



RAFAEL MATIAS CRUZ

**DISSIPADORES DE CALOR ALETADOS E APLICAÇÕES NA
INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: REVISÃO DE LITERATURA E
SIMULAÇÃO DE MODELOS COMUMENTE UTILIZADOS**

**LAVRAS – MG
2019**

RAFAEL MATIAS CRUZ

**DISSIPADORES DE CALOR ALETADOS E APLICAÇÕES NA
INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: REVISÃO DE LITERATURA E
SIMULAÇÃO DE MODELOS COMUMENTE UTILIZADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
de Lavras, como parte das
exigências do curso de Engenharia
de Alimentos para a obtenção do
título de Bacharel.

Prof. Roney Alves da Rocha
Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

RAFAEL MATIAS CRUZ

**DISSIPADORES DE CALOR ALETADOS E APLICAÇÕES NA
INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: REVISÃO DE LITERATURA E
SIMULAÇÃO DE MODELOS COMUMENTE UTILIZADOS**

**HEAT SINKERS DISPENSERS AND APPLICATIONS IN THE
FOOD INDUSTRY: REVIEW OF LITERATURE AND
SIMULATION OF COMMONLY USED MODELS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade
Federal de Lavras, como parte das
exigências do curso de graduação
em Engenharia de Alimentos para
a obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em: 29 de maio de 2019.

Prof. Dra. Bruna de Souza Nascimento, DCA/UFLA

Daniele Aparecida de Oliveira Silva, Mestranda, DCA/UFLA

**Prof. Roney Alves da Rocha
Orientador**

**LAVRAS – MG
2019**

Aos meus pais, Maria da Glória Matias Vargas Cruz e José Hilário da Cruz, por serem o alicerce dessa conquista. Por estarem sempre ao meu lado incondicionalmente sendo meus maiores incentivadores nessa caminhada.

Ao meu irmão, Elias, pelo companheirismo ao longo da vida, estando sempre ao meu lado dando forças para seguir em frente.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me conceder a força necessária para lutar todos os dias e chegar até aqui.

À Universidade Federal de Lavras, não apenas pela formação acadêmica, mas também humana.

Ao Corpo Docente do Departamento de Ciência dos Alimentos, em especial ao meu professor e orientador Roney pelos ensinamentos e orientação e a professora Roberta Piccoli por quem tenho grande carinho e admiração.

Aos meus pais, Maria da Glória e José Hilário, por me mostrarem que os sonhos podem ser alcançados quando se tem determinação e o apoio da família. Vocês nunca deixaram de acreditar no poder da educação e hoje são a base principal dessa conquista.

Ao meu querido irmão, Elias, sem você os primeiros anos na UFLA seriam bem mais difíceis. Obrigado por me incentivar nos momentos mais difíceis e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amigos de Santo Antônio do Amparo - MG que acompanharam minha trajetória desde o vestibular, em especial minha amiga Carol que mesmo de longe se fez presente durante toda a graduação. E claro aos meus amigos de Lavras, os quais foram uma segunda família durante essa maravilhosa jornada. Ana Paula, Daniele, Silas, Lethícia, Amanda Paiva, Amanda Botega, Mariane, Kelly e Franciely obrigado por se fazerem presentes durante todos esses anos.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com minha formação.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Dissipadores de calor, também conhecidos como dissipadores térmicos ou dissipadores de energia térmica são objetos metálicos de superfícies estendidas capazes de maximizar a troca de calor em um processo e/ou equipamento através da condução, convecção e radiação térmica. Existem diferentes conformações para dissipadores de calor as quais são definidas de acordo com a eficiência desejada no projeto a ser aplicado. Os dissipadores de calor apresentam grande importância na indústria de alimentos para controle de processos como forma de melhorar sua eficiência por meio de economia energética, favorecer aspectos tecnológicos e aperfeiçoar processos. O presente trabalho aborda a metodologia utilizada para construção da revisão de literatura de diferentes tipos de dissipadores de calor utilizados em processos térmicos da indústria de alimentos, das definições de transferência de calor, das equações necessárias para o estudo e análises da sua eficiência e o resultado de algumas simulações computacionais da transferência de calor nesses dispositivos utilizando o método de volumes finitos.

Palavras-chave: Transferência de calor, aletas, condução, convecção.

ABSTRACT

Heat sinks are metal objects of extended surfaces capable of maximizing the heat exchange in a process and / or equipment through conduction, convection and thermal radiation. There are different conformations for heat sinks which are defined according to the desired efficiency in the design to be applied. Heat sinks are of great importance in the food industry for process control as a means of improving their efficiency through energy saving, favoring technological aspects and perfecting processes. The present work deals with the methodology used to construct the literature review of different types of heat sinks used in thermal processes of the food industry, the definitions of heat transfer, the equations necessary for the study and analyzes of its efficiency and the result of some computational simulations of heat transfer in these devices using the finite volume method.

Keywords: Heat transfer, fins, conduction, convection.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo Geral.....	8
2.2 Objetivos Específicos.....	8
3 METODOLOGIA.....	9
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
4.1 Processos Térmicos na Indústria de Alimentos.....	10
4.2 Princípios Básicos de Transferência de Calor.....	10
4.2.1 Transferência de Calor por Condução.....	11
4.2.1.1 Lei de Fourier.....	11
4.2.2 Transferência de Calor por Convecção.....	12
4.2.2.1 Lei de Resfriamento de Newton.....	12
4.2.3 Transferência de Calor por Radiação.....	13
4.2.3.1 Lei de Stefan-Boltzmann.....	13
4.3 Números Adimensionais.....	13
4.3.1 Número de Reynolds.....	13
4.4.2 Número de Prandtl.....	14
4.4.3 Número de Nusselt.....	14
4.5 Dissipadores de Calor de Superfície Expandida.....	16
4.6 Eficiência de Aletas.....	16
4.6.1 Eficiência global de aletas.....	18
4.7 Modelagem matemática computacional da transferência de calor em aletas.....	18
4.8 Aplicações de aletas em processos industriais.....	19
4.8.1 Redução de temperatura em carcaças de motores.....	20
4.8.2 Dissipação de calor em equipamentos eletrônicos.....	21
4.8.3 Redução de calor em sistemas de refrigeração.....	22
5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	24
5.1 Aleta retangular tipo pino.....	24
5.2 Aleta anular retangular.....	26
5.3 Aleta retangular.....	28
6 CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

Para se entender o funcionamento de um dissipador de calor é preciso ter em mente uma definição básica do que é transferência de calor. A transferência de calor é definida como a energia térmica em trânsito causada por um gradiente de temperatura, sempre que houver diferenças de temperatura em um sistema, desde que as regiões com diferentes temperaturas não estejam isoladas termicamente, existirá transferência de calor.

