade de cristalizar o recheio, finalizando o produto. Assim os sistemas de resfriamento utilizados na indústria devem ser versáteis o suficiente para que possam processar adequadamente produtos com variados ingredientes em sua composição.

1.1 AMBIENTE TRABALHO

O trabalho foi realizado no setor de produção de uma indústria de alimentos situada em Bento Gonçalves que atua no mercado produzindo atualmente massas e biscoitos. Este trabalho terá foco em um túnel de resfriamento localizado no setor de biscoitos e na linha de recheados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido ao crescimento da empresa e à necessidade de suprir as demandas de produção, foi necessária a instalação de uma nova linha de biscoitos recheados para obtenção de maior produtividade. Porém, apesar de ter sido dimensionada para resfriar todos os tipos de biscoito de 40 a 24 °C, não consegue reduzir esta temperatura para um tipo em específico. Como este biscoito não atinge a temperatura necessária apresenta um percentual de sólidos inferior ao estimado de 24% à saída do túnel, suficiente para manter a estrutura do recheio.

Aliado à necessidade da empresa de solução do problema há o interesse pessoal pelo conhecimento da área térmica e o desafio de compreender o processo de resfriamento de biscoitos e gerar possíveis soluções para um problema real. A realização deste TCC é a oportunidade para unir estas demandas.

1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar o sistema de resfriamento de uma linha de produção de biscoito visando a completa cristalização do seu recheio à saída do túnel.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em complementação ao objetivo geral, foram definidos os específicos a seguir:

- a) compreender melhor sobre sistemas de resfriamento;
- b) definir as variáveis na produção de biscoitos;
- c) caracterizar as propriedades térmicas do alimento produzido e compará-las com os dados do projeto existente;
- d) definir as especificações técnicas do sistema de resfriamento e seus parâmetros de operação;
- e) analisar cargas térmicas via balanço de energia e transferência de calor;
- f) propor sugestões com base nos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho será apresentado o sistema de refrigeração a vapor por meio dos ciclos ideais e reais, ressaltando suas diferenças e princípios de funcionamento. Em seguida será compreendido os componentes ao qual o sistema é composto na seguinte ordem: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. Estes serão devidamente explicados por meio de fórmulas e bibliografias para melhor entendimento de seu funcionamento e suas variáveis.

Este processo também requer o conhecimento da estrutura química dos componentes do biscoito, pois o objetivo do processo de resfriamento forçado é adquirir a estrutura desejável para que este seja consumido. Além de avaliar as normas brasileiras para que sejam discutidas as quantidades de componentes permitidas no alimento industrializado.

2.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

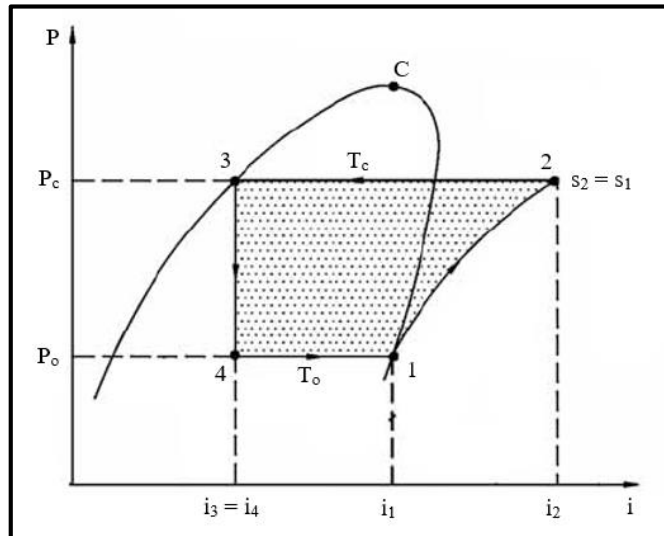
De acordo com Moran et al. (2013), o objetivo de um sistema de refrigeração é manter a temperatura interna inferior à do meio. Estes sistemas são normalmente utilizados em processos na indústria química e de alimentos, tanto para modificar a estrutura química do produto, modificando suas propriedades, quanto para mantê-lo refrigerado preservando suas características estruturais (STOECKER; JABARDO, 2002).

2.1.1.1 Ciclos de refrigeração a vapor teórico e real

O ciclo de refrigeração a vapor ideal, segundo Çengel e Boles (2013), é utilizado em refrigeradores, ar condicionados, entre outros. Nesse sistema, segundo Moran et al. (2013), não existem perdas por irreversibilidades, permitindo que os processos obtenham variáveis previamente definidas. O ciclo ideal de refrigeração está representado no diagrama de pressão versus entalpia ($P \times i$) na Figura 1 de acordo com os seguintes processos:

- compressão reversível (1-2);
- rejeição de calor (Q_H) à pressão constante no condensador (2-3);
- estrangulamento em uma válvula de expansão a entalpia constante (3-4);
- absorção de calor (Q_L) à pressão constante no evaporador (4-1).

Figura 1 - Diagrama P-i do ciclo ideal de refrigeração a vapor



Fonte: adaptado de Silva (2005)

Estes processos são discutidos e equacionados a seguir com base em Çengel e Boles (2013).

No processo 1-2 o refrigerante entra no compressor como vapor saturado, e é comprimido isoentropicamente até atingir a pressão do condensador. A temperatura de compressão chega a um valor superior ao da vizinhança. A potência de compressão (\dot{W}_{ent}) no processo 1-2 é calculada pela Equação 1, que relaciona as entalpias (i) do processo com a taxa mássica (\dot{m}) do ciclo.

$$\dot{W}_{ent} = \dot{m}(i_2 - i_1) \quad (1)$$

No processo 2-3 o fluido rejeita calor para a vizinhança devido à mudança de fase de vapor superaquecido para líquido saturado. A taxa de transferência de calor (\dot{Q}_H) do condensador está equacionada abaixo através da Equação 2.

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(i_3 - i_2) \quad (2)$$

O estrangulamento através da válvula de expansão no processo de refrigeração a vapor ocorre no processo 3-4. Este processo caracteriza-se por ser reversível e isoentálpico conforme a Equação 3, passando de líquido saturado para uma mistura bifásica de líquido e vapor até atingir a pressão do evaporador.

$$i_3 = i_4 \quad (3)$$

No processo 4-1 o fluido evapora a pressão constante até o estado de vapor saturado consumindo calor da vizinhança. A taxa de calor consumida (\dot{Q}_L), conhecida como capacidade frigorífica, é calculada pela Equação 4.

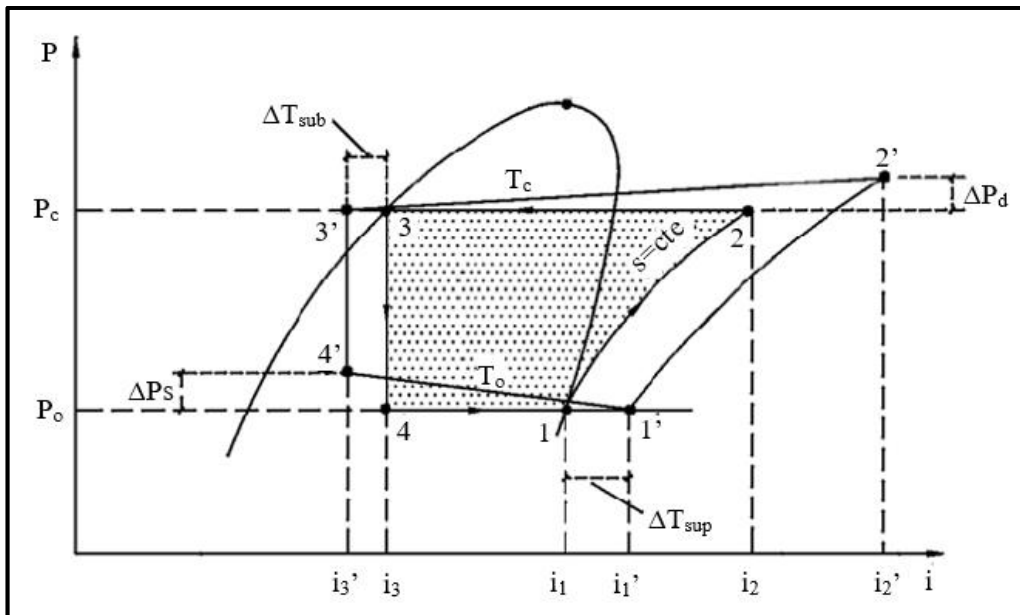
$$\dot{Q}_L = \dot{m}(i_1 - i_4) \quad (4)$$

O parâmetro para a avaliação de desempenho do ciclo, segundo Kross e Potter (2015), é determinado pelo COP, coeficiente de performance, que relaciona a taxa de calor consumida no sistema com a potência do compressor, conforme a Equação 5. Seu valor é geralmente superior a 1.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{ent}}} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \quad (5)$$

O ciclo de refrigeração a vapor real diferencia-se do ideal, como ilustrado na Figura 2, devido às irreversibilidades: quedas de pressão em razão do atrito do fluido refrigerante na tubulação e o aumento de entropia na compressão. Dependendo da quantidade de atrito existente na compressão a entropia tende a aumentar. (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Figura 2 - Diagrama P-i do ciclo real de refrigeração a vapor



Fonte: adaptado de Silva (2005)

No processo ideal o fluido refrigerante entra no compressor no estado de vapor saturado, porém, no real, segundo Çengel e Boles (2013), não é possível obter controle preciso do

processo evaporativo. Logo, o fluido entra como vapor superaquecido a mesma pressão (estado 1'), garantindo apenas a presença de vapor no compressor.

No processo de condensação a queda de temperatura ocorre devido à redução de pressão (ΔP_d) inevitável (ÇENGEL; BOLES, 2013). Logo, ao invés do refrigerante deixar o condensador no estado de líquido saturado (estado 3), com a diferença de temperatura (ΔT_{sub}) ele deixa-o como subresfriado (estado 3'), garantindo que não haja vapor no processo de estrangulamento.

A eficiência isoentrópica do compressor, determinada a seguir pela Equação 6, relaciona o trabalho isoentrópico do compressor (\dot{W}_s) com o trabalho real (\dot{W}_{real}).

$$\eta_{comp} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_{real}} = \frac{i_2 - i_1}{i_{2'} - i_{1'}} \quad (6)$$

Observando as equações é possível verificar que o aumento de entropia e entalpia no processo real, devido às irreversibilidades, afeta a eficiência isoentrópica e o coeficiente de performance do ciclo de refrigeração a vapor, definido pela Equação 5. Logo, quanto maior a diferença de entropia entre os estados menor são esses valores.

2.1.2 Componentes do ciclo de refrigeração a vapor

2.1.2.1 Compressor

Para Filippo Filho (2014) “O compressor é uma máquina geradora, isto é, ele transfere energia para que um gás possa ser deslocado e comprimido para um nível de pressão desejado.” Portanto os compressores impulsionam o refrigerante proveniente do evaporador, aumentando sua pressão, para ser admitido pelo condensador. Existem diversos tipos de compressores: alternativos, centrífugos, parafuso, rotativo e scroll.

Além dos variados tipos, existem diferenças de acionamento e construção. Quanto ao acionamento, pode ser direto ou indireto e diferenciam-se no modo como o compressor está ligado ao motor de acionamento, de acordo com Leite (2010). Em relação à construção os compressores podem ser herméticos, semi-herméticos e abertos. Os herméticos são destacados pelo fato do motor e o compressor estarem na mesma carcaça, sem acesso. Os semi-herméticos diferenciam-se dos herméticos apenas por permitirem acesso à carcaça onde se encontram. Nos abertos ambos os componentes estão separados (SILVA, 2003).

Dos diversos tipos de compressores existentes já citados, segue discussão sobre o tipo alternativo, por ser o instalado no túnel de refrigeração a ser estudado. Os alternativos

comandam a entrada e saída do fluido através de válvulas de sucção e descarga, que devem apresentar características que, segundo Costa (1982), são: robustez; ajuste perfeito e proporcionar passagens sem grandes mudanças direcionais.

O funcionamento do compressor alternativo é dividido em 4 processos: expansão, admissão, compressão e descarga, ilustrados na Figura 3. O volume total do compressor é superior ao deslocado pelo pistão, garantindo espaço para movimentação das válvulas no interior do cilindro. Este espaço é designado como morto, conforme Filippo Filho (2014). O volume de admissão é inferior ao deslocado pelo pistão, em virtude da necessidade da redução de pressão resultante do processo de descarga para atingir o valor exigido para sucção. Em contraponto esses volumes são diferentes por efeito do processo compressivo que, ao aumentar a pressão, reduz consequentemente o volume do fluido.

Figura 3 - Diagrama P x V do compressor alternativo



Fonte: adaptado de Filippo Filho (2014)

Silva (2003) afirma que no processo de admissão (4-1) ocorre uma depressão no interior do cilindro, fazendo com que o fluido seja aspirado pela válvula de sucção. O deslocamento do pistão faz com que o volume interno aumente à pressão constante. No processo de compressão (1-2) é reduzida a quantidade de vapor admitido e aumentada as forças internas sobre o cilindro. Quando a pressão atinge a desejada, o fluido é liberado da câmara através da válvula de descarga, processo de exaustão (2-3), e então essa é reduzida até a necessária para admitir novamente o fluido.

A diferença das eficiências volumétricas real e ideal é causada por vazamentos das válvulas devido ao desgaste de vedações, ocasionando uma perda de carga no processo de sucção e descarga. Se a razão dos calores específicos aumentar juntamente com a razão de pressões ou o espaço de volume morto for aumentado a eficiência será reduzida. Por outro lado, caso a pressão de descarga aumente muito haverá necessidade de uma expansão muito grande para atingir a pressão de admissão, conforme pode ser observado na Figura 3 (SILVA, 2003).

O aumento da temperatura do fluido, resultante do processo evaporativo, eleva a capacidade frigorífica do compressor, segundo Stoecker e Jabardo (2002), aumentando consequentemente a vazão, rendimento volumétrico. Em contraponto, a potência tende a diminuir com o aumento de temperatura devido à baixa taxa de compressão entre a evaporação e condensação.

De acordo com Stoecker e Jabardo (2002), o inverso ocorre quando aumenta a temperatura de condensação, onde os valores de rendimento, eficiência, vazão são reduzidos e a potência elevada devido grande diferença de temperatura.

2.1.2.2 Válvula de Expansão

Válvulas são dispositivos de controles de vazão quando localizadas em tubulações (STOECKER; JABARDO, 2002). Elas podem restringir ou bloquear a passagem do fluido refrigerante. As válvulas de bloqueio operam totalmente abertas ou fechadas em contraponto as demais tendem a modificar as propriedades como, temperatura, vazão, pressão ou nível de líquido do refrigerante ao passar pela válvula, de acordo com Stoecker e Jabardo (2002).

As válvulas de expansão, de acordo com Stoecker e Jabardo (2002), são controladas pelo superaquecimento e controlam a vazão de líquido para o evaporador. Segundo Costa (1982), são utilizadas em sistemas de refrigeração a vapor para expandir o fluido até a pressão desejada a evaporação. Os tipos de válvulas adotadas, de acordo com Leite (2010), são: válvula de expansão termostática, expansão a pressão constante, válvula de bóia e tubos capilares.

Silva (2003) afirma que a válvula termostática é a mais empregada nas instalações comerciais e industriais devido a suas particularidades de regulagem. São classificadas como de expansão automática, controladas pela pressão de sucção e temperatura do refrigerante à saída do evaporador (COSTA, 1982).

2.1.2.3 Trocadores de Calor

Os trocadores de calor são mecanismos que auxiliam na troca de calor entre dois fluidos com temperaturas diferentes, sendo utilizados em evaporadores e condensadores que serão discutidos a seguir.

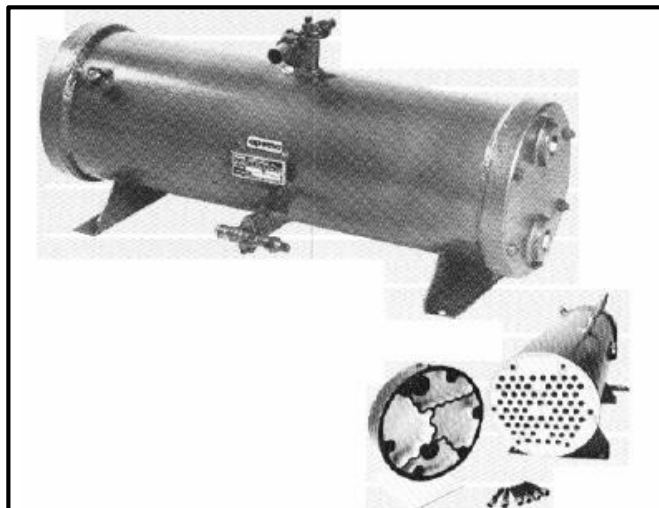
2.1.2.3.1 Condensador

Os condensadores têm o objetivo de condensar e resfriar o vapor superaquecido resultante do processo de compressão. Esta operação é realizada através da transferência de calor do fluido para o meio, com a utilização de água ou ar (COSTA, 1982).

A troca de calor é realizada em três etapas, de acordo com Costa (1982), dependentes dos valores dos calores específicos do fluido. Primeiramente o fluido troca calor até a temperatura de saturação, após é condensado a temperatura constante até atingir o estado de líquido saturado e, então subresfriado. A fase do resfriamento para alcançar o estado de subresfriamento deve-se à prevenção, segundo Wirz (2011), de que o líquido transforme-se em vapor instantaneamente, devido à redução de pressão ao longo da canalização.

Os tipos de condensadores são: duplo tubo, casco e serpentina e carcaça e tubos. O condensador a ser aprofundado conceitualmente é o de carcaça e tubos (“shell and tube”) horizontal. Eles são formados por uma carcaça cilíndrica com tubos horizontais dispostos paralelamente ligando as extremidades do cilindro, conforme a Figura 4, permitindo que o refrigerante flua dentro da carcaça, trocando calor com a água que escoar no interior dos tubos (SILVA, 2003).

Figura 4 - Condensador tipo casco e tubo



Fonte: Martinelli (20--)

2.1.2.3.2 *Evaporador*

O evaporador tem função contrária ao condensador, ao invés de resfriar o fluido, ele consome calor do meio refrigerado e retira ou mantém a umidade do meio (WIRZ, 2011). De acordo com Silva (2003), a troca de calor com o ambiente de refrigeração pode ser realizada diretamente, por meio do fluido a ser refrigerado, ou indiretamente através de serpentinas de água.

A troca de calor no evaporador ocorre tanto por condução como por convecção. A transferência por condução acontece no evaporador devido à diferença entre as temperaturas das superfícies interna e externa da parede do tubo (BOHN; MANGLIK; KREITH, 2014). O fluxo de calor transferido por condução depende da área superficial, da condutividade térmica e da espessura dos tubos e aletas.

A troca de calor por convecção ocorre pelo movimento do fluido sobre uma superfície, e pode ser induzida ou natural. A convecção natural acontece pelo movimento livre do fluido devido à variação da sua densidade ocasionada pela mudança de temperatura. No caso induzido existe a presença de uma bomba ou ventilador provocando maior movimentação do fluido (INCROPERA et al., 2008).

Segundo Bueno (2004), a eficiência do evaporador em um sistema refrigerado depende de dois fatores: ter superfície adequada para absorção de calor do meio, sem grande diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o que será resfriado; e ter quantidade de refrigerante suficiente para impedir queda de pressão brusca no fluido resfriado entre a entrada e a saída.

Os tipos de evaporadores mais conhecidos são os de placas, carcaça e tubos, serpentina e boudelot. O evaporador de placa é formado por duas placas soldadas, entre as quais há um trajeto para o fluido, sendo muito utilizado em refrigeradores caseiros (BUENO, 2004). Eles estão cada vez mais sendo utilizados no mercado, de acordo com Silva (2005), em virtude do grande coeficiente de transmissão de calor (U). Os de carcaça e tubo são os mais comuns para arrefecimento de líquidos através de expansão direta do refrigerante (LEITE, 2010).

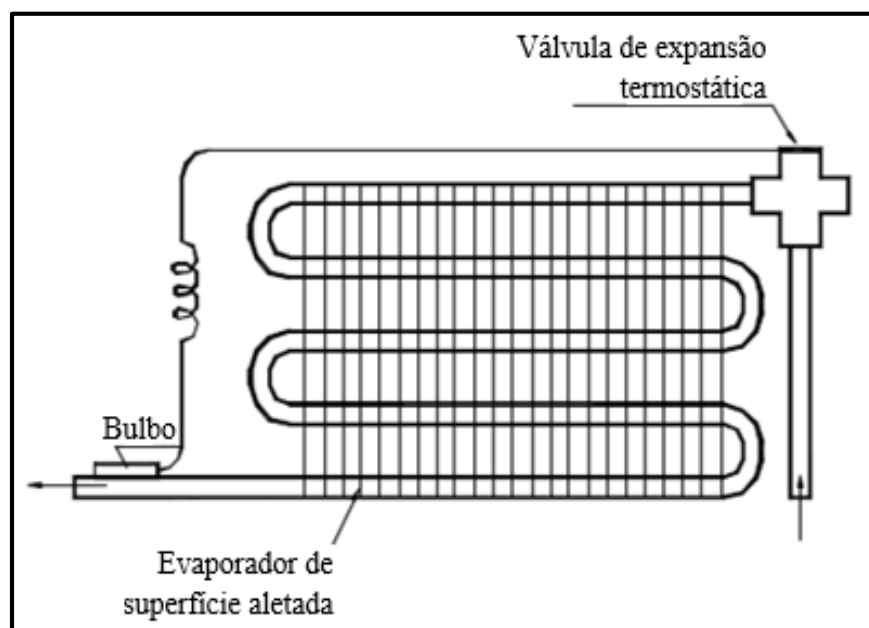
Os evaporadores cascata tem a função de refrigerar até o fluido atingir um ponto próximo ao de congelamento, onde o líquido escorre entre tubos ou chapas (COSTA, 1982). Antigamente eram utilizados tubos onde o refrigerante escoava no interior dos tubos, porém atualmente são utilizados os de chapas corrugadas. As chapas facilitam na distribuição do líquido a ser resfriado, oferecendo uma superfície com melhores condições para higienização (SILVA, 2005).

Os evaporadores são classificados, segundo Bueno (2004), conforme método de alimentação e superfície de transferência de calor. Pelo método de alimentação podem ser classificados como inundados e de expansão seca. No primeiro a serpentina atravessa o evaporador inundado de fluido refrigerante. No de expansão seca a vazão de fluido é controlada através de válvulas de expansão assegurando que todo o líquido seja evaporado antes do final da serpentina.

As superfícies de transferências de calor são classificadas como primárias e estendidas. A superfície primária é composta apenas por tubos lisos. Na estendida há presença de aletas na tubulação, conforme ilustrado na Figura 5, aumentando a área de troca térmica. As aletas devem estar unidas à tubulação garantindo que o contato térmico seja eficaz (BUENO, 2004).

As serpentinas de tubo liso são utilizadas em câmaras frigoríficas e refrigeradores de armazenagem, onde é necessária pouca velocidade e muita vazão. As serpentinas aletadas tem grande área de troca de calor por comprimento, recomendando a utilização de ventiladores para a convecção forçada (BUENO, 2004).

Figura 5 - Evaporador de superfície estendida



Fonte: adaptado de Bueno (2004)

Os parâmetros a serem observados na serpentina, de acordo com Stoecker e Jabardo (2002), são: área de troca de calor, número de fileiras de tubos, espaçamento entre as aletas, vazão de ar e temperatura do refrigerante. Se a área da face da serpentina, o número de fileiras ou o número de aletas forem aumentados, a temperatura e umidade do ar na saída irão diminuir, aumentando a capacidade de refrigeração. Caso a vazão de ar que atravessa a serpentina ou a

temperatura do refrigerante forem aumentadas, a temperatura e a umidade do ar na saída serão aumentadas. A capacidade de refrigeração é proporcional ao aumento da vazão do ar e inversamente proporcional à temperatura do refrigerante (STOECKER; JABARDO, 2002).

Quando os evaporadores operam em temperaturas muito baixas, o acúmulo de gelo é inevitável fazendo com que a passagem de ar seja restringida e a eficiência diminua. Logo o espaçamento entre as aletas deve ser considerado, garantindo espaço para circulação de ar caso haja congelamento (BUENO, 2004).

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo Bohn, Manglik e Kreith (2014), a taxa de transferência de calor é calculada pela Equação 7, sendo definida pelo coeficiente global de troca de calor (U), área de transferência (A) e a diferença de temperatura (ΔT).

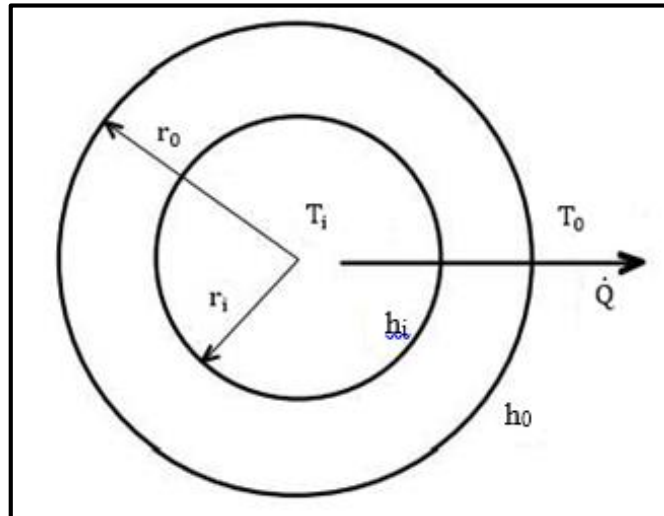
$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (7)$$

Porém se a taxa de transferência de calor for analisada pela metodologia da segunda lei da termodinâmica, conforme Çengel (2012), ela pode ser determinada também pela relação do calor específico (c_p) e o fluxo mássico do fluido, conforme a Equação 8.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (8)$$

A transferência de energia através de uma forma geométrica cilíndrica, conforme a Figura 6, ocorre por convecção e condução. Tem-se convecções nas superfícies externa e interna do tubo, pelo contato com os respectivos fluidos, considerando a área superficial de contato além do coeficiente convectivo (h) do fluido. Já a condução ocorre ao longo do comprimento e espessura da parede do tubo, considerando a condutividade do material do tubo (K) (INCROPERA et al., 2008).

Figura 6 - Transferência de calor através de uma superfície tubular



Fonte: adaptado de Boabaid (2010)

2.2.1 Coeficiente global de transferência de calor e resistências

Segundo Incropera et al. (2008), o coeficiente global de transferência de calor (U) é relacionado com a resistência térmica total (R), que envolve condução e convecção, Equação 9, entre os fluidos separados pelas paredes dos tubos.

$$U_{i,o} = \frac{1}{A_i R} = \frac{1}{A_o R} \quad (9)$$

A Tabela 1 representa possíveis valores do coeficiente global em condensadores com fluidos diferentes. O do tipo com tubos aletados é o correspondente ao trocador de calor utilizado no sistema estudado.

Tabela 1 - Valores representativos do coeficiente global de transferência de calor

Tipos de Condensador e Fluidos Envolvidos	U (W/(m²K))
De vapor d'água (água nos tubos)	1000 - 6000
De amônia (água nos tubos)	800 - 1400
De álcool (água nos tubos)	250 - 700
Com tubos aletados (água nos tubos , ar em escoamento cruzado)	25 - 50

Fonte: adaptado de Incropera et al.(2008)

A resistência térmica é uma barreira para o fluxo de calor, e é definida de acordo com o estado físico do meio, portanto se for líquido ou gasoso é convectiva; em contraponto, se for

sólido, é condutiva. Essas resistências particulares relacionam-se com a área de superfície de contato interna (i) ou externa (0) do tubo ao qual ocorre a transferência. A Equação 10 relaciona todas as resistências existentes no sistema ilustrado na Figura 6, com resistências convectivas internas e externas e uma resistência condutiva (ÖZISIK, 1990).

$$R = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{e}{KA_m} + \frac{1}{A_o h_o} \quad (10)$$

onde: A_i , A_o são as áreas das superfícies interna e externa, respectivamente;

$$A_m = \frac{A_o - A_i}{\log(A_o/A_i)} \text{ é a média logarítmica da área}$$

H_i , H_o são os coeficientes de transferência de calor para os escoamentos interno e externo, respectivamente, $W/(m^2K)$;

K é a condutividade térmica do material do tubo, $W/(m K)$;

e é a espessura do tubo.

No caso ideal da espessura da parede (e) ser extremamente pequena, ou seja, as áreas superficiais interna e externa serem praticamente iguais, e o valor da condutividade térmica do material do tubo for alto, a sua resistência condutiva pode ser desprezada. Assim, levam-se em consideração apenas os coeficientes convectivos de transferência de calor interno e externo para o cálculo da resistência total (INCROPERA et al., 2008).

2.2.2 Números adimensionais e correlações

Os números adimensionais para transferência de calor são utilizados para caracterizar propriedades físicas em um processo de resfriamento ou aquecimento. Nesta seção alguns deles são estudados como: Reynolds, Prandl, Fourier, Nusselt, Grashof, Rayleigh e Biot.

Na superfície de transferência de calor convectiva forçada existe uma camada limite esta pode ser composta por escoamento laminar, turbulento ou de ambos. No escoamento laminar o movimento do fluido é natural, onde as camadas de fluido escorregam sobre as outras, sem mistura de massa. Na transição das duas fases ocorrem distúrbios no interior destas camadas de fluido, fazendo com que as condições de escoamento sejam caóticas e adquiram maior velocidade, iniciando o escoamento turbulento. Para determinar o tipo do escoamento é utilizado o número adimensional de Reynolds, descrito na Equação 11(INCROPERA et al., 2008).

$$\text{Re} = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (11)$$

O número de Reynolds (Re) apresenta a razão entre as forças de inércia e viscosas do fluido, onde a inércia é determinada pela densidade do fluido (ρ) e sua velocidade (v) no decorrer do comprimento da superfície, em caso de uma parede plana (l) e a força viscosa apenas depende da viscosidade do fluido em movimento (μ) (INCROPERA et al., 2008).

Segundo Incropera et al. (2008), se Reynolds obtiver um valor muito pequeno, inferior de 10^5 , significa que as forças de inércia são insignificantes quando relacionadas com as viscosas, descrevendo um escoamento laminar. Em contraponto o valor adimensional grande, superior a 10^6 , remete forças de inércias significativas e suficientes para descrever e determinar um escoamento turbulento.

O número de Prandtl (Pr) representa o transporte de momento e de energia no processo de difusão do fluido. A Equação 12 representa o valor de Pr, como a razão da viscosidade cinética (ν) do momento pela difusividade de energia (α) (ÖZISIK, 1990).

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (12)$$

O número de Fourier (Fo) é a medida de calor conduzido através da geometria de um corpo em relação a energia armazenada. Conforme a Equação 13, o número de Fourier envolve a condutividade térmica do material (K); o tempo que ela aquece ou resfria (t); uma dimensão geométrica característica deste corpo (δ) ao processo de transferência de calor; o calor específico do corpo (c_p); e sua densidade (ρ). Um valor alto de Fo indica alta propagação de calor através da geometria (FELLOWS, 2006).

$$\text{Fo} = \frac{Kt}{\rho c_p \delta^2} \quad (13)$$

O número de Nusselt (Nu), segundo Özisik (1900), caracteriza a camada limite térmica por meio da razão entre o calor transferido por convecção e o por condução, através de um comprimento característico relativo à geometria da superfície, conforme Equação 14.

$$\text{Nu} = \frac{hl}{K} \quad (14)$$

Quanto maior for o valor de Nu maior será a transferência convectiva. Em contraponto quando tender a zero significa que não há troca de calor por convecção; somente condução.

Enquanto o escoamento para convecção forçada é definido pelo número de Reynolds o da convecção natural é através do número de Grashof (Gr), que representa a razão das forças viscosas e de empuxo que agem sobre o fluido. Portanto o número de Gr define se o escoamento é laminar ou turbulento, através da Equação 15 (ÇENGEL, 2012).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)l_c^3}{\nu} \quad (15)$$

A transferência de calor natural em uma superfície depende da geometria para determinar seu comprimento característico (l_c), da temperatura da superfície e propriedades termofísicas do fluido existente como a viscosidade cinética (ν) e o coeficiente de expansão volumétrica (β). O ponto crítico de Grashof, segundo Çengel (2012) é na ordem de 10^9 , se o valor obtido pela Equação 15 for superior a ele significa que o escoamento é turbulento.

Çengel (2012) afirma que o coeficiente de expansão volumétrica é o estudo da condição de um fluido quando este se encontra suficientemente distante da superfície quente ou fria, onde não há influência em suas propriedades. O coeficiente pode ser calculado a partir da Equação 16, que relaciona as temperaturas e densidades do fluido distante (T_∞ e ρ_∞) e próximas à superfície quente ou fria.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \quad (16)$$

Se os valores de β forem muito elevados significa que há uma grande alteração na densidade e temperatura do fluido próximo da superfície. Sabendo que a força de empuxo é proporcional à diferença da densidade e inversamente proporcional a diferença de temperatura à pressão constante, quanto maior a diferença entre as temperaturas do fluido longe e perto da superfície, maiores as forças de empuxo, as correntes de convecção natural e a transferência de calor (ÇENGEL, 2012).

As correlações de Grashof com Prandtl definem o número adimensional de Rayleigh, sendo a razão entre as forças de empuxo e o produto das difusividades térmicas e da quantidade de movimento. Logo Ra corresponde a Equação 15 multiplicada pela 12, que dependendo do seu valor obterá um valor de Nu diferente, conforme a Equação 17, para uma placa plana horizontal quente somente na superfície superior (ÇENGEL, 2012).

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,54 \text{ Ra}^{\frac{1}{4}} ; 10^4 < \text{Ra} < 10^7 \\ \text{Nu} &= 0,15 \text{ Ra}^{\frac{1}{3}} ; 10^7 < \text{Ra} < 10^{11} \end{aligned} \quad (17)$$

Os valores numéricos que multiplicam Ra dependem do comprimento característico da geometria, que no caso da Equação 17 corresponde à razão da área superficial da placa e seu perímetro. Dependendo do tamanho deste comprimento característico o valor adimensional de Ra corresponderá a um dos intervalos indicados. (ÇENGEL, 2012)

Quando um corpo sólido é aquecido ou resfriado o processo de transferência inicia pela troca convectiva na superfície externa e posteriormente uma troca condutiva no corpo. O número de Biot é a razão entre as resistências térmicas convectiva e condutiva neste processo, conforme Equação 18. Nela o comprimento característico (l_c) é a razão entre o volume do sólido e sua área superficial (INCROPERA et al., 2008).

$$\text{Bi} = \frac{l_c h}{K} \quad (18)$$

Em corpos sólidos com alta condutividade térmica, onde $\text{Bi} \gg 1$, há grande gradiente de temperatura entre as regiões externa e interna, e o estudo só pode ser analisado através dos sistemas de aglomerados que analisa a variação a temperatura do núcleo e da superfície em função do tempo. Por outro lado, se a resistência convectiva for superior à condutiva, $\text{Bi} \ll 1$, pode ser assumido que a temperatura no interior no sólido é uniforme no decorrer do tempo (INCROPERA et al., 2008).

Caso o número de Biot seja inferior a 1, ou seja, o gradiente de temperatura no interior do sólido seja desconsiderado, a temperatura final de resfriamento ou aquecimento de um produto pode ser calculada pela Equação 19. Esta equação foi utilizada por Santos (2009) para analisar resfriamento de frutas a partir do número adimensional de temperatura θ e o tempo necessário para resfriar o sólido.