As transferências de calor se dão em duas formas distintas, condução e radiação, tendo para cada uma delas um mecanismo físico que permite dimensionar a quantidade de energia transferida por um período de tempo através do equacionamento das taxas de transferência. Tendo ainda a convecção, que pode ser definida como a junção da condução e da radiação em um meio móvel.

A crescente expansão das indústrias de alimentos necessita cada vez mais de processos eficientes que maximizem a produção e ao mesmo tempo minimizem os gastos energéticos e o tempo de processo. Nesse cenário a utilização de dissipadores de calor auxilia na eficiência dos processamentos térmicos, no controle de temperatura de maquinários e também na dissipação de calor de equipamentos eletrônicos utilizados nas linhas de produção.

Os dissipadores de calor são formados pelo conjunto de superfícies estendidas, também chamadas de aletas, quando tem o objetivo de aumentar a taxa de transferência de calor entre o corpo sólido e o fluido que escoar ao seu redor. Quando a transferência analisada se dá no interior das aletas rege a lei para transferência de calor por condução. Já quando a transferência analisada é aquela que acontece na superfície do sólido regem as leis de convecção e radiação.

Para o estudo de novas configurações de dissipadores de calor aletados o uso de simulações computacionais permite uma análise detalhada dos processos físicos gerando economia para as empresas e facilitando a interpretação dos resultados.

O presente trabalho apresenta uma revisão de literatura dos conceitos necessários para o estudo de dissipadores de calor aletados e simulações computacionais de diferentes configurações de aletas e suas aplicações em diferentes processos industriais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de discutir o uso de dissipadores de calor aletados na indústria de alimentos por meio de uma revisão de literatura abordando os conceitos de transferência de calor e suas equações e aplicando simulações computacionais para modelos comumente utilizados.

2.2 Objetivos Específicos

- I) Discutir os principais conceitos que envolvem a transferência de calor em dissipadores de calor aletados;

- II) Dimensionar e simular alguns modelos de dissipadores de calor aletados;

- III) Discutir aplicações de dissipadores de calor aletados na indústria de alimentos e a importância do uso de simulações.

3 METODOLOGIA

Este trabalho é uma revisão de literatura e modelagem computacional, efetuada no período de dezembro de 2018 a maio de 2019. O mesmo foi desenvolvido com o apoio de pesquisas feitas em bases de dados, livros, dissertações, teses e softwares comerciais de versões acadêmicas.

A busca em bancos de dados foi feita utilizando as palavras chave em português e inglês, sendo dissipadores de calor, dissipadores térmicos, transferência de calor, *heat transfer* e *heat sinks* as mais utilizadas.

As etapas seguidas para a realização do estudo são colocadas abaixo de forma detalhada:

1º etapa: Definição do tema da pesquisa.

- Tema: Dissipadores de Calor.
- Objetivo: Descrever o assunto baseado em arquivos, livros e artigos sobre dissipadores de calor e suas respectivas aplicações.
- Palavras-chave: Dissipadores de Calor, Transferência de Calor, Indústria de Alimentos.

2º Etapa: Pesquisa na literatura e prévia seleção dos trabalhos.

- Pesquisa nas Bases de dados: Scielo, Google Acadêmico.
- Seleção: Trabalhos mais impactantes pertinentes à aplicação de dissipadores de calor na indústria de alimentos.

3º Etapa: Estudo, avaliação e montagem de um banco de dados para pesquisa.

- Leitura, contextualização e avaliação do trabalho da pesquisa;
- Organização das informações do estudo;
- Montagem do banco de dados com os trabalhos mais relevantes encontrados na pesquisa.

4º Etapa: Escrita da revisão de literatura.

- Redação do tema proposto baseada nos trabalhos encontrados.

5º Etapa: Modelagem e simulação.

- Desenho, projeto e construção das geometrias dos dissipadores de calor no AutoCAD 2018 em versão acadêmica;
- Simulação computacional de transferência de calor feitas no Ansys Workbench 19.2 versão acadêmica.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

As sessões a seguir apresentam uma revisão de literatura sobre os conceitos e equações que envolvem os diferentes tipos de transferência de calor e algumas aplicações em diferentes contextos da indústria de alimentos.

4.1 Processos Térmicos na Indústria de Alimentos

Comum na indústria de alimentos os processos térmicos tem como objetivo controlar taxas de reações químicas, inativar enzimas, garantir a segurança microbiológica do produto final, favorecer aspectos tecnológicos e contribuir com a qualidade sensorial do alimento, maximizar a eficiência de maquinários, dentre outros. A eficiência do processamento térmico pode contribuir na economia da empresa minimizando gastos de produção, ampliando a vida útil de alimentos e diminuindo o tempo de processo. (RAMASWAMY, 2005).

Dentre os principais processos térmicos estão à pasteurização, que ocorre, por exemplo, com o uso de trocadores de calor de placas (SCHUSTER, 2006), o aquecimento e resfriamento de tanques de fermentação, o controle de temperatura em reatores e o fechamento hermético de embalagens (GUMERATO, 2009).

Esses processos são governados pelos princípios básicos de transferência de calor que incluem a condução, a convecção e a radiação (RAMASWAMY, 2005).

4.2 Princípios Básicos de Transferência de Calor

A transferência de calor é definida como o transporte de energia térmica em uma área ou volume pré-estabelecidos na presença de gradiente de temperatura em um determinado intervalo de tempo. O sentido da transferência sempre ocorre do corpo mais aquecido para o corpo menos aquecido buscando, assim, um equilíbrio térmico sendo definido como fluxo. Quando o equilíbrio térmico é alcançado esse fluxo deixa de existir, encerrando a transferência de calor (INCROPERA, 2008).

Existem três formas distintas de transferência de calor. Na condução a transferência de calor acontece em meio estacionário podendo ser em um corpo sólido ou em um fluido. Para a convecção a transferência de calor irá ocorrer entre uma superfície e um fluido que escoe sobre ela quando apresentarem temperaturas diferentes. Por fim, na radiação térmica, as superfícies que não tiverem temperatura nula irão emitir energia na forma de ondas eletromagnéticas proporcionando a transferência de calor, mesmo sem o contato direto dos corpos (ÇENGEL, 2012).

4.2.1 Transferência de Calor por Condução

Na condução a transferência de energia na forma de calor é dada pela interação entre as partículas que estão em contato sempre partindo da temperatura mais elevada para a de menor temperatura, seja em um corpo sólido, líquido ou gasoso. O mecanismo da transferência de calor decorre devido à energia e agitação das partículas, ocorrendo quando há vibração dos átomos em relação ao seu ponto de equilíbrio por meio de elétrons livres (VIVALDINI, 2014).