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_i - T_0} = e^{-\frac{hA}{\rho V c_p} t} \quad (19)$$

O número adimensional θ é a razão entre as diferenças de temperatura final do produto (T) e a do ambiente (T_0) e a da inicial do produto (T_i) com a do ambiente. O expoente envolve propriedades específicas do produto a ser resfriado (área superficial, A; volume, V; densidade,

ρ ; e calor específico, (c_p), o coeficiente de transferência de calor por convecção, h , e o tempo de processo, t .

2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BISCOITOS RECHEADOS

Os consumidores de biscoitos recheados em geral, segundo Ormenese et al. (2001), tem preferência por recheios com pouca percepção de arenosidade, o que facilita na dissolução na mordida. Estas características referem-se às propriedades de gorduras e açúcares que compõem o recheio. Em média estes ingredientes, segundo Gomes et al. (2010), fazem parte de 89% da composição total do recheio. Esta porcentagem tem um valor próximo ao do recheio utilizado na empresa em estudo, que tem em média 58% de gordura e 37% de açúcar. Além destes componentes o recheio dos biscoitos contém proteínas, corantes e aromatizantes.

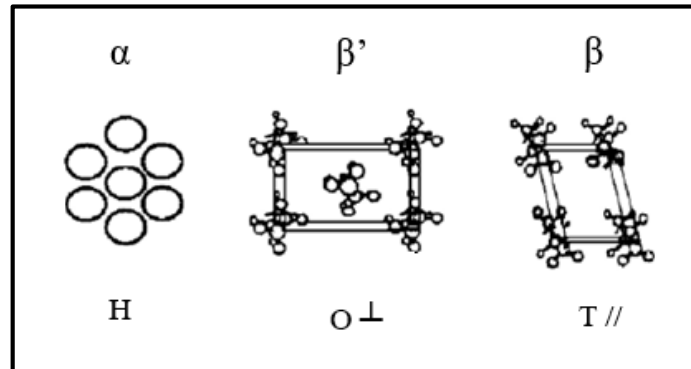
Os recheios que têm grande quantidade de gordura em sua composição proporcionam excelente qualidade em relação ao sensorial, segundo O'Brien (2004), garantindo ao consumidor sabor e maciez, além de facilitar a união dos biscoitos sanduiches.

O recheio deve conter muitos sólidos à temperatura ambiente para assegurar a sua estrutura, e baixo teor de sólidos à temperatura corporal, a fim de fornecer derretimento e liberação do sabor no momento da degustação. Além disto, a gordura do tipo vegetal hidrogenada é abundante na área tecnológica de alimentos e utilizada com objetivo de aumentar a durabilidade e manter o sabor do produto (STACKE, 2013). Por isto essas gorduras são consideradas um estímulo para a indústria alimentícia, segundo Ghotra, Dyal e Narine (2002).

Conforme Garcia (2014), o componente estrutural mais destacado na gordura é a rede cristalina e o seu crescimento dependente da composição de triglicerídeos. O que modifica as características físicas e químicas das moléculas de triglicerídeos são as quantidades de ligações duplas existentes e a dimensão da cadeia de ácidos graxos. Quanto menor o número de ligações duplas, maior o ponto de fusão dos ácidos graxos e o tamanho da cadeia cristalina (MISKANDAR et al., 2005).

As formas polimórficas dos cristais de gorduras são α (alfa), β (beta) e β' (beta prima), ilustradas na Figura 7, que se diferenciam pela estrutura da cadeia cristalina de ácidos graxos e suas ligações. A forma α é considerada como metaestável com formato hexagonal (H); a β' tem estabilidade intermediária, com arranjo de moléculas ortorrômico (O) com ligações perpendiculares; e a β possui a maior estabilidade, além de elevados ponto de fusão e calor latente com ligações triclinicas (T) onde todos os ângulos são diferentes e nenhum é de 90° (RIBEIRO, 2010).

Figura 7 - Estruturas polimórficas dos triglicerídeos



Fonte: adaptado de Himavan; Starov; Stapley (2006)

Todos os polimorfos, metaestáveis e parcialmente estáveis, são capazes, segundo Ribeiro (2010), de transformarem-se em estáveis. No entanto para que os grãos de cristais cresçam e a transformação aconteça é necessário tempo de resfriamento (LUCCAS, 2001).

As principais gorduras utilizadas mundialmente, de acordo com Garcia (2014), são os óleos de palma e de soja. O tipo palma é utilizado nos recheios na linha de produção em estudo. Este óleo distingue-se dos demais na velocidade das transformações polimórficas e por conter na composição fases líquidas e sólidas. Esta mistura de fases possibilita maior flexibilidade na estrutura, permitindo que seja utilizado em variados tipos de recheio. Em contraponto sua cristalização é lenta retardando o tempo de resfriamento (GARCIA, 2014).

Os óleos têm tendência a formarem polimorfos estáveis e parcialmente estáveis de acordo com sua estrutura cristalina. Em algumas estruturas o polimorfo β não está disponível e β' é a forma considerada mais estável. Na maioria dos produtos como biscoitos e margarinas, a forma mais desejada é a β' por apresentar maior cremosidade e uma textura macia, devido à formação de cristais sólidos pequenos (RIBEIRO, 2010). O Quadro 1 demonstra alguns tipos de óleos que tendem a estar nas formas β e β' , incluindo o de palma utilizado no produto em estudo.

Quadro 1 - Classificação de óleos de acordo com a cristalização

Forma de cristalização	Tipos de óleo						
	β	Soja	Girassol	Amendoim	Milho	Oliva	Coco
β'	Algodão	Palma	Sebo				

Fonte: adaptado de Woerfl (1995)

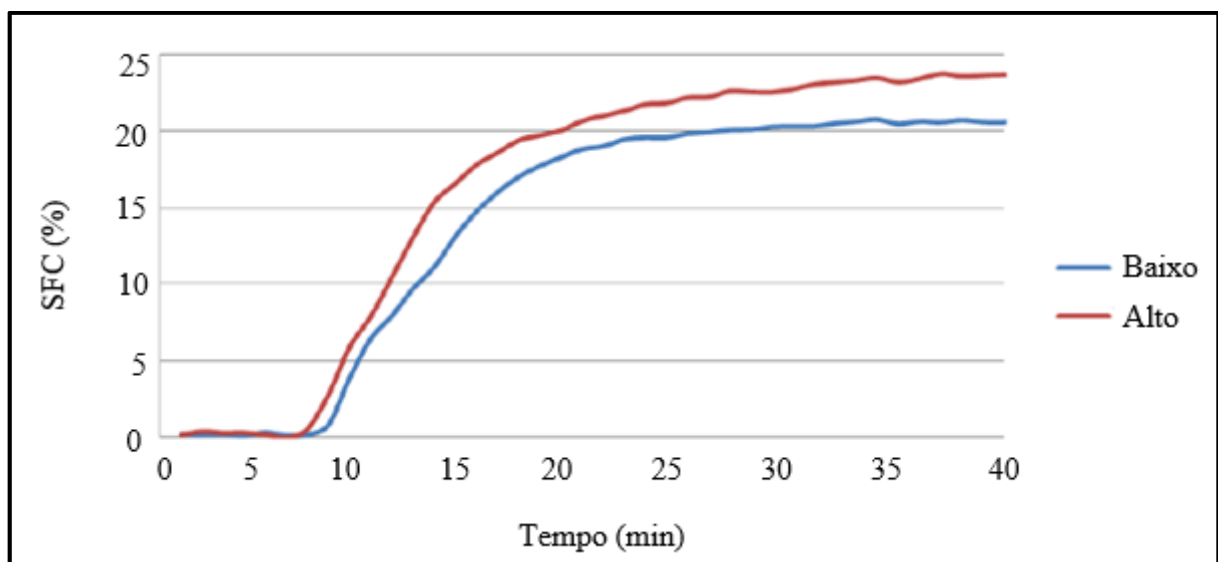
Em contraponto a forma β é mais compacta com formação de grandes cristais de sólidos, formando uma estrutura frágil, mais arenosa e que faz com que o recheio desgrude do biscoito (WOERFEL, 1995).

O processo de cristalização da gordura pode ser dividido em duas fases: nucleação e crescimento de grãos. A fase de nucleação é determinada pelos núcleos cristalinos decorrentes das moléculas de triglicerídeos na temperatura mais próxima do ponto de fusão. A fase de crescimento é representada pela formação e maturação dos sólidos à temperatura de cristalização até atingirem o tamanho desejado (LUCCAS, 2001). A combinação destas fases resulta em uma microestrutura específica, dependente das formas polimórficas, característica da gordura, influenciando diretamente no processo. (GARCIA, 2014)

O monitoramento dos processos do material cristalino sólido, nucleação e crescimento podem ser avaliados em função tempo, segundo Garcia (2014). Para esta análise é necessário manter a gordura a uma temperatura constante, relacionando a velocidade de crescimento e a estrutura cristalina.

Davioli (2010) analisou as isotermas de porcentagem de gordura sólida (SFC, *Solid Fat Content*) em relação ao tempo, para gorduras com alto e baixo teor de ácidos graxos trans utilizados nos biscoitos tipo sanduiche e obteve a curva de cristalização mostrada na Figura 8.

Figura 8 - Isotermas de cristalização de gorduras comerciais de alto e baixo trans indicadas para recheio de biscoito tipo sanduiche



Fonte: adaptado de Davioli (2010)

Cada tipo de gordura foi aquecido até a temperatura de 100 °C - acima da de fusão, portanto - permanecendo nela por 15 minutos. Após foi mantida a 70 °C por uma hora. Estando ainda totalmente no estado líquido, a gordura foi colocada em ambiente à temperatura constante

de 25 °C, onde a cada minuto de permanência foi realizado o teste da porcentagem de sólidos utilizando um Espectrômetro de RMN (Ressonância Magnética Nuclear). As medições foram realizadas até que o percentual de sólidos da gordura estabilizasse à temperatura do ambiente, através de convecção natural. (DAVIOLLI, 2010)

As curvas são semelhantes, porém as gorduras com alto teor de trans tem vantagem em relação ao tempo de início da cristalização se comparada com as de baixo trans. Logo a utilização de gorduras com baixo teor de trans, que são as mais requisitadas para saúde humana, necessitam de um tempo mais elevado para cristalizar, quando mantidas em um ambiente em temperatura constante, a partir da de fusão.

Pesquisa realizada por Rodrigues, Anton e Gioielli (2003) demonstrou que resfriamentos rápidos tendem a formar grãos pequenos e de estabilidade intermediária devido ao pouco tempo de cristalização, enquanto resfriamentos lentos formam grãos maiores e estáveis.

De acordo com Wright (2000) a cristalização ocorre inicialmente de maneira lenta e rapidamente há crescimento na massa da estrutura cristalina. E quanto menor variação da cadeia de triglicerídeos, resultando em um único ácido graxo, a tendência de cristalização é maior, segundo Grimaldi (1999).

A Equação 20 (Equação de Avrami) é utilizada para estimar a cristalização cinética da transformação das fases de nucleação e crescimento de grãos no sistema isotérmico, como representado na Figura 8. O SFC (t) descreve o conteúdo de gordura sólida em função do tempo; SFC (∞), o limite de gordura sólida conforme o tempo tende ao infinito; e C é uma constante de avrami que determina a velocidade de cristalização em função da temperatura ambiente e da agilidade do crescimento de cristais.

$$\frac{\text{SFC}_{(t)}}{\text{SFC}_{(\infty)}} = 1 - e^{-Ct^a} \quad (20)$$

O expoente de avrami “a” está relacionado ao processo de crescimento dos cristais, que depende do tempo de nucleação e da quantidade e tamanho dos grãos formados, conforme a Tabela 2. O tipo de crescimento de grão pode ser esferulítico (tridimensional), em disco (bidimensional) e em agulha (unidimensional), por isto indicados por 3,2,1. A nucleação pode ser instantânea (0), onde todos os núcleos surgem no mesmo momento; ou esporádica (1) onde o número de núcleos aumenta linearmente com o tempo (WRIGHT, 2000).

Tabela 2 - Valores representativos do expoente de avrami e os tipos de crescimento e nucleação

Tipo de Crescimento	Tipo de Nucleação	a	Tipo de crescimento do cristal e nucleação esperado
3	1	4	crescimento esferulítico a partir de núcleos esporádicos
3	0	3	crescimento esferulítico a partir de núcleos instantâneos
2	1	3	crescimento em forma de disco a partir de núcleos esporádicos
2	0	2	crescimento em forma de disco a partir de núcleos instantâneos
1	1	2	crescimento em forma de agulha a partir de núcleos esporádicos
1	0	1	crescimento em forma de agulha a partir de núcleos instantâneos

Fonte: adaptado de Wright (2000)

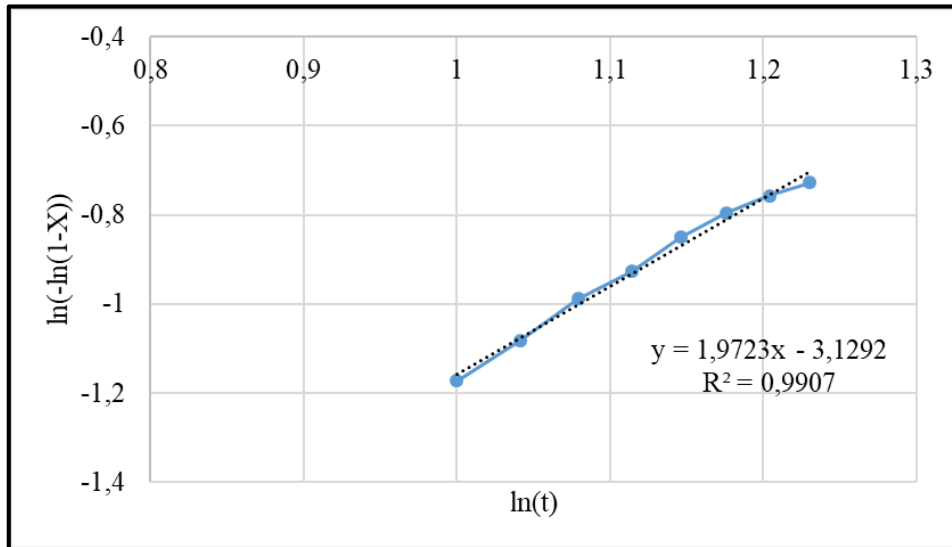
Em caso do valor de “a” não ser exato e corresponder a um valor intermediário entre 1 e 2; 2 e 3; 3 e 4, é considerado em todos os casos nucleação heterogênea, onde há presença de nucleações instantânea e esporádica. Para encontrar o valor do expoente de Avrami, e a velocidade de cristalização é necessário aplicar logaritmo na Equação 20, resultando na Equação 21, onde X corresponde à razão do teor de sólidos desenvolvido em determinado instante. (BRITO,2010)

$$\ln(-\ln(1 - X)) = \ln C + a \ln(t) \quad (21)$$

Em um gráfico com escalas logarítmicas é esta equação gera uma reta, cujo coeficiente angular corresponde ao valor do expoente de Avrami “a” e o linear, à velocidade de cristalização “C”. Assim é possível determinar a velocidade média de solidificação da gordura submetida a convecção natural (BRITO,2010).

A Figura 9 mostra a curva obtida a partir da Equação 21 com os valores calculados por Daviulli (2010), considerando apenas o intervalo entre 10 e 17 minutos na Figura 8, em que o percentual de sólidos cresce com o decorrer do tempo, sendo possível obter maior confiabilidade na equação da reta. Observa-se que o valor do expoente de Avrami médio é próximo de 2, correspondendo a um crescimento de grão do tipo agulha e disco com nucleação heterogênea, sendo parte da nucleação esporádica e outra instantânea; e que a velocidade de cristalização média sob convecção natural dos recheios de biscoitos com baixo teor de ácido graxo trans é na ordem de 3,13% por minuto.

Figura 9 – Curva de avrami para a gordura com baixo teor de ácido graxo



Fonte: a autora (2018)

2.3.1 Normas pertinentes à quantidade de ingredientes em produtos industrializados

Há um crescimento na produção de alimentos industrializados ricos em gordura, açúcar e sódio. Estes alimentos têm valores energéticos altos fazendo com que haja um aumento de doenças como obesidade, diabetes, entre outras na sociedade brasileira (BRASIL, 2010).

Com isto foi publicada em 2010, pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA, a Resolução RDC nº 43, que tem como objetivo esclarecer o perfil nutricional dos alimentos processados na indústria. A estratégia da Organização Mundial da Saúde (OMS) é garantir à população uma alimentação mais saudável, atingindo o valor energético apropriado para consumo e diminuindo a quantidade de ácidos graxos trans (BRASIL, 2010).

Com esses objetivos foram criadas as normas da RDC 359 e 360 para fornecer ao consumidor detalhadamente a composição do produto e os respectivos valores energéticos. A Resolução RDC nº 360 propõe inserir na declaração dos rótulos de embalagens a quantidade dos valores energéticos dos seguintes componentes nutritivos: proteínas, sódio, carboidratos, gorduras totais, saturadas e trans. Com essas informações nos rótulos o consumidor tem conhecimento e compreensão da composição dos alimentos, garantindo um consumo saudável. O alimento pode ser considerado como zero trans se tiver 0,2 g de gordura trans em relação à porção de referência do respectivo alimento (BRASIL, 2003).

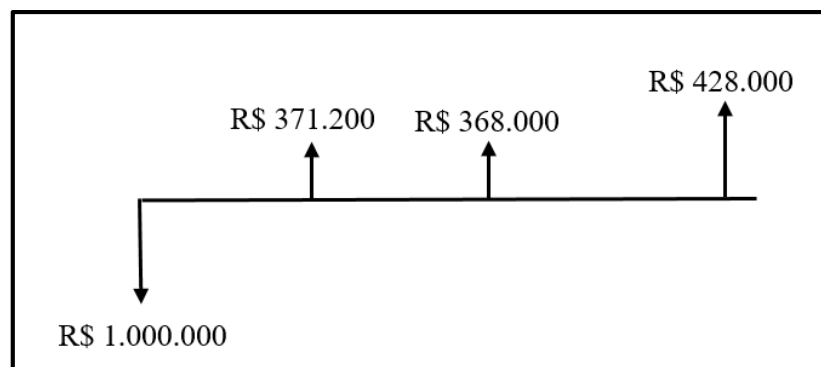
Com o objetivo de desenvolver um produto com composição zero trans, as empresas enfrentaram dificuldades na mudança da gordura dos recheios de biscoitos. Visto que antes eram utilizadas gorduras que cristalizavam mais rapidamente, a gordura com baixo trans necessita de um tempo maior para que haja sua cristalização (BRASIL, 2008).

2.4 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

A análise de um determinado investimento é realizada com base da viabilidade financeira no contexto da empresa que envolvem condições, critérios e objetivos. O investimento comum inicia com o desembolso do investidor que tem conhecimento e expectativa dos retornos futuros, porém o maior desafio é a interpretação das ocorrências futuras de retorno para garantir a aprovação do investimento (BROM e BALLIAN, 2009).

O fluxo de caixa representa o cenário do valor investido com a seta para baixo, conforme a Figura 10, e os demais valores positivos representam as projeções dos retornos futuros do investimento (BROM e BALLIAN, 2009).

Figura 10 – Fluxo de caixa



Fonte: adaptado de BROM E BALLIAN (2009)

Essas análises de investimentos podem ser realizadas segundo Brom e Balian (2009) através do método de payback, taxa interna de retorno e valor de presente líquido. O payback simples demonstra quanto tempo é necessário para recuperar o capital investido, ele é calculado considerando cenários conservadores e otimistas. Os cenários conservadores são considerados os que fornecem menor lucro de venda para a empresa levando em consideração as taxas de juros, em contraponto o cenário otimista considera o melhor lucro de venda sem grandes taxas de juros.

2.4.1 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno (TIR) representa uma medida suficiente de retorno para repor de maneira integral e exata o investimento de um projeto. O cálculo da TIR é independente de qualquer valor externo ao fluxo de caixa, ele apenas avalia as entradas e saída do investimento analisado em um período de tempo, conforme a Equação 22. (BROM e BALLIAN, 2009).

$$-I_0 + \sum \frac{FCL_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (22)$$

Sendo a relação do investimento inicial I_0 , com sinal conforme fluxo de caixa da Figura 10, o somatório dos fluxos de caixa líquido FCL em função do período de tempo n .

2.4.2 Valor presente líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) é conhecido como o método para avaliar os fluxos de caixa descontados. Ele proporciona a comparação entre o valor investido e o somatório do fluxo de caixa líquido sendo ele calculado para uma taxa de juros (j) conforme a Equação 23 (BROM e BALLIAN, 2009).

$$VPL = -I_0 + \sum \frac{FCL_n}{(1 + j)^n} \quad (23)$$

Se o valor de VPL for superior a zero significa que o investimento atingira o retorno mínimo com lucro ao investidor, se for igual a zero o projeto torna-se indiferente pois haverá retorno apenas para o capital investido sem lucros, e se for menor que zero significa que é inviável (BROM e BALLIAN, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os dados do projeto do túnel de resfriamento forçado de uma linha de biscoitos recheados comparados e discutidos com as variáveis reais calculadas e mensuradas. Juntamente são explicadas as propriedades da gordura utilizada no recheio do biscoito e suas características desejáveis com relação as características do túnel.

Por fim, é proposto um fluxograma de atividades para desenvolvimento deste trabalho onde é apresentada a ordem das atividades a serem realizadas por meio de métodos de numéricos e dados de referenciais para realização destes cálculos.

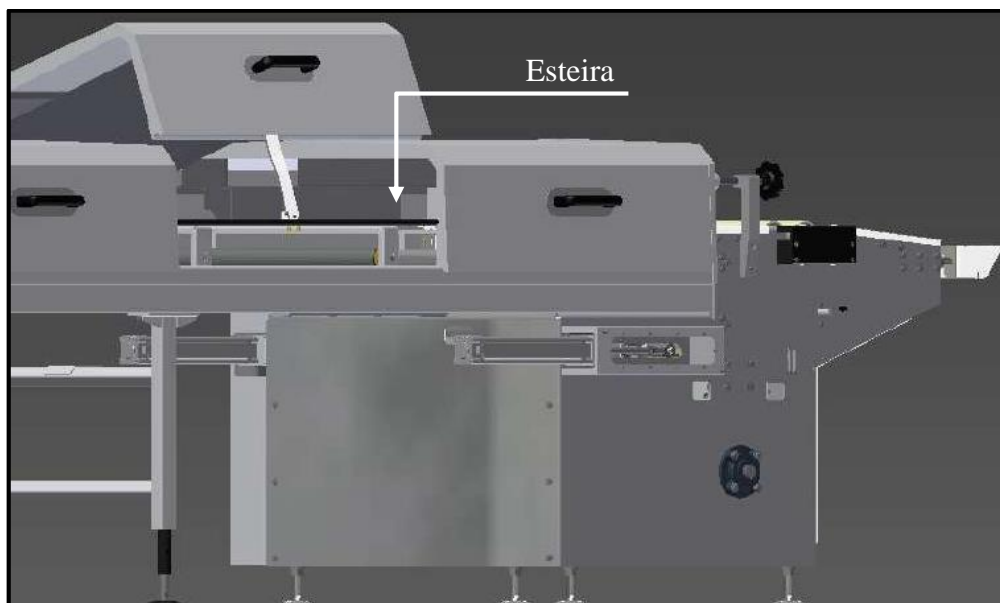
3.1 CARACTERIZAÇÃO E DISCUSSÃO DA SITUAÇÃO ATUAL

No local onde o túnel de resfriamento está instalado, a temperatura ambiente média é de 30 °C no verão e 20 °C no inverno. Independente da estação, a umidade relativa ambiente oscila em torno de 50%.

O túnel em estudo tem 30 m de comprimento, coberto por 30 capotas articuladas de 1 m de comprimento para acesso à limpeza e manutenção, como demonstrado na Figura 11. As capotas contém o isolamento térmico de aço inox, que diminui a altura interna de 40 para 27 mm e, conseqüentemente, o volume. Entre elas também há isolamentos, porém que permitem fluxo de ar frio para o meio externo.

A entrada e a saída do túnel têm áreas de 0,0459 m², para passagem do produto e do fluxo de ar.

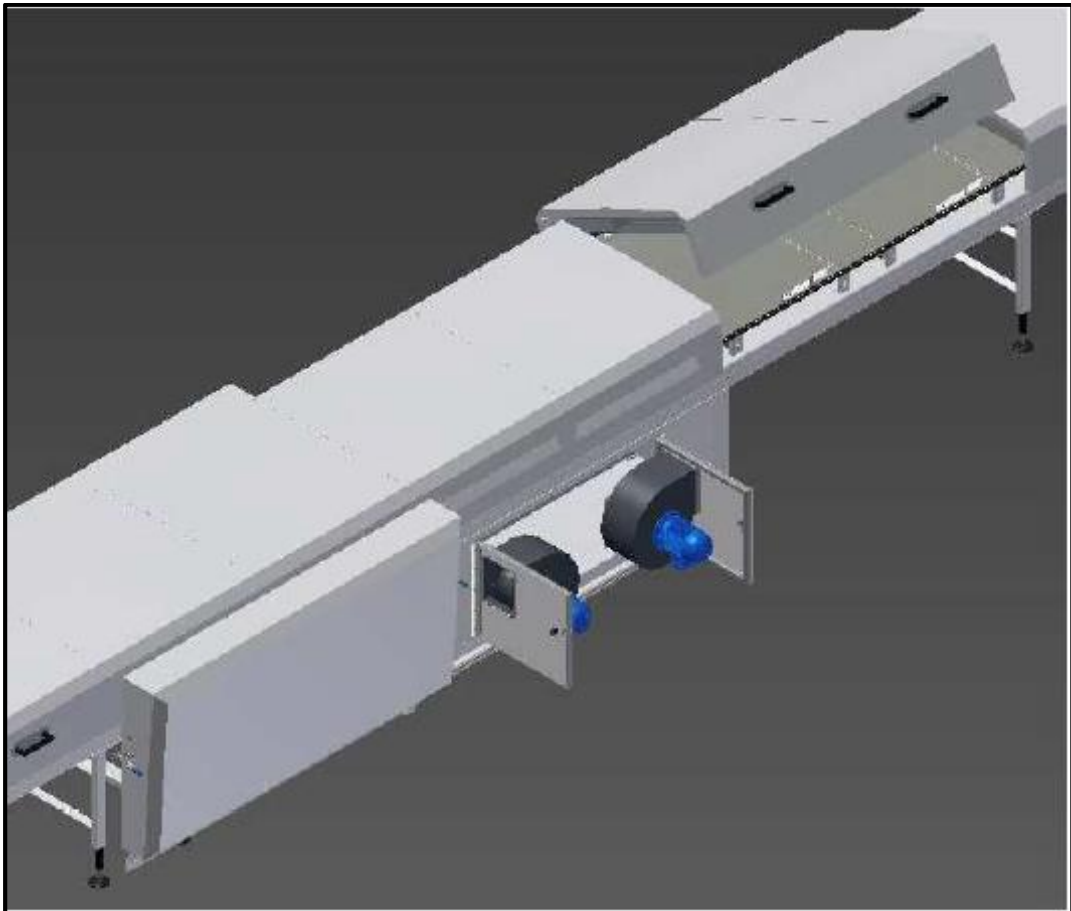
Figura 11 - Capotas articuladas do túnel de resfriamento em estudo



Fonte: a autora (2018).

O túnel é composto por três unidades de refrigeração, iguais à demonstrada na Figura 12, compostas por dois ventiladores centrífugos nas portas de acesso, por um evaporador localizado no lado oposto e por condensador e compressor situados abaixo do túnel. Os sistemas insuflam ar no interior do túnel à temperatura de 15 °C. As duas capotas acima dos ventiladores têm as funções de direcionar o ar sobre a esteira e, ao lado oposto, de coletar e canalizar o fluxo para o evaporador, que é precedido por um filtro.

Figura 12 – Unidade de resfriamento do túnel em estudo

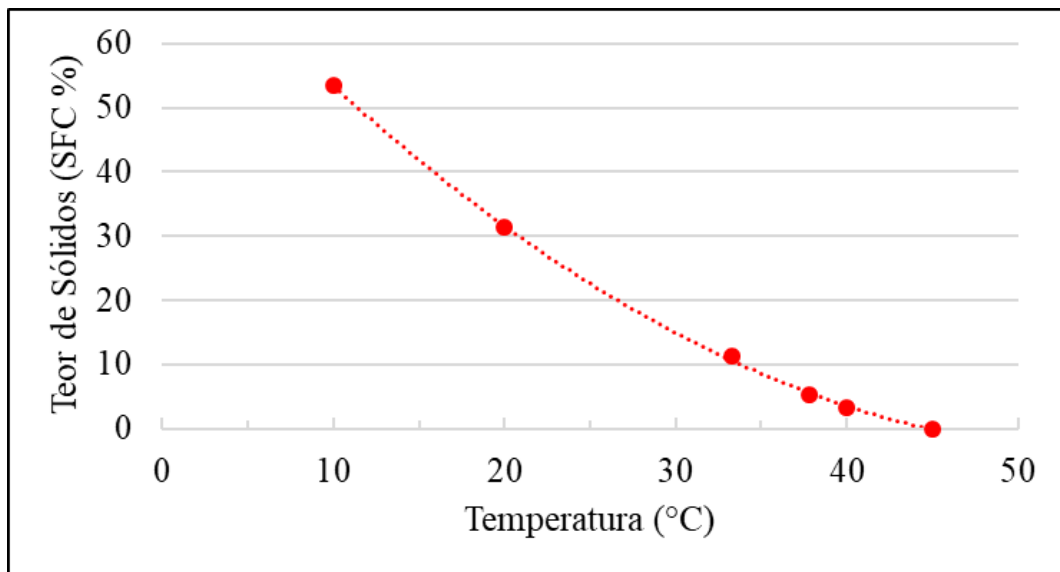


Fonte: a autora (2018).

O projeto desse túnel de resfriamento pressupõe que o biscoito entrasse a 45 °C e saísse a 25 °C, diferentemente da temperatura de saída das demais linhas de recheados, que normalmente é de 20 °C. No entanto, o biscoito está entrando com uma temperatura inferior à prevista, sendo em média 40 °C, onde o teor de sólidos é pequeno, o qual proporciona maior espalhabilidade do recheio no biscoito. A Figura 13 apresenta a curva de sólidos (SFC %), obtida através do processo RMN (Ressonância Magnética Nuclear), em relação ao resfriamento do óleo de palma para ser utilizado no recheio dos produtos.

A porcentagem de cristalização na temperatura de saída do biscoito que está sendo produzido – nomeado aqui Biscoito 1 – (cerca de 24 °C, como esperado pelo projeto), segundo a Figura 13, é de aproximadamente 24%, resultando em um recheio superficialmente solidificado, mas com interior parcialmente líquido. No caso do biscoito em estudo – nomeado aqui Biscoito 2 – motivo ao qual a linha foi implantada, este efeito da cristalização é tão crítico que a maior parte do recheio é perdida antes de chegar nas embaladoras. Por isto, este produto não é produzido no túnel em estudo.

Figura 13 - Curva de sólidos da gordura vegetal hidrogenada utilizada nos biscoitos



Fonte: dados da Empresa (2018).

Existem duas possibilidades que podem justificar o motivo ao qual os biscoitos 1 e 2 não estejam cristalizando completamente. A primeira é que não há tempo suficiente para a gordura estabilizar a sua estrutura cristalina; a segunda é que a temperatura de saída do produto é alta.

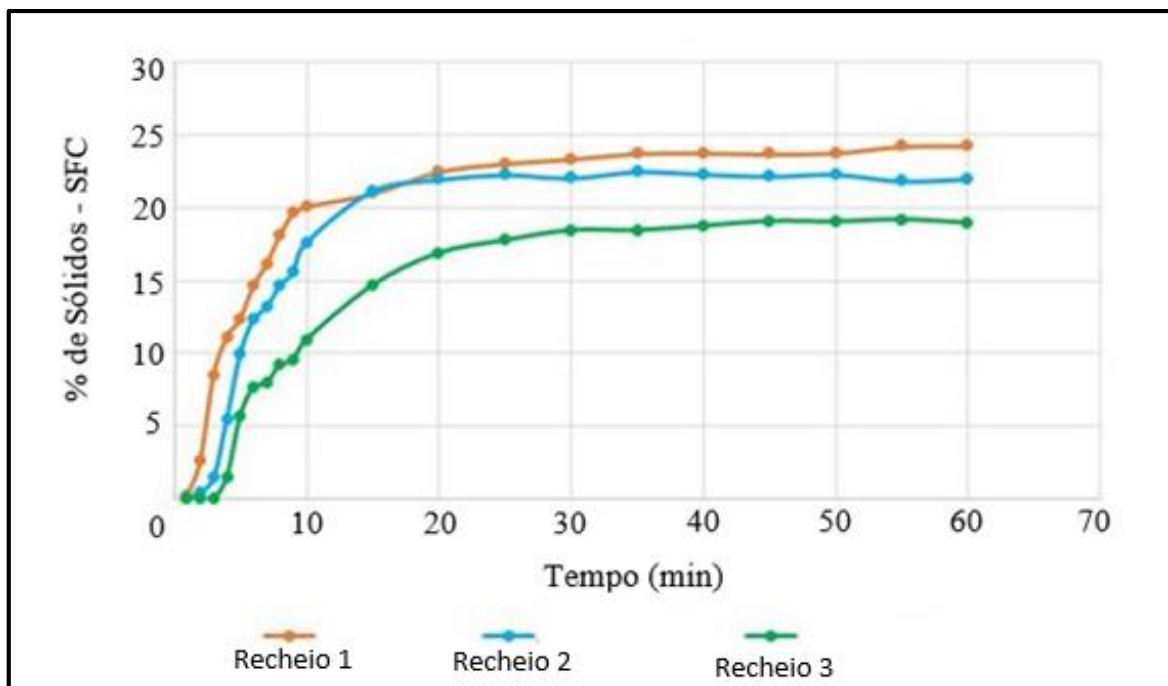
Analisando a primeira hipótese, o projeto do túnel prevê que os biscoitos 1 e 2 (massa e recheio) deveriam reduzir 20 °C de temperatura em um tempo de permanência no interior de 5,3 min. No entanto, o Biscoito 1 atravessa o túnel em 3,6 min e o Biscoito 2, em 4,8 min. Esta redução de tempo de permanência deu-se em função da necessidade de aumento da demanda.

Analisando o caso do Biscoito 2, nas demais linhas ele tende a sair com temperatura entre 20 e 24 °C, descartando a possibilidade da sua temperatura de saída do túnel, proposta pelo projeto, ser alta. A temperatura de entrada também é de 40 °C. Como o Biscoito 1 é produzido no túnel em estudo e sai dele com a temperatura prevista enquanto o 2 não, a hipótese 1 é a mais provável.

Para compreender como a gordura se comporta em relação à tempo e temperatura, são realizados testes de ponto de gotejamento e curvas de sólidos e de cristalização. O ponto de gotejamento indica a temperatura de mudança de fase, onde a gordura passa de sólido para líquido. Esse ponto de fusão na gordura utilizada é de 43,5 °C. O que influencia no ponto de fusão de cada gordura é o comprimento da cadeia de ácidos graxos que compõe a sua estrutura cristalina e seu grau de instauração (MISKANDAR, et al., 2005).

A curva de cristalização é realizada pelo método de RMN, onde é possível verificar o comportamento da gordura em relação ao tempo. A isoterma da gordura utilizada, classificada como Recheio 3, é indicada na Figura 14 pela linha verde, o recheio 1 e 2 não são utilizadas para biscoitos. Ela foi submetida à temperatura de 100 °C e após reduzida para 70 °C e, então, mantida em ambiente com temperatura de 25 °C.