Nos corpos sólidos, onde as partículas estão inertes, a movimentação dos elétrons livres provoca vibrações na estrutura, onde, quanto maior essa movimentação, melhor condutor térmico é o material (INCROPERA, 2008).

Quanto maior a porosidade do material menor será a condutividade do mesmo. Assim para uma melhor condutividade térmica menor deve ser a porosidade do material. A condução pode ainda ocorrer em meios gasosos por meio de colisões moleculares favorecendo a transferência de energia na forma de calor (VIVALDINI, 2014).

4.2.1.1 Lei de Fourier

A Lei de Fourier é utilizada com o objetivo de quantificar o fluxo de calor nos processos de transferência de calor por condução através da equação 1, apresentada a seguir (PIFER, 2015):

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad 1$$

Em que q''_x (W/m^2) representa o fluxo térmico da transferência de calor na coordenada x no sentido do gradiente de temperatura e k ($W/(m.K)$) é uma constante utilizada para expressar a condutividade térmica que é diferente para cada material que compõe o corpo. É importante ainda destacar o sinal negativo que acompanha a constante k na equação, ele é necessário uma vez que o calor é transferido no sentido decrescente. Já dT/dX representa a variação de temperatura do corpo ao longo do seu comprimento característico. Podendo ser expressa conforme a equação 2, em que L expressa o comprimento e $T_2 - T_1$ a variação de temperatura (INCROPERA, 2008):

$$q''_x = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad 2$$

Sendo o fluxo a taxa de variação de temperatura (q_x) por unidade de área (A) (INCROPERA, 2008), expresso pela equação 3:

$$q_x = q_x'' \cdot A \quad 3$$

4.2.2 Transferência de Calor por Convecção

Diferente da condução, a troca de calor por convecção é regida por dois mecanismos. A difusão, movimento aleatório das partículas individualmente, e o movimento global das partículas. O movimento global ocorre pela movimentação coletiva de um grande número de partículas em um mesmo sentido onde, existindo variação de temperatura, contribui para a transferência de calor (INCROPERA, 2008; ÇENGEL, 2012).

A convecção é ainda dividida em duas formas. Natural, quando não há uma força externa atuando sobre as partículas e elas se movimentam de forma espontânea e a convecção forçada. Na convecção forçada um fator externo aumenta a velocidade de escoamento do fluido aumentando conseqüentemente o choque entre as partículas e maximizando a transferência de calor. Como por exemplo o uso de um ventilador (ÇENGEL, 2012).

4.2.2.1 Lei de Resfriamento de Newton

A Lei de Resfriamento de Newton, desenvolvida através da aplicação de equações diferenciais para resolução de problemas ligados a variação de temperatura, é dada pela equação 4 (DA SILVA, 2003):

$$q_x'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad 4$$

Em que q_x'' (W/m²) é o fluxo de calor por convecção e h (W/(m².K)) o coeficiente de calor por convecção. T_s e T_∞ são respectivamente a temperatura da superfície do corpo e a temperatura da corrente do fluido que escoia sobre ele (DA SILVA, 2003).

A Lei de Resfriamento de Newton trata do fluxo de perda de calor de um corpo em razão da sua temperatura de superfície e da temperatura da vizinhança que o envolve, considerando ainda o coeficiente de calor por convecção formado na camada limite da troca de calor através da junção de variáveis como massa específica, condutividade térmica, viscosidade do fluido, velocidade de escoamento dentre outras (DA SILVA, 2003).

4.2.3 Transferência de Calor por Radiação

A transferência de calor por radiação ocorre quando uma superfície mais aquecida transfere calor para uma superfície menos aquecida através de ondas eletromagnéticas capazes de se propagar mesmo no vácuo. O mecanismo da radiação térmica é atribuído a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos, bastando apenas que o corpo esteja acima da temperatura de zero absoluto para emitir energia na forma de calor independente de seu estado físico seja sólido líquido ou gasoso (PERALTA, 2016).

4.2.3.1 Lei de Stefan-Boltzmann

A Lei de Stefan-Boltzmann determina que a energia total radiada na superfície de um corpo negro por unidade de tempo é diretamente proporcional à quarta potência de sua temperatura termodinâmica como mostra a equação 5 (INCROPERA, 2008):

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad 5$$

Em que E_b é o poder emissivo do corpo negro, σ a constante de proporcionalidade e T a temperatura absoluta do corpo (INCROPERA, 2008).

4.3 Números Adimensionais

No escoamento de fluídos sobre uma superfície os cálculos de transferência de calor por convecção dependem de números adimensionais, que indicam o tipo de escoamento e o tamanho da camada limite (INCROPERA, 2008). A seguir são apresentados aqueles de interesse nas simulações utilizadas no presente trabalho.

4.3.1 Número de Reynolds

Número de Reynolds: Equação 6.

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot X}{\mu} \quad 6$$

Em que R_e expressa o adimensional de Reynolds, ρ (Kg/m³) a densidade do fluído em escoamento, V (m²/s) a velocidade do escoamento, X (m) o comprimento característico da superfície e μ (N.s/m²) a viscosidade dinâmica do fluído. Podendo ser simplificada considerando ν (m²/s) como a viscosidade cinemática do escoamento dada pela equação 7 (ÇENGEL, 2012):

$$Re = \frac{V \cdot X}{\nu} \quad 7$$

De forma simplificada em escoamentos internos quando Reynolds apresentar valor inferior a 2100 o escoamento será de caráter laminar, já para valores acima de 2400 o escoamento será classificado como turbulento. Sendo o intervalo de 2101 e 2399 definidos como faixa de transição. Para escoamentos externos sobre uma placa lisa os valores são de $Re < 5 \times 10^5$ para escoamento laminar e $5 \times 10^5 < Re < 10^7$ para escoamento turbulento (ÇENGEL, 2012)

4.4.2 Número de Prandtl

O número de Prandtl (P_r) é uma relação entre a difusividade de momento (ν) e a difusividade térmica (α) sendo representado pela equação 8 (ÇENGEL, 2008):

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad 8$$

O adimensional de Prandtl dimensiona o tamanho da camada limite térmica e de velocidade (ÇENGEL, 2008).

4.4.3 Número de Nusselt

Os cálculos para a definição do número de Nusselt, utilizado para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, irão variar de acordo com o tipo de escoamento, interno ou externo; regime do escoamento, laminar ou turbulento; temperatura de superfície constante ou taxa de transferência de calor constante; adimensionais de Reynolds e Prandtl; e superfície do escoamento (INCROPERA, 2012).