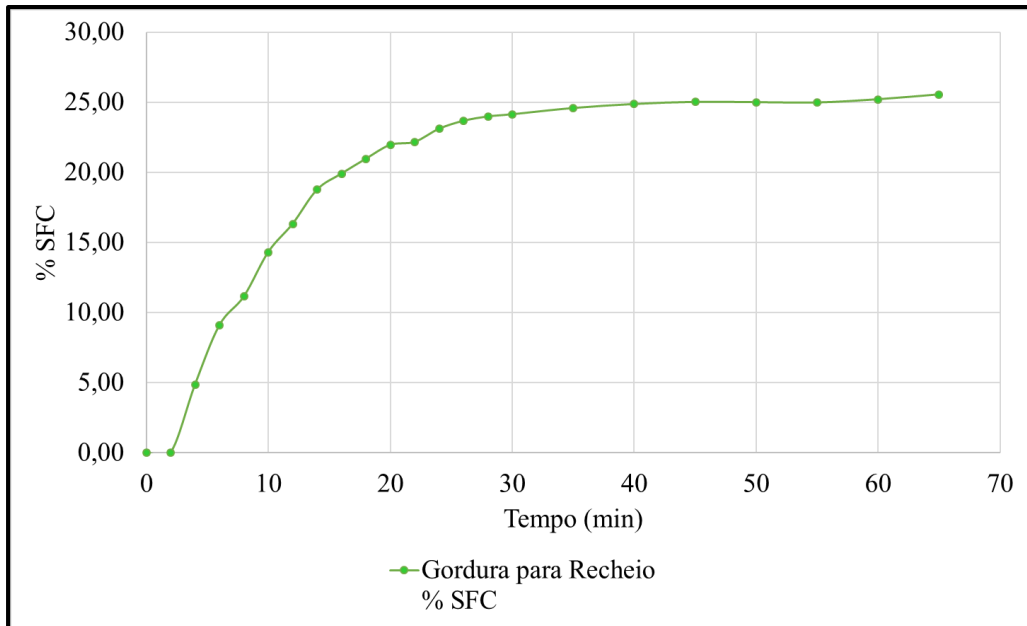
Figura 14 - Isoterma de cristalização da gordura utilizada, à temperatura ambiente de 25 °C



Fonte: dados da Empresa (2018).

Como os biscoitos estão resfriando em ambiente com temperatura em torno de 15,5 °C, foi obtido curva correspondente à temperatura do ambiente de resfriamento mais próxima desse valor, 20 °C, conforme Figura 15. Logo, percebe-se que ao diminuir a temperatura ambiente, a gordura tende a aumentar seu teor de sólidos mais rapidamente quando submetida à convecção natural, estabilizando em 30 minutos.

Figura 15 - Isoterma de cristalização da gordura utilizada, à temperatura ambiente de 20 °C



Fonte: dados da Empresa (2018).

A Tabela 3 apresenta dados relacionados à quantidade de calor necessária ao processo de resfriamento dos biscoitos recheados 1 e 2, da temperatura de 40 °C para 24 °C. As cargas térmicas sensível e latente foram recalculadas através da Equação 8, considerando calores específicos (c_p) diferentes para massa e recheio. A produção dos biscoitos 1 e 2 (massa e recheio) é de 2300 kg/h.

Tabela 3 - Fatores de influenciam na produção de biscoitos 1 e 2

Variáveis	Massa	Recheio
Calor específico (kJ/kgK)	1,755	2,508
Calor latente da cristalização (kJ/kg)	-	150,48
Carga térmica sensível (kJ/kgK)	46628,7	25681,9
Carga térmica latente (kJ/s)	-	26,752
Produção (kg/h)	1660	640
Percentual de produção (%)	72,2	27,8

Fonte: a autora (2018)

A Tabela 4 apresenta os dados técnicos reais dos três sistemas de refrigeração que compõem o túnel conforme os dados do projeto. Os dados visam a obtenção da quantidade necessária de sólidos na gordura do recheio com objetivo de fornecer o biscoito cristalizado.

Tabela 4 – Características e condições de operação do túnel de resfriamento

Temperatura de entrada no túnel (°C)	40
Temperatura de saída do túnel (°C)	24
Redução de temperatura no túnel (°C)	16
(A) Carga térmica total do biscoito (kW)	20,12
(B) Potência induzida pelos ventiladores (kW)	15,36
(C) Perda de calor para o meio externo (kW)	14,08
Carga térmica total (A + B + C) (kW)	49,56
Capacidade frigorífica total 24% (kW)	12,24
Capacidade frigorífica do túnel (kW)	61,80

Fonte: a autora (2018)

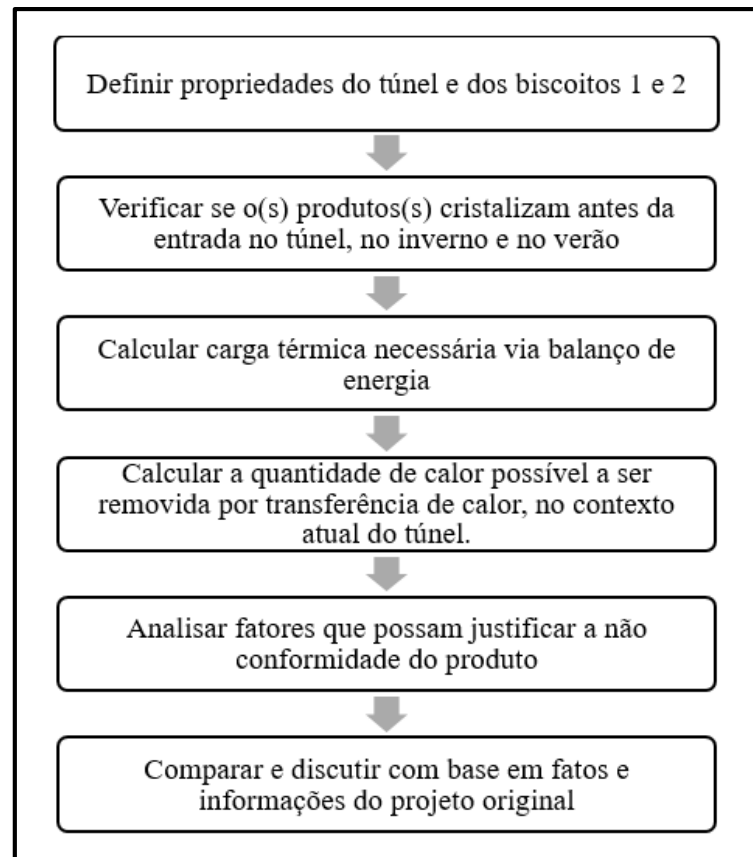
A potência induzida pelos 6 ventiladores foi calculada através dos dados técnicos do modelo utilizado, que possui potência de 2,2 kW. A perda de calor dos isolamentos para o meio externo foi retirada do projeto. De acordo com os cálculos realizados nesta seção, considerando-se os valores das Tabelas 4 e 5, o túnel tem a capacidade necessária para resfriar os biscoitos 1 e 2 e fornecer completa cristalização do recheio, mesmo que seja considerado 24 % a mais da capacidade total.

3.2 ETAPAS DE TRABALHO

De acordo com as especificações do túnel, esboçou-se um fluxograma, Figura 16, que determina os critérios utilizados no desenvolvimento deste trabalho com as etapas propostas. Primeiramente serão definidas as propriedades de dimensionamento e físicas dos biscoitos 1 e 2 e as propriedades da gordura nos recheios. Após, neste trabalho, serão discutidas as propriedades do túnel de resfriamento considerando entrada, saída e o seu interior, identificando as diferenças para o processo de produção do biscoito 1 e 2.

Com as propriedades do túnel e dos biscoitos 1 e 2 foi calculada a carga térmica latente do recheio através da análise da resistência condutiva e convectiva natural logo após o biscoito sair da recheadora. Com a finalidade de verificar se os produtos têm a fase de nucleação antes de entrarem do túnel de resfriamento, no inverno e verão devido à temperatura ambiente ser diferente. E seguidamente realizado o balanço de energia para determinar a carga térmica total para produção destes biscoitos.

Figura 16 – Fluxograma de etapas do processo de redimensionamento



Fonte: a autora (2018)

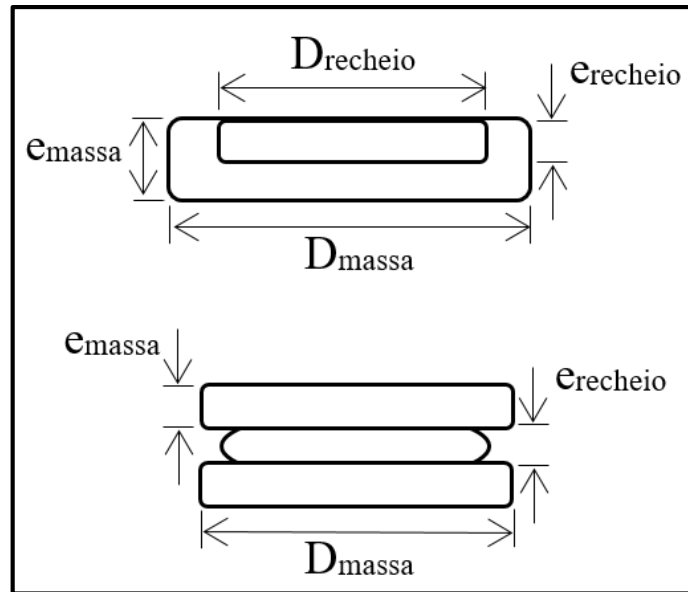
Com a carga térmica definida foi obtida a quantidade de calor possível de ser removida por transferência de calor e, então, estimados os fatores que possam justificar a não conformidade de produção. E, então discutiu-se e comparou-se os resultados com os dados da Tabela 5 do projeto original e avaliou-se a viabilidade econômica do projeto.

3.2.1 Definição das propriedades do biscoito

Através de um paquímetro universal Mitutoyo, verificaram-se as dimensões do biscoito tipo 1 e 2 da massa e recheio conforme a Figura 17, sendo o primeiro, o biscoito 1 e o segundo, com formato sanduíche, o biscoito 2 e, após foi calculado a área e volume correspondente a cada biscoito. Deve-se considerar que no interior do túnel entra uma fileira de biscoitos composta por 32 biscoitos e, a cada metro de túnel, entram 32 fileiras que resultam em 1024 biscoitos por metro de túnel.

Farzin, Zeinali, Rahim (2013 apud HUSSEIN, 2018) e López (2013) realizaram pesquisas envolvendo as propriedades do óleo de palma que é utilizado nos recheios dos biscoitos em estudo e determinaram valores específicos de algumas delas. A Tabela 5 relaciona os dados encontrados pelos autores.

Figura 17 – Formato ilustrativo dos biscoitos 1 e 2



Fonte: a autora. (2018)

Tabela 5 – Propriedades físico-químicas do óleo de palma

	Hussein	López
Densidade (kg/m ³)	885	$\rho_{c_p} = 1,8 \times 10^6 \pm 0,1$
Calor específico (J/kgK)	1875	
Condutividade (W/mK)	0,144	$0,16 \pm 0,01$
Viscosidade (Pa.s)	0,485	-
Difusividade (m ² /s)	-	0,894

Fonte: a autora. (2018)

Como os valores obtidos pela empresa de $\rho=891 \text{ kg/m}^3$ e $c_p=2020 \text{ J/kgK}$ e sua multiplicação está dentro da tolerância de 0,1 citada por López (2013). A Tabela 6 representa os dados considerados característicos do óleo de palma para este trabalho, de acordo com as referências da Tabela 5.

Tabela 6 – Propriedades físico-químicas do óleo de palma utilizado nos recheios de biscoitos

Difusividade	8,94E-08 m ² /s
Condutividade	0,16 W/mK
Calor específico	2020 kJ/kgK
Densidade	891 kg/m ³
Viscosidade	0,485 Pa.s

Fonte: a autora. (2018)

Como o recheio é composto por gorduras e outros componentes, nos cálculos foi considerado que o mesmo é composto de 58% de gordura e 42% de outros ingredientes. Logo, a Equação 24 relaciona os calores específicos do recheio, da gordura e dos outros componentes, para estimar o valor do calor específico destes.

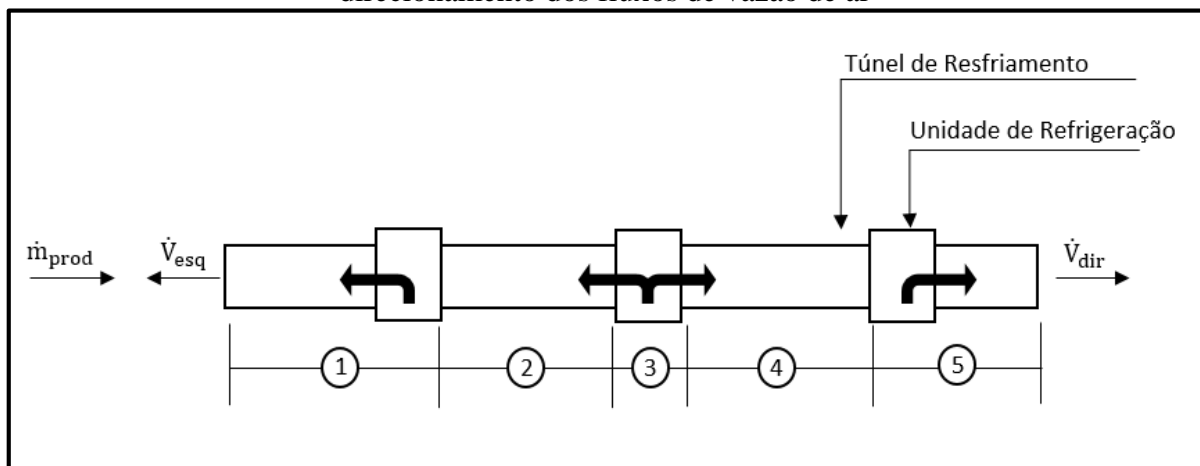
$$c_{p,r} = 0,58c_{p,g} + 0,42c_{p,o}$$

$$c_{p,o} = \frac{c_{p,r} - 0,58c_{p,g}}{0,42} \quad (24)$$

3.2.2 Definição das propriedades do túnel

O túnel de resfriamento foi dividido em cinco trechos para analisar as propriedades e o comportamento do ar no decorrer do túnel conforme a Figura 18. O esboço do túnel de resfriamento em estudo é composto pelas três unidades de refrigeração e pelos direcionamentos dos fluxos de ar existentes no seu interior. Os sentidos dos fluxos estão de acordo com o pressuposto devido à existência de fluxo de ar na entrada e saída do túnel, representadas pelas vazões volumétricas (\dot{V}) com direção para esquerda e direita. A vazão mássica (\dot{m}) corresponde ao produto e a direção ao qual entram no túnel que é o mesmo sentido da lona.

Figura 18 – Esboço do túnel de resfriamento com as unidades de refrigeração e o direcionamento dos fluxos de vazão de ar



Fonte: a autora (2018)

Com o auxílio do anemômetro digital Kestrel 4000, foi mensurado o valor da temperatura e da velocidade de fluxo de ar na entrada e saída do túnel, e dos ventiladores diretamente na saída do mesmo. Com as velocidades foram estimadas as vazões volumétricas (\dot{V}) pela Equação 25 de acordo com a respectiva área de entrada e saída de $0,0459 \text{ m}^2$, e a partir

das vazões de entrada e saída foram calculadas as velocidades de cada trecho, com a relação da quantidade de ventiladores em cada trecho e a área interna do túnel de 0,068 m².

$$\dot{V}_i = v_i A \quad (25)$$

Logo para obter as velocidades do fluxo de ar em cada trecho primeiramente foram determinadas as velocidades de cada ventilador, através da vazão volumétrica (\dot{V}) do ar na entrada e saída dividida por três ventiladores, obtendo a vazão de cada ventilador e a velocidade. Com isso as velocidades do fluxo de ar no trecho 1 e 5 foram obtidas através da vazão de 3 ventiladores dividida pela área interna de fluxo. Nos trechos 2 e 4, a velocidade é dada através da vazão volumétrica de 1 ventilador pela área interna de fluxo. A velocidade no trecho três é considerada a média da velocidade dos trechos 2 e 4.

Os cálculos levaram em consideração o comprimento de cada trecho de túnel com característica de superfície plana rugosa e não entre cilindros pois a distância entre os biscoitos ao longo do túnel e suas espessuras são pequenas e possíveis de serem desprezadas se relacionadas ao túnel e ao fluxo de ar. A partir destes valores, foi realizada uma média entre os trechos para determinar as velocidades existentes em cada trecho e as suas respectivas temperaturas pois são conhecidos os valores de temperatura em cada unidade de refrigeração.

3.2.3 Definição das cargas térmicas do processo de resfriamento

As cargas térmicas foram obtidas através de cálculos analíticos envolvendo as propriedades do ar, da massa do biscoito e do recheio. A carga térmica total (CT) foi calculada pela Equação 26, que é a soma da do produto, \dot{Q}_{produto} , com a restante, $\dot{Q}_{\text{restante}}$, que corresponde às cargas térmicas dos ventiladores, da perda de calor ao meio e de renovação de ar.

$$CT = \dot{Q}_{\text{produto}} + \sum \dot{Q}_{\text{restante}} \quad (26)$$

Pela Equação 27 foi estimada a carga térmica do produto, que envolve a da massa e a do recheio, sensível e latente (L), calculados respectivamente pelas Equações 28 e 29. A carga térmica sensível corresponde à da gordura que, pela sua importância, foi obtida diretamente da curva de sólidos e dos dados da Tabela 6 e a dos outros componentes.

$$\dot{Q}_{\text{produto}} = \dot{Q}_{\text{massa}} + \dot{Q}_{\text{recheio,sensível}} + \dot{Q}_{\text{recheio,latente}} \quad (27)$$

$$\dot{Q}_{\text{Recheio,sensível}} = \dot{Q}_{\text{Gordura}} + \dot{Q}_{\text{Outros}} \quad (28)$$

$$\dot{Q}_{\text{Recheio,latente}} = m_{\text{recheio}}L \quad (29)$$

Para a carga de renovação foi utilizado a metodologia de equacionamentos determinada por Çengel (2013), considerando a umidade absoluta do ar ambiente constante para fábrica, entrada e saída do túnel. As pressões da fábrica e do túnel para realização dos cálculos a seguir foram medidas com um manômetro digital da Kimo MP120.