- Escoamento Externo com Convecção Forçada:

Escoamento em placa plana em escoamento paralelo:

Quando a temperatura de superfície é constante as seguintes relações são utilizadas:

Para $Re < 5 \times 10^5$ e $P_r \geq 0,6$, Nusselt será estabelecido pela equação 9 (INCROPERA, 2012):

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,664 Re \cdot P_r^{0,33} \quad 9$$

Para $5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^8$ e $0,6 \leq P_r \leq 60$, Nusselt será estabelecido pela equação 10 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = (0,037R_e^{0,8} - 871)P_r^{0,33} \quad 10$$

Quando a taxa de transferência de calor na superfície é constante as relações são:

Para $R_e < 5 \times 10^5$, Nusselt será estabelecido pela equação 11 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = 0,453R_e^{0,5} \cdot P_r^{0,33} \quad 11$$

Para $R_e \geq 5 \times 10^5$, Nusselt será estabelecido pela equação 12 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = 0,0308R_e^{0,8} \cdot P_r^{0,33} \quad 12$$

Escoamento ao redor de uma esfera:

Para $3,5 \leq R_e \leq 80000$ e $0,7 \leq P_r \leq 380$ Nusselt será estabelecido pela equação 13 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = \frac{hD}{k} = 2 + (0,4R_e^{0,5} + 0,06R_e^{0,66})P_r^{0,4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_s}\right)^{0,25} \quad 13$$

- Escoamento Interno com Convecção Forçada:

Escoamento interno em tubos circulares:

Quando $R_e < 2300$ e a temperatura de superfície é constante Nusselt será estabelecido pela equação 14 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = \frac{hD}{k} = 3,66 \quad 14$$

Quando $R_e < 2300$ e a taxa de transferência de calor na superfície é constante Nusselt será estabelecido pela equação 15 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = 4,36 \quad 15$$

Para um tubo liso em que $R_e > 10.000$ e $0,7 \leq P_r \leq 160$ quando a relação do comprimento característico pelo diâmetro for maior que 10 Nusselt será estabelecido pela equação 16 (INCROPERA, 2012):

$$N_u = \frac{hD}{k} = 0,023R_e^{0,8} \cdot P_r^n \quad 16$$

Considerando os valores de n como 0,4 quando se tratar de um aquecimento, ou seja, a temperatura de superfície for maior que a temperatura média, e 0,3 quando a temperatura de

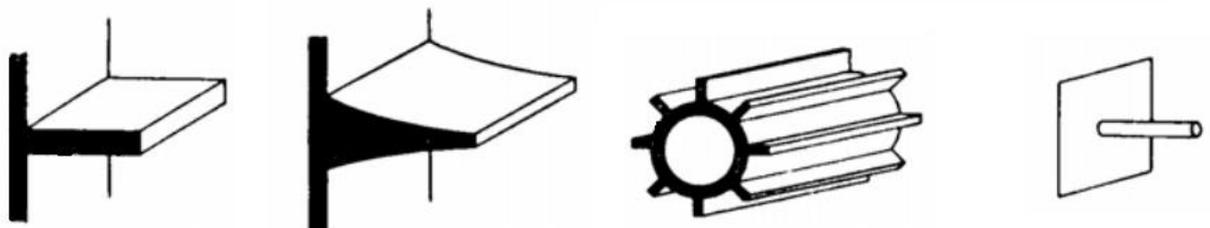
superfície for menor que a temperatura média configurando um resfriamento. Para escoamentos internos de regime turbulento o valor de Nusselt será estabelecido pela equação 17 (INCROPERA 2012):

$$N_u = 0,027R_e^{0,8} \cdot P_r^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad 17$$

4.5 Dissipadores de Calor de Superfície Expandida

As indústrias estão sempre na busca de ferramentas que lhes permitam um maior rendimento e eficiência dos seus processos, o que se aplica na busca de melhores resultados para transferências de calor. Para se aumentar a transferência de calor entre corpos é possível alterar vários parâmetros no processo, entretanto alguns deles podem influenciar negativamente, como aumento da velocidade de escoamento ou alteração da viscosidade do fluido. Com base nisso, um dos principais parâmetros que podem ser alterados sem provocar alterações nos outros componentes das equações de transferência de calor é a área superficial de troca de calor, estando ligada diretamente a transferência de calor por condução e convecção, fazendo o uso de aletas. Aletas, como pode ser observado na Figura 1, são corpos de superfícies estendidas confeccionadas em material de alta condutividade térmica e acopladas ao equipamento ou objeto que se deseja o aumento da taxa da transferência de calor e conseqüentemente o aumento de sua eficiência apresentando diferentes configurações geométricas que melhor se adequem ao fim que estão sendo utilizadas (SOUZA, 2016).

Figura 1: Aletas



A figura apresenta respectivamente: Aleta retangular reta; Aleta retangular parabólica; Aleta anular retangular; Aleta retangular tipo pino.

Fonte: Do Autor, 2019.

4.6 Eficiência de Aletas

Em uma parede plana o calor transferido da superfície para o meio ocorre através da convecção sendo desprezada a radiação ou somando sua contribuição ao coeficiente de convecção. Quando uma aleta é acoplada a essa superfície a transferência de calor para a aleta irá ocorrer por condução e então, da aleta para o meio através da convecção apresentando o mesmo coeficiente de convecção da superfície. A transferência de calor por condução provoca uma gradativa queda de temperatura na aleta à medida que se aproxima da ponta. Para a transferência de calor por convecção a queda de temperatura se dá a partir da linha de centro da aleta em direção às extremidades, entretanto como as seções transversais das aletas são geralmente muito pequenas a temperatura em qualquer seção pode ser considerada uniforme. Em um caso hipotético, onde a resistência do material seja zero, a temperatura de superfície (T_b) da parede será a mesma temperatura nas extremidades da aleta sendo a transferência de calor considerado máxima, expressa na equação 18 (ÇENGEL, 2012):

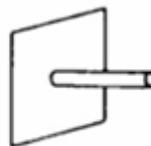
$$q_{aleta,m\acute{a}x} = h \cdot A_{aleta}(T_b - T_{\infty}) \quad 18$$

Em que $Q_{aleta,m\acute{a}x}$ é a taxa de transferência de calor ideal e T_{∞} a temperatura de corrente. Em uma situação real a temperatura irá diminuir ao longo da aleta e conseqüentemente a transferência de calor será menor, sendo expresso na equação 19 (ÇENGEL, 2012):

$$\eta_{aleta} = \frac{q_{aleta}}{q_{aleta,m\acute{a}x}} \quad 19$$

Em que η_{aleta} é a eficiência da aleta e Q_{aleta} a sua taxa de transferência de calor real. Para cada configuração as aletas irão apresentar uma eficiência variando de acordo com sua superfície. Um exemplo é aletas tipo pino retangular, representadas pela figura 2 (ÇENGEL, 2012):

Figura 2: Aleta tipo pino retangular



Fonte: Do Autor, 2019.

Tendo sua eficiência expressa pela equação 20:

$$\eta_{aleta} = \frac{\tanh.(m.L_c)}{m.L_c} \quad 20$$

Em que:

$$m = \sqrt{4h/kD} \quad 21$$

$$L_c = L + D/4 \quad 22$$

$$A_{aleta} = \pi.D.L_c \quad 23$$

4.6.1 Eficiência global de aletas

A eficiência global é utilizada para definir a transferência de calor de um conjunto de aletas juntamente com a superfície a qual elas estão fixadas sendo expressa pela equação 24 (ÇENGEL, 2008):

$$\eta_0 = \frac{q_t}{q_{m\acute{a}x}} = \frac{q_t}{h.A_t.\theta_b} = \left[1 - \frac{N.A_a}{A_t} . (1 - \eta_a) \right] \quad 24$$

Sendo $q_{m\acute{a}x}$ a transferência máxima de calor possível quando a temperatura de toda a aleta for igual à temperatura da base, η_0 a eficiência global das aletas, q_t a transferência de calor total do corpo, θ_b a angulação da aleta em relação à base e η_a a eficiência individual das aletas. Para o cálculo da área total (A_t) utiliza-se a equação 25 (ÇENGEL, 2008):

$$A_t = N.A_a + A_b \quad 25$$

Onde A_a representa a área de cada aleta individualmente multiplicando pelo número de aletas (N) em soma com a área da base (A_b). Podendo ainda ser expressa utilizando a área superficial (A_s) e a área de seção transversal (A_{tr}) através da equação 26 (ÇENGEL, 2008):

$$A_t = N.A_a + (A_s - N.A_{tr}) \quad 26$$

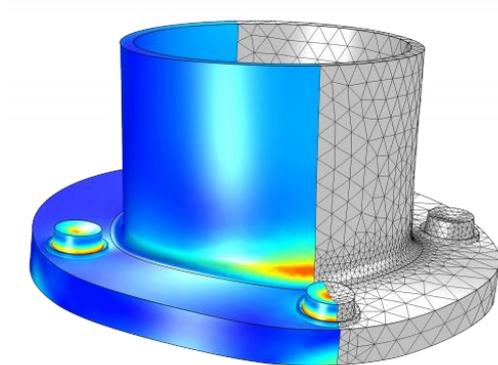
4.7 Modelagem matemática computacional da transferência de calor em aletas

As equações que governam a transferência de calor em aletas e suas diferentes conformações, assim como demais objetos planos e tridimensionais, envolvem o uso de equações com derivadas. Por se tratar de equações diferenciais parciais serão solucionados

pelo método de volumes finitos. O método consiste na decomposição do domínio em diferentes volumes de controle definidos em uma malha, adequados para simulações numéricas de diferentes tipos de leis de conservação sendo amplamente utilizado no campo da engenharia para cálculos de mecânica dos fluídos e transferência de calor. No presente trabalho as equações foram resolvidas pelo uso do software computacional Ansys Workbench 19.2 na versão acadêmica (EYMARD, 2003).

Para a realização da modelagem matemática é necessária à construção de uma geometria tridimensional apresentando o formato da aleta desejada utilizando o software AutoCAD 2018 versão acadêmica e aplicada ao software Ansys Workbench 19.2. Essa geometria é discretizada em uma malha não estruturada exemplificada na Figura 3 em que cada nó dessa malha corresponde a uma equação e uma variável. Após a resolução numérica das equações o software fornecerá os valores nodais de temperatura em todos os nós, inclusive internos, da aleta permitindo assim a avaliação da distribuição de calor sobre o corpo e a validação de sua eficiência (EYMARD, 2003).

Figura 3: Malha e geometria utilizada para análise numérica pelo método de volumes finitos



Fonte: ENSUS, 2018

4.8 Aplicações de aletas em processos industriais

As aletas são de fundamental importância para alguns processos térmicos industriais, indo além de um simples componente estrutural. O uso de aletas possibilita a construção mais compacta de trocadores de calor e contribui para o aumento da eficiência de processos. Em termos estruturais é importante que o material utilizado atenda as legislações vigentes da indústria de alimentos, seja de boa condutividade térmica e com boa durabilidade. O

espaçamento entre as aletas também é crucial para que o trocador de calor apresente o rendimento esperado, seja um evaporador ou condensador. Em termos gerais quanto maior o número de aletas maior a capacidade de troca de calor, desde que o espaçamento entre elas permita uma boa circulação de fluido contribuindo para a troca de calor por convecção. As aletas podem ainda ser aplicadas em sistemas eletrônicos de forma que ajudem a dissipar ilhas de calor nos equipamentos (FRAGA, 2013).

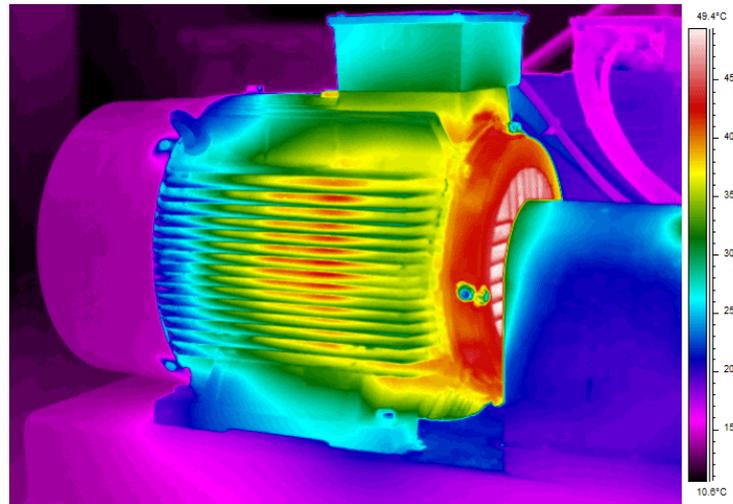
4.8.1 Redução de temperatura em carcaças de motores

Os motores elétricos utilizados na indústria de alimentos têm por objetivo transformar a energia elétrica recebida em energia mecânica. Durante o funcionamento do motor a potência fornecida na extremidade do eixo é menor que a potência absorvida na linha de alimentação. Essas perdas de potência são transformadas em calor que aquecem os enrolamentos e provocam o aumento de temperatura em seu interior. Os materiais aplicados na construção dos motores operam em uma faixa de temperatura pré-determinada por um período suficientemente longo de modo que seja compatível com a vida útil da máquina estabelecida pelo fornecedor. Aumentos na temperatura de operação resultam diretamente na diminuição da vida útil do material isolante que se resseca perdendo sua capacidade isolante e consequentemente não suportando a tensão aplicada sobre ele, o que provoca um curto-circuito no motor (VOIGDLENER, 2010).