A entalpia de renovação para entrada e saída do túnel foi estimada utilizando cartas psicométricas mantendo a umidade absoluta da fábrica constante, apenas variando a temperatura. Sendo a condição ambiente à temperatura e pressão da fábrica nos dias de verão e umidade relativa do ar de 50%.

Com esses dados e considerando a umidade absoluta constante em cada caso na Equação 30, foi encontrada a pressão de vapor da água (p_v) presente no ar ambiente e do túnel. E, com essa pressão, é possível determinar pela Equação 31 a pressão do ar (p_{ar}) considerando o ar uma mistura de ar seco e vapor d'água. (ÇENGEL, 2013)

$$\omega = \text{cte} = 0,622 \frac{p_v}{p_{\text{amb}} - p_v} \quad (30)$$

$$p_{\text{amb}} = p_{ar} + p_v \quad (31)$$

A pressão ambiente (p_{amb}) utilizada nas Equações 30 e 31 é a pressão da fábrica. Considerando as pressões e as vazões do ar conhecidas são determinadas as quantidades de fluxo mássico de renovação da entrada e saída do túnel, pela Equação 32 utilizada para gases ideais, considerando $R = 0,287 \text{ kJ/kgK}$ (ÇENGEL, 2013).

$$p_{ar}\dot{V} = \dot{m}RT \quad (32)$$

A energia de renovação foi calculada pela Equação 2 com a variação das entalpias encontradas a partir da carta psicométrica e dos fluxos mássicos definidos. Com isso, é possível comparar a carga térmica total de resfriamento com a carga térmica prevista pelo projeto.

3.2.1 Verificação do tempo de nucleação

Para determinar se o recheio tem a fase de nucleação antes de entrar no túnel, primeiramente serão definidos os números adimensionais de Rayleigh, Grashof, Prandl e Nusselt através das equações 12, 15, 16 e 17, obtendo assim o coeficiente convectivo natural. Utilizando as Equações 9 será definida o coeficiente global de transferência de calor que relaciona área e resistência total. A resistência total do sistema de resfriamento é composta por uma convectiva do ar do túnel e outra condutiva dos biscoitos.

A resistência condutiva do biscoito 1 e 2 para o cálculo do coeficiente global será estimada considerando que o biscoito é um cilindro sólido e que o fluxo de ar passa perpendicularmente e acima dele. Como o biscoito a ser estudado é do tipo sanduíche serão consideradas duas resistências referentes à massa do biscoito e, outra, ao recheio, conforme a Equação 33 que relaciona as condutividades térmicas (K), raios (r) e espessuras (e) considerando massa e recheio em série.

$$R_{t,cond} = \frac{e_m}{K_m \pi r_m^2} + \frac{e_r}{K_r \pi r_r^2} + \frac{e_m}{K_m \pi r_m^2} \quad (33)$$

Para definição das condutividades térmicas da massa e recheio do biscoito 1 e 2 foi utilizada a Tabela 7 definida por Choi and Okos (1986, apud ASHRAE, 2006) onde a condutividade é calculada separadamente para cada componente (proteína, gordura, carboidrato, fibra e aditivos) do alimento em função da sua temperatura. No caso do biscoito, ele é composto por todos os componentes então foi realizada uma média ponderada de todas as condutividades e, no recheio, apenas não foram consideradas as proteínas e os carboidratos.

Será calculada a condutividade térmica para a temperatura de entrada e saída do biscoito de 40 e 24 °C respectivamente. Caso os valores da condutividade forem próximos, será considerado a média da condutividade térmica constante para o biscoito ao longo do túnel.

Tabela 7 – Condutividade térmica dos componentes do recheio*

Propriedades Térmicas	Componentes de Alimentos	Equações
Condutividade W/(m·K)	Proteínas	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2$
	Gordura	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2$
	Carboidratos	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2$
	Fibras	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2$
	Aditivos	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2$

Valores válidos entre -40 °C e 150°C

Fonte: adaptado de ASHRAE (2006)

Com o coeficiente global de transferência de calor (U) foi possível estimar, pelas equações 7 e 29, o tempo necessário para que o ar removesse, via convecção natural, a quantidade de calor correspondente ao calor latente do recheio para o biscoito 2, considerando o valor da Tabela 4. Com o tempo e a velocidade da esteira foi estimado o comprimento necessário para que ocorra a fase de nucleação do recheio, e comparado com a distância entre a saída da recheadora até a entrada do túnel, no verão e no inverno.

3.2.2 Definição da quantidade de calor a ser removida

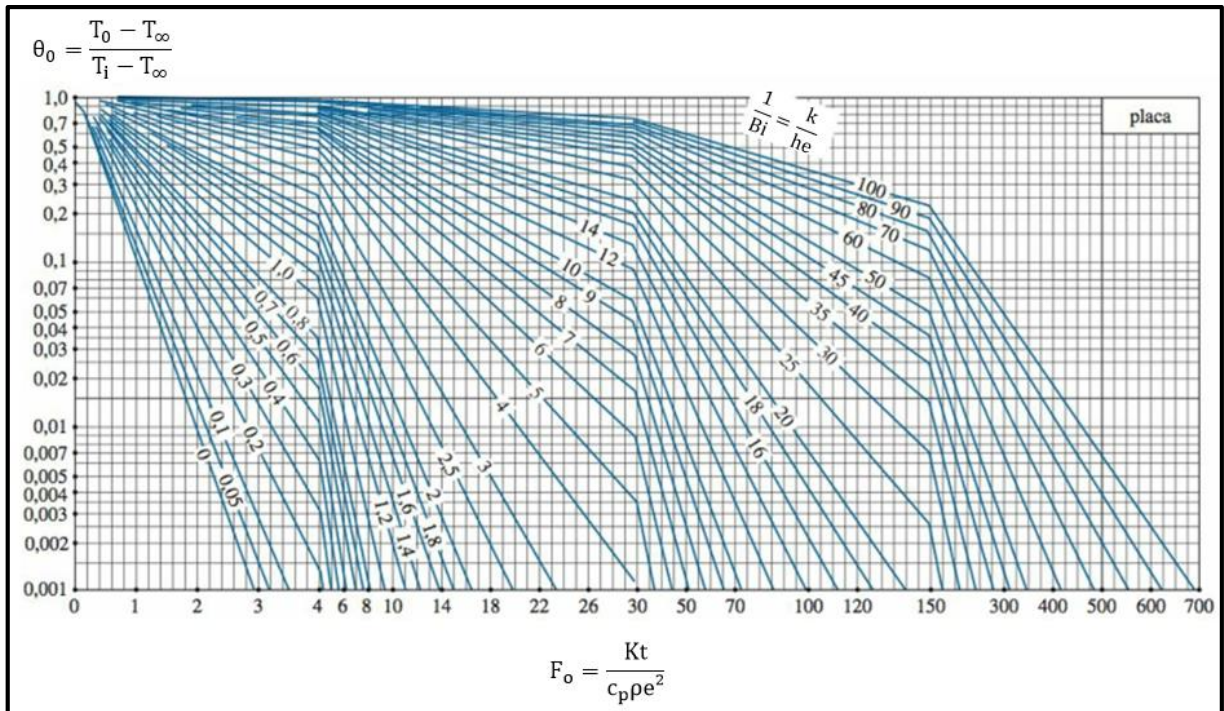
Como apenas o biscoito 1 é produzido, foi estimado um coeficiente convectivo por trecho através dos equacionamentos de Re e Nu , contudo os valores obtidos ficavam sempre abaixo da faixa de 25 a 250 W/m^2K encontrada na literatura do Çengel (2012) por convecção forçada, além da temperatura de saída do biscoito 1 estimada pela equação 19 resultar acima da real.

Como o h por trecho não resultou em dados verdadeiros de temperatura final, foi estimado h médio via decaimento exponencial da temperatura da Equação 19. Apesar do valor do coeficiente convectivo ter resultado obtido mais coerente para convecção forçada, respeitando a condição de $Bi < 1$, a temperatura novamente não atingiu um valor próximo ao real.

Para o cálculo da carga térmica do biscoito 2 foi considerado o método de solução gráfica de temperatura transiente de sistemas aglomerados, onde a temperatura do núcleo (T_0) do biscoito durante o resfriamento é diferente da temperatura superficial (T). Considerando que os biscoitos estão muito próximos entre si, não existindo fluxo entre eles, a análise foi realizada através das cartas de Heisler para uma superfície plana, válido se $F_0 > 0,2$. (ÇENGEL, 2012)

Como o túnel foi projetado para produzir o biscoito 2 e somente produz o biscoito 1, foram analisadas as propriedades adimensionais do ar do túnel para o biscoito 1 e projetado para o tipo 2. Por meio das Equações 13, 18, e 19 (p. 26 e 28), e os gráficos de temperatura transiente que estão ilustrados nas Figuras 19, 20 e 21. A Figura 19 relaciona o número de Fourier, o inverso do de Biot, θ_0 que é o fator de temperatura utilizado para encontrar a temperatura do núcleo e T_∞ é a temperatura média do ar no túnel.

Figura 19 – Fator de temperatura no plano central da placa plana



Fonte: adaptado de Çengel (2012)

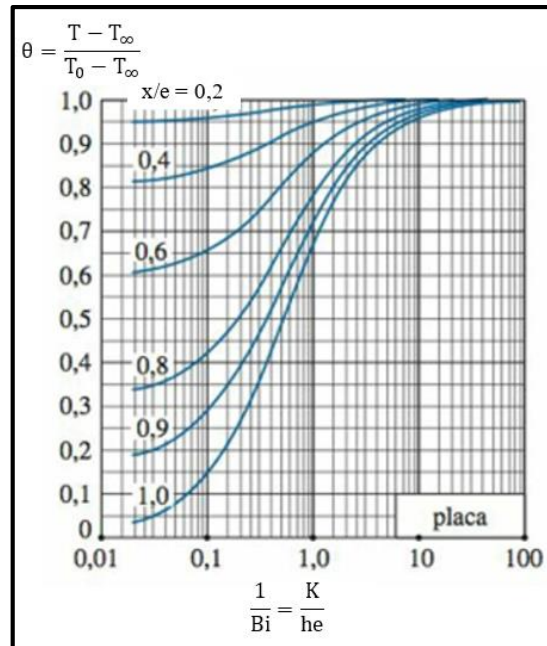
Considerando a temperatura de saída como sendo a do núcleo do biscoito 1 conhecida foi calculado o θ_0 . Também foi calculado o número de Fourier, que corresponde ao eixo horizontal da Figura 19. Com estes valores foi encontrado o inverso do número de Biot para o resfriamento do biscoito 1 e o coeficiente convectivo do ar.

Com o coeficiente convectivo constante foi calculado o número de Fourier para o biscoito 2, que difere do 1 na espessura e no tempo de permanência no túnel. Com o número de Fourier novo e Biot constante foi encontrado o valor de θ_0 e a temperatura do núcleo de saída do túnel do biscoito 2 (T_0).

De acordo com a Figura 20 foi encontrado o fator de temperatura para estimar a temperatura da superfície do biscoito (T) com relação a do núcleo (T_0) e a do túnel (T_∞). Para encontrar a temperatura superficial foi considerado o $x/e=1$ que segundo Çengel (2012) é para análise da superfície da placa.

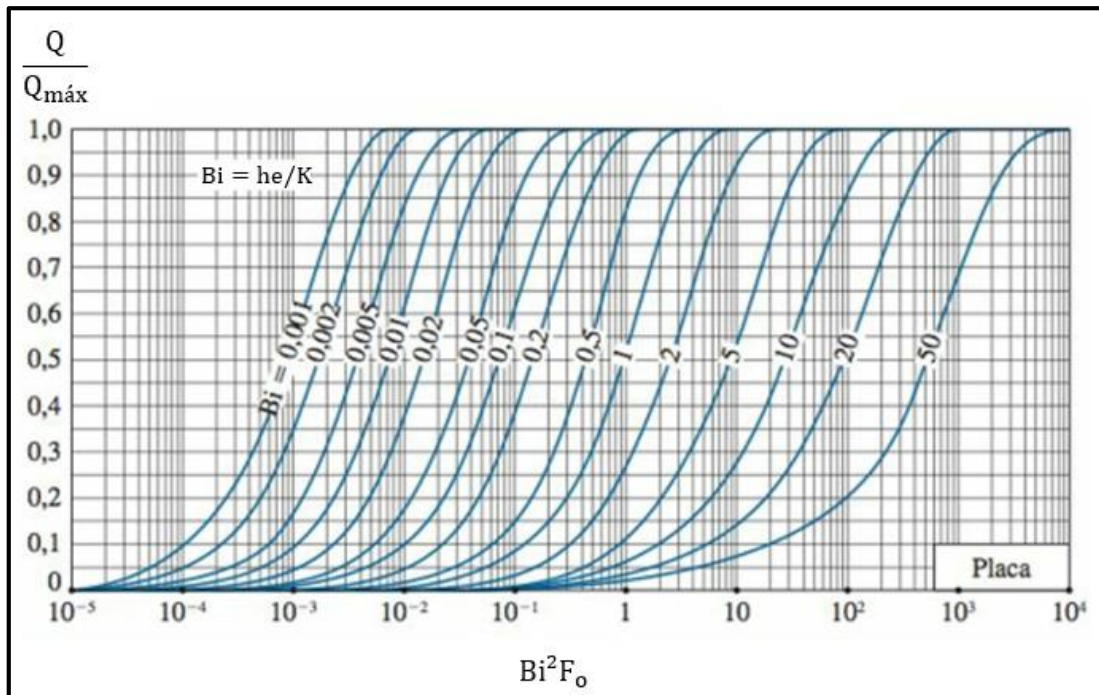
Com a Figura 21 é possível determinar a quantidade total de calor transferido em um determinado tempo. Onde a carga térmica máxima representa a quantidade de calor máxima que pode ser transferida quando o tempo tende ao infinito (ÇENGEL, 2012). Então, utilizando os valores de Bi e Fo foram estimadas as razões de cargas térmicas retiradas e máxima do biscoito. Essa carga máxima é obtida pela Equação 8 com a diferença de temperatura do biscoito e da média do ar.

Figura 20 – Distribuição de temperatura ao longo da espessura



Fonte: adaptado de Çengel (2012)

Figura 21 – Razão da carga térmica de transferência de calor



Fonte: adaptado de Çengel (2012)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES DO BISCOITO

Para o cálculo do volume dos biscoitos é necessário levar em consideração sua espessura. No caso do biscoito tipo 1, a espessura total é a espessura da massa, pois é um biscoito com perfil cilíndrico onde o recheio é inserido no interior da massa. O biscoito tipo 2 é considerado duas vezes a espessura da massa mais a do recheio, conforme a Figura 17 e a Tabela 8.

Tabela 8 – Medidas dimensionais dos biscoitos 1 e 2

	Tipo 1		Tipo 2	
	Massa	Recheio	Massa	Recheio
Espessura (m)	0,0089	0,003	0,006	0,003
Diâmetro (m)	0,0410	0,034	0,041	0,034
Volume (m ³)	1,175E-05		1,857E-05	
Área Superficial (m ²)	0,00132		0,00132	

Fonte: a autora (2018)

Os valores específicos de massa e recheio dos biscoitos são iguais, porém existe uma pequena diferença na porcentagem de massa e recheio que compõem o biscoito, resultando em um calor específico diferente conforme a Tabela 9.

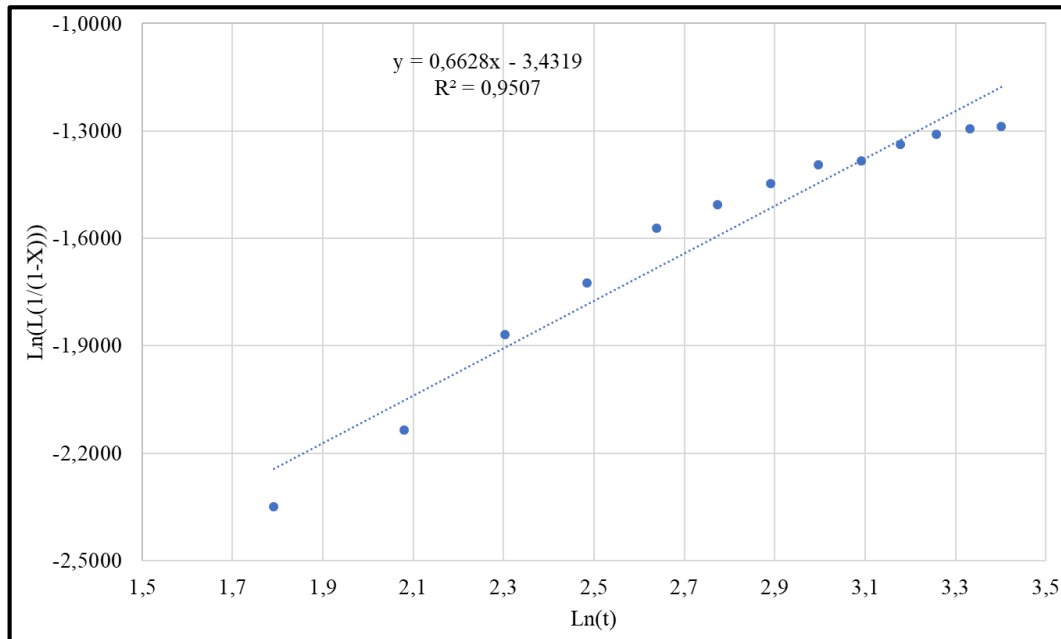
Tabela 9 – Calor específico (kJ/kgK) para cada componente dos biscoitos

Componente	Tipo 1	Tipo 2
Massa	1,75728	1,75728
Outros	3,18762	3,18762
Recheio	2,51040	2,51040
Biscoito	1,93645	1,96692

Fonte: a autora (2018)

Com as curvas de cristalização da gordura e a Equação 20, de Avrami, foi realizado o gráfico da Figura 22 que representa a velocidade de cristalização da gordura utilizada no recheio de ambos biscoitos, quando submetida à convecção natural. Isto permite que seja compreendido como ela se comporta naturalmente em relação ao tempo quando mantida à temperatura de 20 °C, que representa a temperatura média da fábrica no inverno.