O calor gerado no interior do motor deve ser dissipado para o ambiente através da superfície da carcaça que o envolve. A transferência de calor muitas vezes é favorecida por um ventilador acoplado no próprio motor auxiliando na convecção forçada. Além do sistema de ventilação, que quando bem projetado é capaz de movimentar o ar por toda a superfície da carcaça, o aumento da área total de dissipação favorece a eficiência do processo. Entretanto uma superfície de troca de calor muito grande, além de ocupar uma maior área na indústria, apresenta maior custo de produção. Como alternativa a área superficial pode ser aumentada com o uso de aletas incorporadas a carcaça do motor que serão responsáveis por aumentar a taxa de transferência de calor como pode ser observado na Figura 4 (VOIGDLENER, 2010).

Para se considerar o sistema de dissipação de calor eficiente ele deve conseguir extrair a maior quantidade de calor disponível por área possível, tendo uma boa transferência de calor do seu interior até as extremidades das superfícies externas. O desempenho do sistema de resfriamento é fundamental para projetos de motores. Com isso se faz necessário as análises térmicas do projeto de forma que garantam um equipamento final que atenda as necessidades do processo de forma segura e com uma vida útil elevada (VOIGDLENER, 2010).

Figura 4: Imagem termográfica evidenciando a utilização de aletas na carcaça de um motor com o objetivo de diminuir sua temperatura

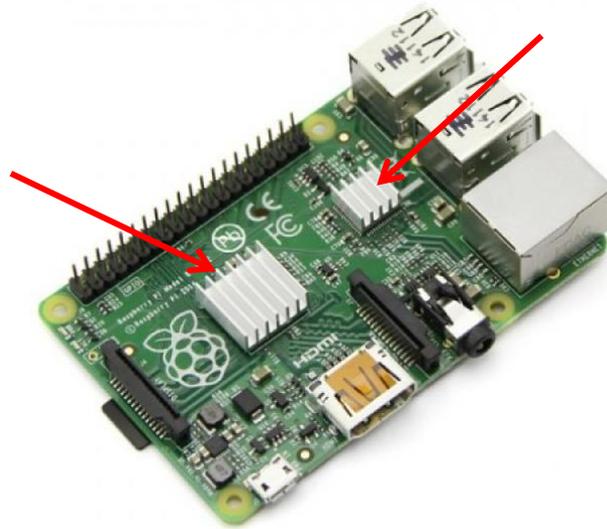


Fonte: IACT, 2016

4.8.2 Dissipação de calor em equipamentos eletrônicos

A crescente demanda por dispositivos eletrônicos para controle de processos que desempenham funções cada vez mais complexas aliadas a resultados mais eficientes e melhor desempenho têm como consequência um aumento significativo na geração de energia térmica desses dispositivos. Uma maneira de minimizar a concentração de calor nos dispositivos é o uso de aletas, a fim de evitar o comprometimento de sua integridade e funcionamento como pode ser observado na Figura 5 (QUEVEDO, 2018).

Figura 5: Uso de aletas para diminuir a temperatura de componentes eletrônicos na placa de um controlador RASPBERRY.PT



Fonte: Automatizacg, 2017

Os dissipadores de calor são de vital importância no funcionamento dos componentes eletrônicos. Tendo seu dimensionamento baseado na otimização para melhor desempenho do equipamento. O dissipador deve apresentar uma alta transferência de calor do meio interno para o meio externo evitando a geração excessiva de energia na forma de calor que pode prejudicar o sistema de maneira irreversível (QUEVEDO, 2018).

O uso de transistores, um dos principais componentes eletrônicos utilizados, deve respeitar uma faixa de temperatura determinada pelo fabricante de modo que não comprometa o funcionamento do dispositivo. Com isso se faz necessário à estabilização da temperatura através do uso de dissipadores de calor garantindo o seu funcionamento esperado. Os dissipadores atuam com base na condutividade térmica e sua refrigeração depende de parâmetros estabelecidos pela área de contato do dissipador de calor, suas dimensões, cor e variação de temperatura entre superfície e vizinhança. Para garantir o funcionamento do dissipador de calor é importante que a sua superfície esteja sempre lisa, livre de sujidades e incrustações, sem oxidação e corrosões (SOUZA, 2008).

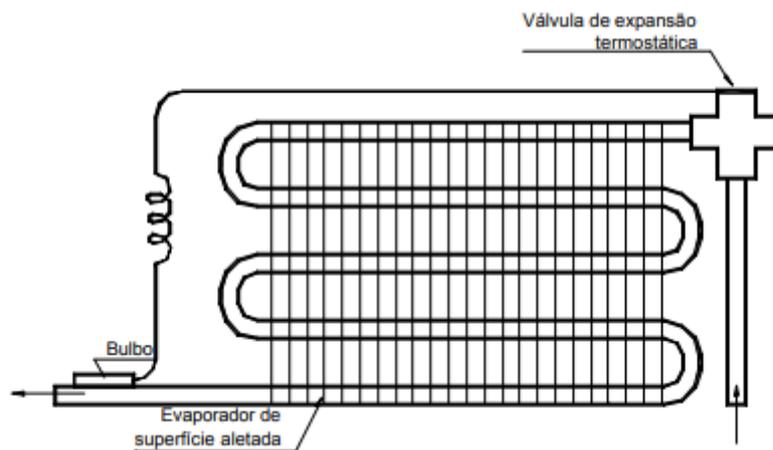
4.8.3 Redução de calor em sistemas de refrigeração

Processos de refrigeração estão presentes em diversos setores industriais e são amplamente associados a um elevado consumo de energia. Instalações eficientes exigem que os parâmetros térmicos sejam estimados com o menor consumo de energia elétrica possível. O evaporador, um dos principais componentes em um sistema de refrigeração, é um trocador

de calor no qual o líquido é vaporizado em consequência da expansão de um gás (DEITOS, 2012).

Os evaporadores são classificados de acordo com o seu tipo de superfície, sendo evaporadores de superfície primária, compostos apenas por tubos de superfície lisa, e os evaporadores de superfície estendida, vide Figura 6, que apresentam superfícies aletadas. Os evaporadores de superfície aletadas possuem a vantagem de ocuparem uma menor área, pois o uso das aletas maximiza sua área superficial de troca de calor os tornando equipamentos mais compactos sendo normalmente utilizados para a refrigeração de gases e ar (BUENO, 2004).

Figura 6: Utilização de aletas ao redor dos tubos de condução do fluido de refrigeração em um evaporador que compõe um sistema de refrigeração



Fonte: BUENO, 2004

A instalação das aletas deve ocorrer de forma que garanta um bom contato térmico com os tubos garantindo sua eficiência. As aletas podem ser soldadas diretamente na carcaça ou colocadas nos tubos e expandidas com o uso de pressão (DEITOS, 2012). As aletas devem obedecer a um espaçamento no tubo que varia de acordo com as suas dimensões e a faixa de temperatura em que o evaporador opera, podendo estar distribuídas em um intervalo de 39 a 550 aletas por metro (BUENO, 2004).

Há ainda uma relação entre as superfícies do evaporador. Como as aletas externas influenciam apenas na superfície externa um elevado número de aletas instaladas pode não aumentar a capacidade do evaporador. Em alguns casos o grande número de aletas pode reduzir a sua capacidade por restringir a passagem de ar entre elas e sobre o tubo diminuindo a eficiência da troca de calor por convecção (DEITOS, 2012). Quando a corrente de ar sobre

os tubos e aletas acontece de forma natural é importante que o sistema ofereça menor resistência ao fluxo de ar, com isso o espaçamento entre as aletas para convecção natural deve ser consideravelmente maior que o espaçamento quando há convecção forçada (BUENO, 2004).

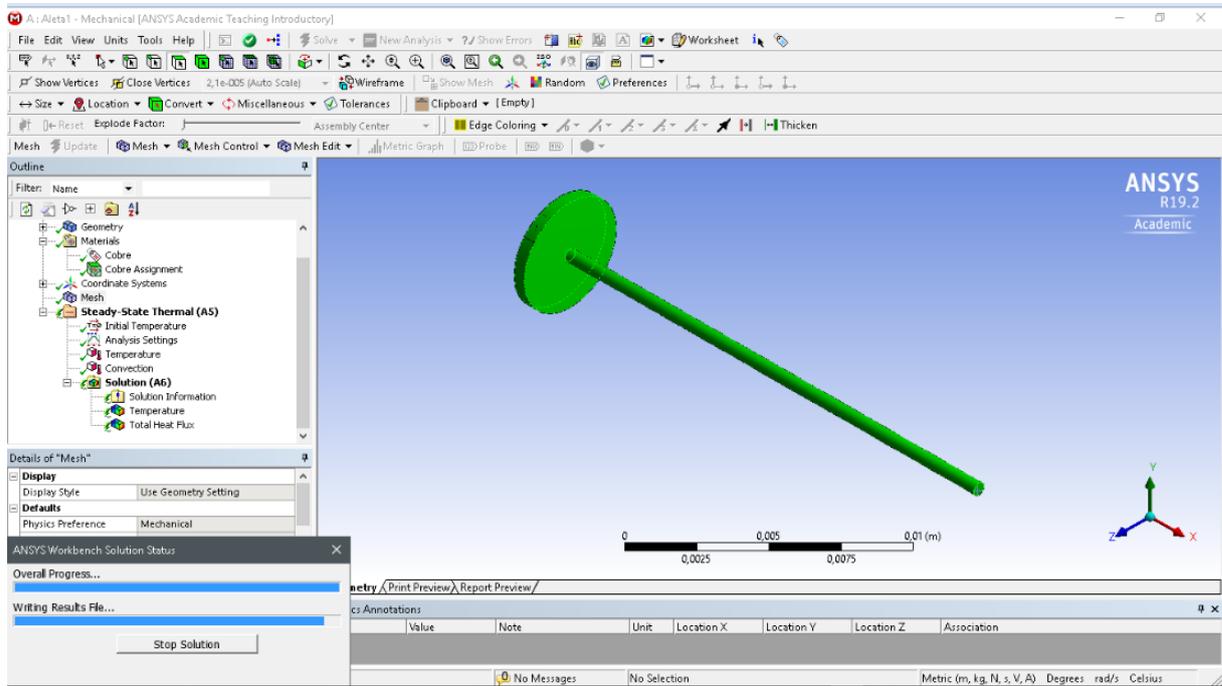
5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Nas sessões a seguir são apresentados os resultados de simulações computacionais de aletas, feitas com o auxílio do software Ansys Workbench 19.2 versão acadêmica e AutoCad 2018 versão acadêmica. Os modelos foram projetados a partir de exemplos descritos no livro Fundamentos de Transferência de Calor e Massa de Incropera, F.P. e as simulações realizadas em estado estacionário.

5.1 Aleta retangular tipo pino

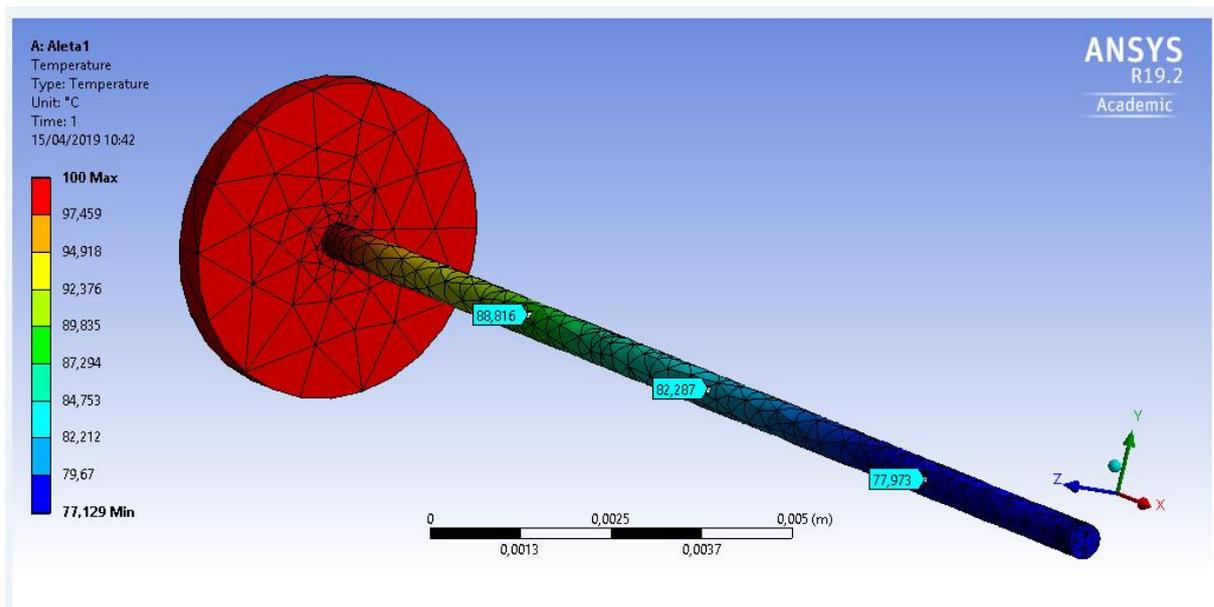
O modelo apresenta a simulação para uma aleta tipo pino retangular com 20 centímetros de comprimento e 20 milímetros de diâmetro, produzida em cobre e fixa em uma superfície a 100 °C. Para as condições de simulação foram considerados a temperatura ambiente de 25 °C, um coeficiente convectivo de 100 W/m².K e adotado um sistema de condutividade térmica isotrópica, ou seja, possui as mesmas propriedades em todas as direções no interior da aleta. O resultado pode ser observado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7: Projeto tridimensional de uma aleta retangular tipo pino em processo de criação da malha para análise por meio do método de volumes finitos