Figura 22 – Gráfico da equação de Avrami para a gordura mantida a temperatura constante de 20°C



Fonte: a autora (2018)

O gráfico demonstra que o óleo de palma, quando submetido à convecção natural à temperatura de 20 °C, tem uma velocidade de cristalização de 3,34% de sólidos por minuto, e um expoente de Avrami $a = 0,6628$. O expoente de Avrami, encontrado na Tabela 2 (p.33), demonstra que o crescimento de grãos da gordura nessas condições ambientais é em formato misto de agulha e disco com nucleação instantânea, ou seja, ocorre no início da convecção natural. Assim, a meta de temperatura final do biscoito passa a ser 20 °C e não 24 °C conforme a Tabela 5, devido ao entendimento da gordura a temperatura ambiente de 20 graus.

4.2 PROPRIEDADES DO TÚNEL

A partir das medições verificou-se que a pressão barométrica do ar no interior do túnel mantém-se constante com valor de 5 kPa enquanto a da fábrica é de 93,3 kPa. As velocidades do ar medidas na entrada e saída do túnel em funcionamento e as vazões e velocidades calculadas pelos equacionamentos em cada trecho do túnel estão na Tabela 10, com a média de velocidade e vazão dos 5 trechos.

Com as medições de temperatura na entrada e saída foi estipulada uma média para cada trecho. A dos trechos 2 e 4 é a média entre os sistemas de refrigeração ao qual ela situa-se conforme a Figura 18 (p.45) e a temperatura do trecho 3 foi considerada a média dos trechos 2 e 4. A Tabela 10 abaixo, relaciona as temperaturas, comprimento e tempo em cada trecho do túnel sendo que o tempo em cada trecho é de acordo com seu comprimento e a velocidade da

esteira do túnel. A velocidade da esteira para o biscoito tipo 1 é de 0,15 m/s e a do tipo 2 de 0,1166 m/s, fazendo com que o biscoito permanência no túnel ao longo dos 30 metros por 200 segundos o tipo 1 e 257,143 segundos o tipo 2.

Tabela 10 – Propriedades do túnel para cada trecho na produção de biscoito

	Temperatura (°C)	Comprimento (m)	Tempo Tipo 1 (s)	Tempo Tipo 2 (s)	v (m/s)
Entrada	17,20	-	-	-	4,40
Saída	15,70	-	-	-	3,80
Trecho 1	16,40	8	68,57	53,33	2,97
Trecho 2	15,10	8	68,57	53,33	0,99
Trecho 3	14,60	2	17,14	13,33	0,92
Trecho 4	14,80	6	51,43	40,00	0,85
Trecho 5	15,35	6	51,43	40,00	2,56
Média	15,25	-	-	-	1,66

Fonte: a autora (2018)

Como existe um terceiro tipo de biscoito, não citado neste trabalho, que é produzido nesta linha, com a mesma velocidade de esteira do biscoito 2, foram consideradas as medidas de velocidade do ar e temperatura em relação à velocidade de esteira deste biscoito não mencionado. Porém, as medidas de velocidade e temperatura do ar para diferentes velocidades de esteira resultaram em valores idênticos. Portanto, o que modifica na produção, além do tipo de biscoito, é a velocidade da esteira e o tempo de permanência no túnel, pois o ar permanece com as mesmas propriedades.

4.3 VERIFICAÇÃO DO TEMPO DE NUCLEAÇÃO

A convecção natural dos biscoitos ocorre acima da esteira com perfil retangular com comprimento característico de Gr de 0,4948 metros, considerando razão da área superior da superfície e seu perímetro. Para o ar seco à temperatura de 20 °C, no inverno, a densidade é 1,11 kg/m³ e no verão, à 30 °C, é de 1,07 kg/m³. Quando analisado o ar muito próximo dos biscoitos, ele atinge a temperatura de 40 °C, com densidade de 1,04 kg/m³. Os resultados obtidos dos valores adimensionais e coeficiente convectivo estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Números adimensionais do biscoito tipo 2 para análise da convecção natural

	Inverno	Verão
Tamb (°C)	20	30
β	0,003	0,0034
Ra	2,21E+08	3,31E+08
Nu	90,629	1,04E+02
h (W/m²K)	1,192	1,364

Fonte: a autora (2018)

Sabendo que a diferença da composição da massa do biscoito e do recheio é a presença de carboidratos e fibras na massa, as condutividades foram calculadas para as temperaturas de 40 e 24 °C. Como os resultados da condutividade entre a entrada e a saída são relativamente próximos, foi considerado o valor médio que corresponde à temperatura média de 32 °C, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Condutividade Térmica da Massa e Recheio do Biscoito em relação a temperatura de entrada e saída (W/mK)

Condição	Massa	Recheio
Temperatura 40 °C	0,25018	0,2575
Temperatura 24 °C	0,2370	0,2471
Média	0,2436	0,2523

Fonte: a autora (2018)

Substituindo os valores da Equação 31 com as medidas realizadas do biscoito na Tabela 8 e o resultado das médias da condutividade da Tabela 12, foram obtidos os seguintes resultados para as resistências: $R_1 = 17,78 \text{ °C/W}$, $R_2 = 13,09 \text{ °C/W}$, $R_3 = 17,78 \text{ °C/W}$ resultando na resistência condutiva total em $R_{\text{cond}} = 48,65 \text{ °C/W}$.

Com as resistências condutivas e convectivas foi determinado o coeficiente global de transferência de calor e a carga térmica sensível do biscoito 2, sendo, no inverno, de 0,02991 W e, no verão, de 0,017 W. E a carga térmica latente do recheio na ordem de 0,00042 W no inverno e verão, considerando fluxo mássico do recheio de 0,28% do total do biscoito.

Com a quantidade de calor absorvida pelo ar e o calor latente do recheio foi determinado o tempo de nucleação do biscoito, sem alteração de temperatura, e o quanto de comprimento de esteira em metros eles percorrem. No inverno são percorridos 0,002 metros em 0,014 segundos

e, no verão, 0,0038 metros em 0,025 segundos. Portanto, o biscoito 2 tem a fase de nucleação fora do túnel de resfriamento em ambas estações do ano, desconsiderando assim a carga térmica latente dos cálculos das cargas térmicas totais do túnel, assim como prevê o projeto.

4.4 CARGAS TÉRMICAS

Considerando o estado ambiente da fábrica com pressão de 93,3 kPa, foi obtida via carta psicrométrica uma entalpia de 68,17 kJ/kg e $\omega = 14,87$ g/kg. Analisando o interior do túnel com pressão de 98 kPa e temperatura média dos trechos da Tabela 10 foi encontrado entalpia de 22,4 kJ/kg e $\omega = 2,79$ g/kg. As entalpias da entrada, saída do túnel foram obtidas pelas cartas psicrométricas considerando umidade absoluta da fábrica constante e calculadas as pressões e os fluxos mássicos conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades do ar ao longo do túnel de resfriamento

	i (kJ/kg)	P_v (kPa)	P_{ar} (kPa)	ṁ (kg/s)
Entrada	55	2,1714	90,8286	0,2202
Saída	53	2,1714	90,8286	0,1912

Fonte: a autora (2018)

Resultando a carga térmica de renovação de 5,80 kW. Considerando as cargas térmicas do biscoito 1 e 2 como 22,5 e 27,1 kW, calculadas através da Equação 8 (p.23) para resfriar os biscoitos à 24 °C. A carga térmica total necessária, considerando os efeitos dos ventiladores, das perdas, conforme a Tabela 4, é 57,8 e 62,3 kW, para os biscoitos 1 e 2 respectivamente. Essa carga para o biscoito 1 está coerente com a especificação do túnel de 61,8 kW e para o biscoito 2 está superior.

4.5 QUANTIDADE DE CALOR A SER REMOVIDA

Para encontrar temperatura de saída do biscoito 2 foi necessário determinar o coeficiente convectivo do ar no túnel. Como as propriedades do ar para os biscoitos 1 e 2 não se alteram, primeiramente, foi calculado o coeficiente convectivo do ar para o tipo 1, já que este tem temperatura de saída do biscoito definida. Então com o auxílio da Figura 19 foram encontrados os resultados da Tabela 14.

Tabela 14 – Valores adimensionais para produção do biscoito 1

	θ_0	F_0	$1/Bi$
Calculado	0,35	0,569	-
Retirado do gráfico	-	-	0,1

Fonte: a autora (2018)

Com número de Biot definido encontrou-se o coeficiente convectivo do ar do túnel de resfriamento de $h= 272,56 \text{ W/m}^2\text{K}$. Corrales (2001) realizou estudo para analisar o processo de resfriamento de biscoito utilizando o mesmo método numérico deste trabalho para encontrar o coeficiente convectivo do ar. O cálculo do coeficiente convectivo foi realizado para diferentes velocidades do ar conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Coeficiente convectivo para diferentes velocidades do ar

Velocidade (m/s)	h (W/m²K)	Desvio Padrão
1,0	21,7	1,43
1,5	29,1	2,29
2,0	35,3	1,73

Fonte: adaptado de Corrales (2001)

As propriedades específicas do biscoito como: densidade, calor específico e condutividade eram semelhantes às calculadas neste trabalho. A velocidade média do ar do túnel em estudo, segundo a Tabela 10 (p. 54), é de 1,66 m/s sendo, em média, superior ao teste com velocidade de 1,5 m/s de Corrales (2001). Porém, o coeficiente convectivo encontrado é praticamente 10 vezes maior que obtido por Corrales (2001) à mesma velocidade do ar. Logo, o valor do coeficiente convectivo é grande devido à presença de turbulência no interior do túnel, fazendo com que o ar não seja direcionado diretamente no biscoito como no experimento de Corrales. Justificando o motivo ao qual as primeiras análises para encontrar o coeficiente convectivo do ar obtiveram valores baixos, pois não foi considerado uma grande turbulência do ar interior do túnel.

Considerando $272,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ para o h do túnel para a produção do biscoito 2 foi possível estimar o fator de temperatura, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Valores adimensionais para produção do biscoito 2

	θ_0	F_0	$1/Bi$
Calculado	-	0,26	0,06
Retirado do gráfico	0,61	-	-

Fonte: a autora (2018)

A temperatura final do núcleo ao sair do túnel de 30 metros, de acordo com os valores da Tabela 15, foi de 30,4 °C. Para o biscoito 2 sair à temperatura prevista pelo projeto de 24 °C, ou seja, com os valores de θ da Tabela 14 e $1/Bi$ da Tabela 16, sem realizar alteração no túnel, faltam 281,01 segundos, ou seja, 32,4 metros de túnel adicionais. Este valor é 20% maior que o de projeto, de 27 m. Segundo Çengel (2012), existe uma incerteza no valor do coeficiente convectivo exatamente deste valor. Assim foi recalculado o comprimento necessário do túnel considerando o coeficiente convectivo com 20% extra. Obteve-se 27 metros de túnel adicionais.

Com esses valores foram calculadas as cargas térmicas pela Figura 21 (p. 51) para o biscoito 1. A carga térmica para reduzir 16 °C de temperatura do biscoito 1, através da Equação 8, é de 22,5 kW. Considerando a capacidade de resfriamento do túnel reduzida das demais CTs exceto a do produto (61,8 – 35,2), tem-se uma sobra de 26,6 kW.

Na Tabela 17 estão apresentados os dados usados nos cálculos para estimar a quantidade de calor removida por transferência do biscoito 1, que é de 22,4 kW. Comparando este valor com os 22,5 kW conclui-se que a quantidade de calor removida por transferência é praticamente igual ao necessário para que biscoito atinja temperatura final de 24 °C. Porém dada a incerteza de h , implicando na temperatura de saída do biscoito 1 maior que 24 °C, está coerente com o fato observado deste produto sair do túnel com uma menor SFC do que o desejado.

Tabela 17 – Valores para o cálculo da carga térmica do biscoito 1

	Bi	Bi^2F_0	$Q/Q_{m\acute{a}x}$	$Q_{m\acute{a}x}$ (kW)
Calculado	10	55,75	-	34,57
Retirado do gráfico	-	-	0,65	-

Fonte: a autora (2018)

O mesmo raciocínio foi utilizado para calcular a carga térmica por transferência de calor do biscoito 2 conforme a Tabela 18. Sabendo que a carga térmica através da Equação 8, para reduzir 16 °C de temperatura do biscoito 2, é de 27,1 kW. Considerando a capacidade de

resfriamento do túnel reduzida das demais CTs exceto a do produto (61,8 – 35,2), tem-se uma sobra de 26,6 kW.

Tabela 18 – Valores para o cálculo da carga térmica do biscoito 2

	Bi	Bi²Fo	Q/Q_{máx}	Q_{máx} (kW)
Calculado	16,67	73,00	-	41,93
Retirado do gráfico	-	-	0,60	-

Fonte: a autora (2018)

Apesar do túnel ter capacidade resfriamento extra de 26,6 kW, só são removidos por transferência de calor 25,15 kW. Portanto não o suficiente para resfriá-lo à 24 °C quando deveriam ser removidos 27,1 kW. Então o túnel atual é incapaz de produzir este biscoito a temperatura adequada para venda.

4.6 PARÂMETROS QUE AFETAM A NÃO CONFORMIDADE DO PRODUTO

Testando as limitações atuais do túnel, foi calculado o h necessário para que a temperatura de saída do biscoito 2 fosse de 24 °C. Considerando o valor de Fo calculado na Tabela 16 foram encontrados os resultados da Tabela 19.

Tabela 19 – Valores adimensionais para produção do biscoito 2 à 24 °C

	θ_0	F_o	Bi
Calculado	0,35	0,26	-
Retirado do gráfico	-	-	0

Fonte: a autora (2018)

Observa-se pela Tabela 19 que o valor de Biot é nulo, o que significa que o coeficiente convectivo do ar tende ao infinito. O que mais uma vez comprova a impossibilidade do túnel de produzir o biscoito 2 à 24 °C.

Outro teste realizado neste trabalho foi calcular qual a velocidade da esteira adequada para aumentar o tempo de permanência do biscoito no túnel atual, permitindo redução de temperatura do biscoito a 24 °C. Para isto, foi mantido o valor do coeficiente convectivo $h = 272,56 \text{ W/m}^2\text{K}$. E então, o tempo de permanência encontrado foi de 489,23 segundos, e a velocidade da esteira na ordem de 0,055 m/s. Ou seja, a produção deveria ser reduzida em 52%

para que o biscoito atinja a temperatura do projeto, tornando esta ação inviável, pelo ritmo de recheadora.

Apesar de todas as simulações feitas, para que o biscoito 2 obtivesse a consistência adequada, de acordo com os estudos da gordura, ele deveria sair a 20 °C. Realizando novamente os cálculos, mantendo o h atual e em função de $\theta_2 = 0,19$, seriam necessários, então, 46,3 metros de túnel adicionais. Porém não há espaço físico suficiente para instalação de um túnel com este comprimento, sendo impraticável.

Caso fosse estimada a velocidade da esteira para que o biscoito 2 atingisse a temperatura de 20 °C na saída do túnel, mantendo a produção atual do túnel e o coeficiente convectivo constante, o valor obtido da velocidade da esteira reduziria a produção total em 60%.

Por outro lado, existe outro túnel que permite o resfriamento e cristalização adequada do biscoito 2 na faixa de temperatura de 40 a 24 °C. Para ele foi estimado o coeficiente convectivo do ar no seu interior, encontrado pelos mesmos métodos numéricos do túnel em estudo e obteve-se os valores adimensionais da Tabela 20.

Tabela 20 – Valores adimensionais para produção do biscoito 2 em outro túnel de resfriamento

	θ	F_o	$1/Bi$
Calculado	0,5	0,601	-
Retirado do gráfico		-	0,3

Fonte: a autora (2018)

O coeficiente convectivo obtido foi de 54,44 W/m²K, menor do que o valor encontrado no túnel de resfriamento em estudo e próximo ao valor obtido no estudo de Corrales (2001). Entretanto, este túnel tem um comprimento de 38 metros, a temperatura interna do túnel é de 8 °C e a velocidade da esteira é de 0,065 m/s, ou seja, é mais longo e tem metade da temperatura interna e velocidade da esteira quando comparado com o túnel deste trabalho. Contudo, como o sistema da linha permite a alimentação de uma fileira de biscoitos por vez na esteira do túnel é possível manter sua velocidade baixa, ao contrário do túnel em estudo que são inseridas duas fileiras de biscoitos por vez.

Outro fato que corrobora a alimentação do túnel atual por transferência de calor é o fato que ao diminuir a temperatura de insuflação para menos de 15°C, forma-se uma camada de gelo sobre o compressor. Isto sugere que a temperatura do refrigerante seja muito baixa para que este fato ocorra. Essa grande diferença de temperatura entre o ar insuflado e o refrigerante é um

indicativo que a transferência de calor do evaporador tenha baixa eficiência. Esse fato pode ser causado pelo evaporador estar muito distante dos ventiladores, diferentemente das outras linhas, conforme pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Sistema de refrigeração do túnel em estudo



Fonte: a autora (2018)

Além disso no outro túnel o ar insuflado pelos ventiladores é canalizado diretamente no túnel, conforme a Figura 24.

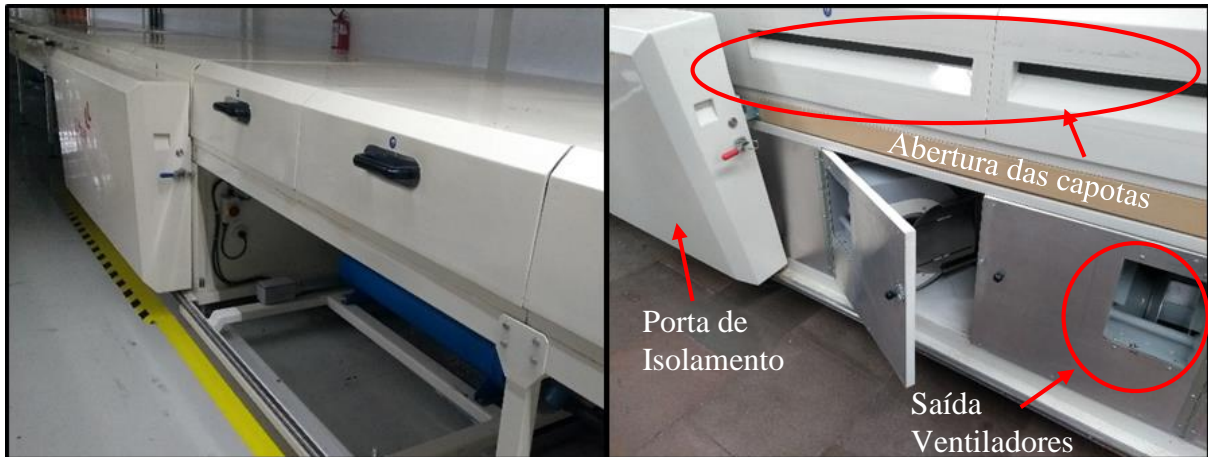
Figura 24 – Sistema de Refrigeração do túnel que produz o biscoito 2



Fonte: a autora (2018)

Já no túnel em estudo o ar não é canalizado. Ao invés disso os ventiladores insuflam o ar no interior da porta de isolamento formando uma espécie de reservatório. Dele o ar entra no túnel pelas aberturas nas capotas, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Sistema de insuflação do ar do túnel em estudo



Fonte: a autora (2018)

4.7 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

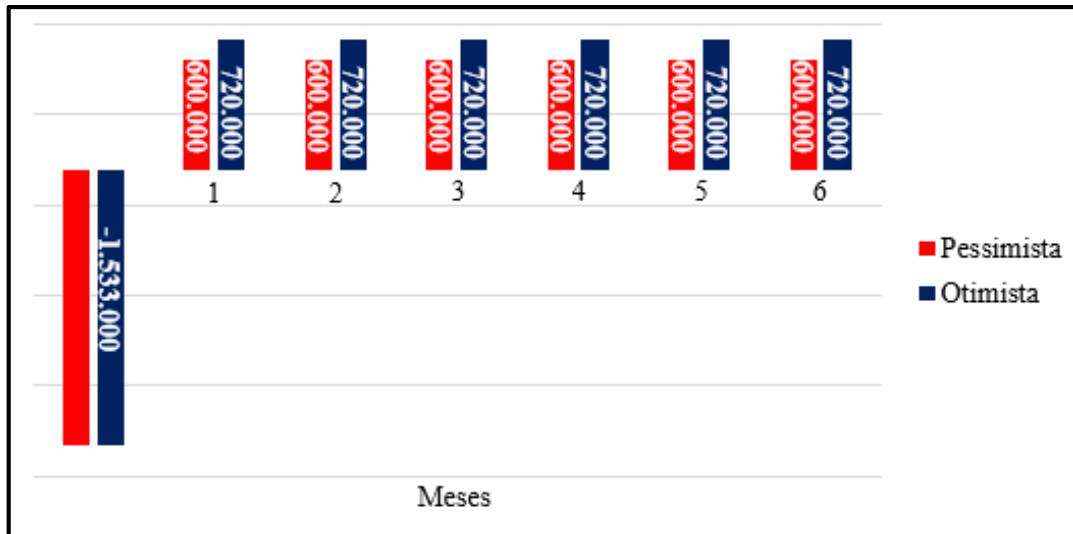
Considerando-se manter a produção atual da linha, sem modificações no túnel, e utilizando o projeto complementar de 27 m, foi realizada uma análise de investimento. A análise consiste em visualizar o tempo que esta linha de produção de biscoitos deve produzir o biscoito 2 para pagar o investimento do túnel complementar necessário.

Contudo, foram considerados dois cenários de carga horária de trabalho, de 15 e 24 horas e para cada cenário, um pessimista (conservador) e um otimista. Em ambos cenários o lucro proposto é de 15% para o menor e maior valor de venda de um pacote de biscoito de 150g, considerando as taxas de juros e custos fixos e variáveis que esta linha tende a gerar quando produz.

Em ambos cenários, foi considerado a quantidade de dias por mês, onde o mês é composto por 20 dias úteis, considerando dois dias úteis para manutenção. Com isso, foram realizados os fluxos de caixas da Figura 25 e 26, considerando o investimento do projeto no valor de R\$ 1.533.000,00 e o fluxo de capital investido por 6 meses após o investimento.

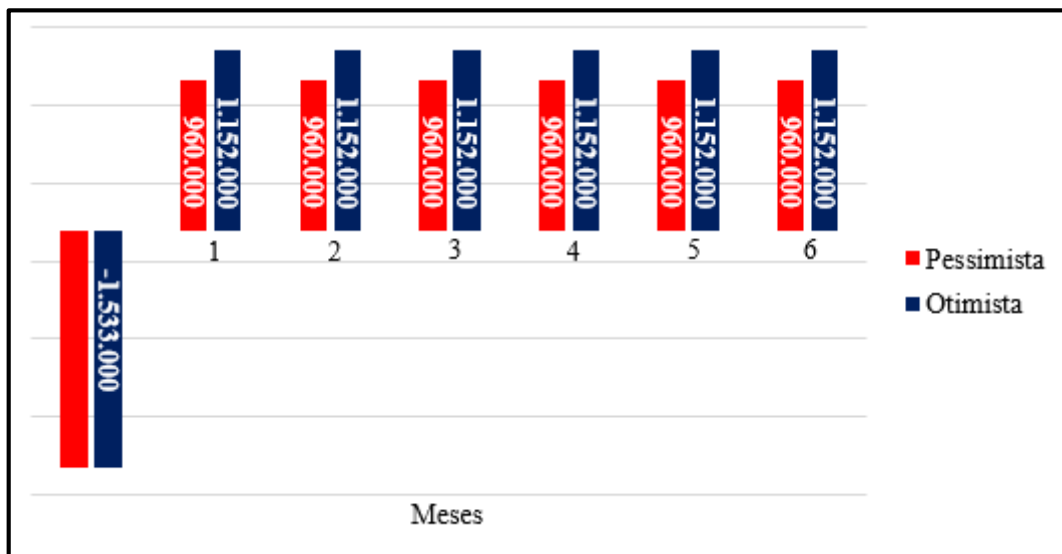
De acordo com as Figuras 26 e 27, é possível verificar que com a carga horária de 24 horas o cenário pessimista quita a dívida em 1,6 meses e a otimista em 1,3 meses. Em contraponto, para a carga horária de 15 horas o cenário conservador quita a dívida em 2,5 meses e a otimista em 2,12 meses.

Figura 26 – Fluxo de caixa para carga horária de 15 horas



Fonte: a autora (2018)

Figura 27 – Fluxo de caixa para carga horária de 24 horas



Fonte: a autora (2018)

Foi utilizado o método do Valor Presente Líquido (VPL) considerando a taxa de juros de 0,506 % por mês, Taxa Interna de Retorno (TIR) e o payback para analisar os fluxos, conforme a Tabela 21. Considerando o valor em reais dos lucros de R\$ 0,225 (pessimista) e R\$ 0,27 (otimista).

Economicamente, a instalação do túnel adicional é viável em todos os cenários estudados neste trabalho conforme verificado na Tabela 21, caso seja instalado o novo túnel de 25 metros, essa linha deverá produzir no pior caso, ou seja, pessimista com menor carga horária, 51 dias. Logo, o objetivo do trabalho para esta área foi alcançado, porém é necessário enfatizar que não foi realizada análise estratégica de venda do biscoito 2 para comprovar a viabilidade do payback

da instalação deste túnel, o que justifica o motivo ao qual a empresa não tenha adquirido ainda este túnel.

Tabela 21 – Análise do investimento do túnel complementar

	Carga Horária	Otimista	Pessimista
TIR (am)	15	40,99 %	31,61 %
	24	72,27 %	58,70 %
VPL (reais)	15	R\$ 2.711.514	R\$ 2.004.095
	24	R\$ 5.258.222	R\$ 4.126.351
PAYBACK	15	43 dias	51 dias
	24	27 dias	32 dias

Fonte: a autora (2018)

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou a compreensão do funcionamento do túnel de resfriamento de biscoitos. Além disto, também permitiu a análise das características físico-químicas do biscoito verificando e de que maneira elas são influenciadas pelo processo de resfriamento. Com essas pesquisas foram identificados os parâmetros e propriedades do túnel e do biscoito que interferem no processo de resfriamento.

Como o biscoito 2 não é produzido, apesar do túnel ter sido projetado para ele, o estudo partiu da análise das propriedades do biscoito 1, que é produzido. Através de métodos gráficos de sistemas aglomerados foi obtido um coeficiente de convecção do ar de $272,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ e temperatura do núcleo do biscoito 2 à saída de $30,4 \text{ }^\circ\text{C}$, o que implica em uma cristalização insuficiente do recheio. Este biscoito foi testado uma vez nesta linha, sem qualquer registro da temperatura de saída. Tem-se apenas a informação de que ele chegava às embaladoras sem recheio. A temperatura encontrada está de acordo com o fato de que o biscoito estava saindo com temperatura superior à prevista pelo projeto.

Com esses resultados e a capacidade de energia disponível no túnel para resfriar os biscoitos de $26,6 \text{ kW}$, foram avaliados os fatores que influenciam o não atendimento da temperatura do biscoito 2. Verificando que a quantidade de remoção de energia por transferência de calor de $25,15 \text{ kW}$ é inferior a carga térmica necessária para resfriar o biscoito a 24°C de $27,1 \text{ kW}$, foi observado que o biscoito 2 está resfriando por transferência de calor e não atingindo a temperatura necessária pela falta de capacidade do túnel.

Devido a este problema foi solicitado a empresa um projeto complementar para contribuir com o resfriamento e melhorar a cristalização. Neste projeto o comprimento para reduzir até $24 \text{ }^\circ\text{C}$ era de 27 m . No presente trabalho obteve-se $32,4 \text{ m}$. Considerando a incerteza do coeficiente convectivo, os resultados coincidem.

Com o projeto do túnel complementar percebeu-se a necessidade de realizar a análise econômica deste investimento com a finalidade de comprovar a viabilidade de sua instalação. Os resultados obtidos indicaram, no pior caso de lucro para a empresa, que em 52 dias é possível recuperar o valor investido, sendo viável a aplicação do túnel por esta análise. Logo, todos os objetivos propostos para este trabalho foram atingidos.

Diante dos resultados deste trabalho de conclusão de curso, visando melhoria no estudo do processo de resfriamento de biscoitos, propõe-se que seja realizada uma análise das propriedades do biscoito em resfriamento, para melhor compreensão das temperaturas no núcleo e na superfície dos biscoitos no decorrer do processo.

Em relação ao túnel sugere-se as análises da sua forma geométrica, possibilitando curvas na esteira e aumentando o tempo de permanência do biscoito, sem alteração na velocidade da esteira, e do processo de resfriamento, caso seja utilizada uma esteira vazada, proporcionando fluxo de ar em ambas as superfícies do biscoito e aumentando a quantidade de calor removida por transferência de calor.

Como há a presença de 50 metros adicionais de esteira após o túnel, sugere-se também o estudo da instalação de ventiladores perpendiculares à esteira, para que a convecção forçada gerada pelo ar e seja possível de resfriar os 5 °C restantes do biscoito e cristalizá-lo antes das embaladoras, sem interferir nas propriedades do biscoito.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. Thermal Properties of Foods. In: ASHRAE: Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2006. Cap. 9.
- BOABAID C. **Transferência de calor**. Volume 1. Parte 3. Editora: IFSC, São José, 2010.
- BOHN, Mark S.; MANGLIK, Raj M.; KREITH, Frank. **Princípios de Transferência de Calor**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- BRASIL. Informe Técnico nº 43, de 2010. Perfil Nutricional de Alimentos Processados.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Guia alimentar para a população brasileira: promovendo a alimentação saudável / Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2008. 210 p. – (Série A. Normas e Manuais Técnicos)
- BRASIL. Resolução RDC nº 360, de 23 de dezembro de 2003. Regulamento Técnico Sobre Rotulagem Nutricional de Alimentos Embalados.
- BRITO, Ana Calado. **Cinética de cristalização isotérmica e não isotérmica a frio do pet e das blendas PET/PHB em diferentes contrações**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- BROM, Luiz Guilherme; BALIAN, Jose E. A.. **Análise de Investimentos e capital de giro::** conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2009.
- BUENO, Sandhoerst Said. **Modelagem de escoamento ao longo de evaporadores de serpentina com tubos aletados**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2004.
- ÇENGEL, Yunus A.. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- CORRALES, José Caro et al. Analysis of random variability in biscuit cooling. **Journal Of Food Engineering**. Mexico City, p. 147-156. out. 2001.
- CORRÊA, Henrique L.; GIANESI, Irineu G. N.; CAON, Mauro. **Planejamento, Programação e Controle da Produção: MRP II /ERP: Conceitos, Uso e Implantação: Base Para SAP, Oracle Applications e Outros Softwares Integrados de Gestão**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- COSTA, Ennio Cruz da. **Refrigeração**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- DAVIOLI, Fernanda Zaccarelli. **Efeito de adição de emulsificantes na cristalização de gorduras de baixo trans para recheio de biscoito**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

DENNIS, Pascal. **Produção Lean simplificada**: um guia para entender o sistema de produção mais poderoso do mundo. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. Tradução de : Rosalia A. N. Garcia.

FELLOWS, P. J.. Propriedades dos alimentos e teoria do processamento. In: FELLOWS, P. J.. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. 2. ed. [s.i.]: Artmed, 2006. Cap. 1. p. 25-76.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Máquinas Térmicas, Estáticas e Dinâmicas: Fundamentos de Termodinâmica, Características Operacionais e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.

GARCIA, Rita de Kássia de Almeida. **Previsão de Parâmetros de Cristalização de Blends de Gorduras para uso Específico por Redes Neurais Artificiais**. 2014. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

GHOTRA, B. S.; DYAL, S. D.; NARINE, S. S. Lipid shortenings: a review. **Food Research International**, Elsevier, v. 35, n. 10, p. 1015-1048, 2002.

GOMES, V. M.; SANTOS, M. P.; FREITAS, S. M. L. Análise de açúcares e gorduras de recheios em biscoitos recheados sabor chocolate. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 5, n. 1, p. 19-25, 2010.

GRIMALDI, Renato. **Alternativas tecnológicas para produção de gorduras especiais**. 1999. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

HIMAVAN C.; STAROV V. M.; STAPLEY A. G. F. Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization. **Advances in Colloid and Interface Science**. v. 122, p. 3-33, 2006.

HUSSEIN, A. M. et al. Palm oil based nanofluids for enhancing heat transfer and rheological properties. **Heat And Mass Transfer**. Germany, p. 3163-3169. 29 out. 2018.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

KROSS, Kenneth A.; POTTER, Merle C. **Termodinâmica para engenheiros**. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

LEITE, Carlos Oliveira Miranda de Sousa. **Desenvolvimento de um sistema de refrigeração ambiente para uma caravana baseado num ciclo de compressão de vapor**. 2010. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

LÓPEZ, J. A. Balderas et al. Thermal characterization of vegetable oils by means of photoacoustic techniques. **Revista Mexicana de Física**, México, v. 59, n. 1, p.168-172, fev. 2013.

- LUCCAS, Valdecir. **Fracionamento térmico e obtenção de gorduras de cupuaçu alternativas à manteiga de cacau para uso na fabricação de chocolate.** 2001. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- MARTINELLI, Luiz Carlos. **Refrigeração e Ar-Condicionado Parte II: Ciclo de Compressão, Balanço de Energia, Trocadores de Calor, Dispositivo de expansão.** [20--]. 39p. Apostila.
- MISKANDAR, M.S. et al. **Quality of margarine: fats selection and processing parameters.** Asia Pac J Clin Nutr., v. 14, n.4, p. 387-395, 2005.
- MORAN, Michel et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.
- O'BRIEN, Richard D.. **Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications.** 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2004.
- ORMENESE, R. C et al. Perfil sensorial e teste de consumidor de biscoito recheado sabor chocolate. **Boletim do CEPPA**, Curitiba, v. 19, n. 2, p. 277-300, 2001.
- ÖZISIK, M. Necati. **Transferência de Calor: Um texto básico.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.a., 1990. Tradução de: Luiz de Oliveira.
- RIBEIRO, Marilene de Mori Morselli. **Comportamento de misturas binárias lipídicas na produção de micropartículas de spray chilling e sua influência na liberação de recheio hidrolífico.** 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- RODRIGUES, J. N.; ANTON, C.; GIOIELLI, L. A. Cristalização de lipídios estruturados obtidos a partir da gordura do leite e óleo de milho. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v. 39, n. 1, p.93-103, mar. 2003.
- SANTOS, Sandra Maria Lopez dos. **Resfriamento rápido de acerola por ar forçado: avaliação de parâmetros físicos, físico-químicos, sensoriais e do processo.** 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução a Tecnologia da Refrigeração e da Climatização.** São Paulo: Artliber Editora, 2003.
- SILVA, Marcelino Nascimento da. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial.** 2005. 316p. Apostila.
- STACKE, Juliani et al. Perfil de ácidos graxos no óleo de soja, após diferentes tempos de uso, no processo de fritura. **Revista Destaques Acadêmicos**, Lajeado, v. 1, n. 3, p.71-78, 06 fev. 2013. ISSN 2176-3070.
- STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração Industrial.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

WIRZ, Dick. **Refrigeração Comercial: Para Técnicos em Ar Condicionado**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

WOERFEL, John B.. Formulation of soy oil products. **Grasas y Aceites**, Sevilla, v. 46, n. 6, p.357-365, jun. 1995.

WRIGHT, Amanda J. et al. The Effect of Minor Components on Milk Fat Crystallization. **J Amer Oil Chem Soc**, Champaign, v. 77, n. 5, p.463-475, mai. 2000. ISSN 1558-9331.