Fonte: Do autor, 2019

Figura 8: Simulação computacional da distribuição de calor ao longo de uma aleta retangular tipo pino utilizando o método de volumes finitos

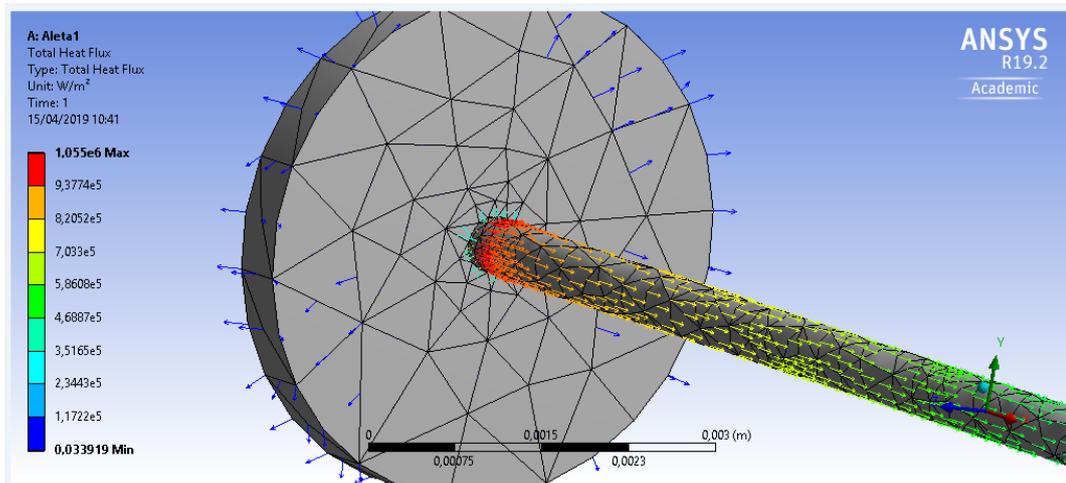


Fonte: Do autor, 2019

A região de maior temperatura é observada na região vermelha da imagem, sendo a temperatura máxima de 100 °C. Ao longo do corpo da aleta é possível observar a variação de temperatura resultante da transferência de calor por condução e convecção através da transição de cores do vermelho para o azul na figura 8. Nas condições apresentadas houve uma queda de aproximadamente 22,87 °C na temperatura da aleta, tendo na sua extremidade representada pela cor azul à temperatura de 77,13 °C. Os cálculos para a variação de temperatura foram realizados para cada nó da malha, representada em preto na figura 8, para obtenção do resultado final. Na resolução numérica apresentada não foi possível a utilização de uma malha refinada devido a restrições do uso do software Ansys Workbench 19.2 em sua versão acadêmica, que possui limite para o número máximo de nós.

Através do software Ansys Workbench 19.2 foi avaliado o sentido do fluxo de calor por condução apresentado na figura 9. A região de maior fluxo de calor foi identificada na base da aleta em contato com a superfície apresentando $1,055 \times 10^6$ W/m² enquanto a extremidade de menor temperatura apresenta um fluxo de $0,03391 \times 10^6$ W/m².

Figura 9: Simulação computacional e representação gráfica vetorial de fluxo de calor ao longo de uma aleta retangular tipo pino



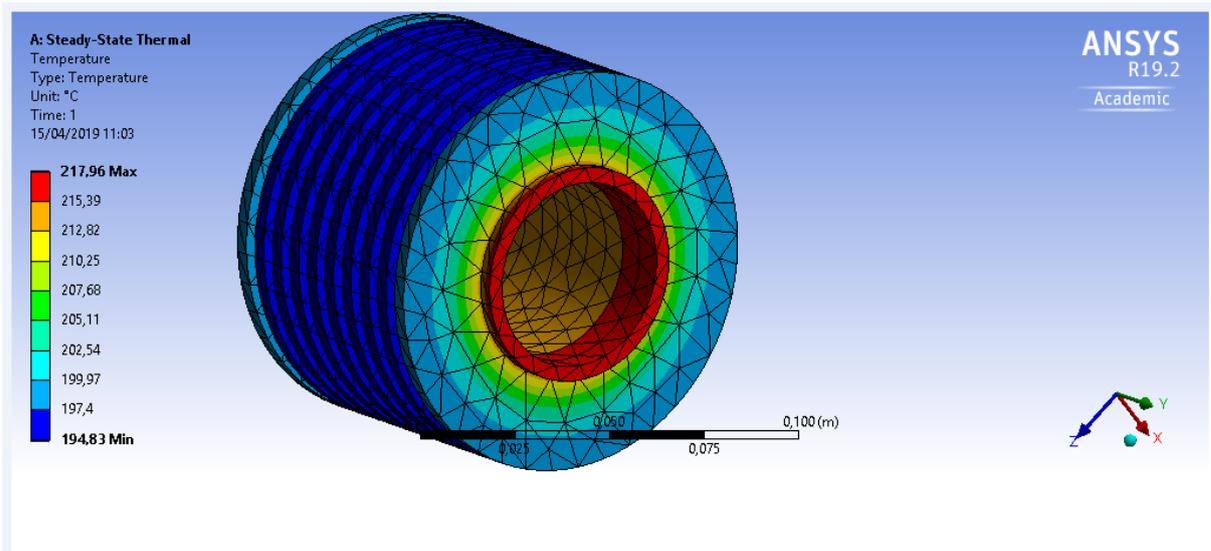
Fonte: Do autor, 2019

5.2 Aleta anular retangular

Para a simulação de um conjunto de aletas anulares retangulares foi considerado um eixo de motor com aletas construídas em liga de alumínio com uma altura de 100 mm e diâmetro externo de 50mm. Dez aletas anulares foram fundidas ao cilindro com espaçamentos iguais e uma espessura de 4 mm com comprimento de 20 mm. Para as condições do ambiente

foi considerada uma temperatura de 25 °C e a temperatura do ar sob o motor de 300 K e um coeficiente de convecção de 75 W/m². A taxa total de calor na saída do eixo foi aproximado para 2 kW. O projeto foi então desenhando em AutoCad 2018 na versão acadêmica e analisado pelo Ansys Workbench 19.2 em versão acadêmica. As figuras 10 e 11 mostram a distribuição térmica das superfícies após simulação.

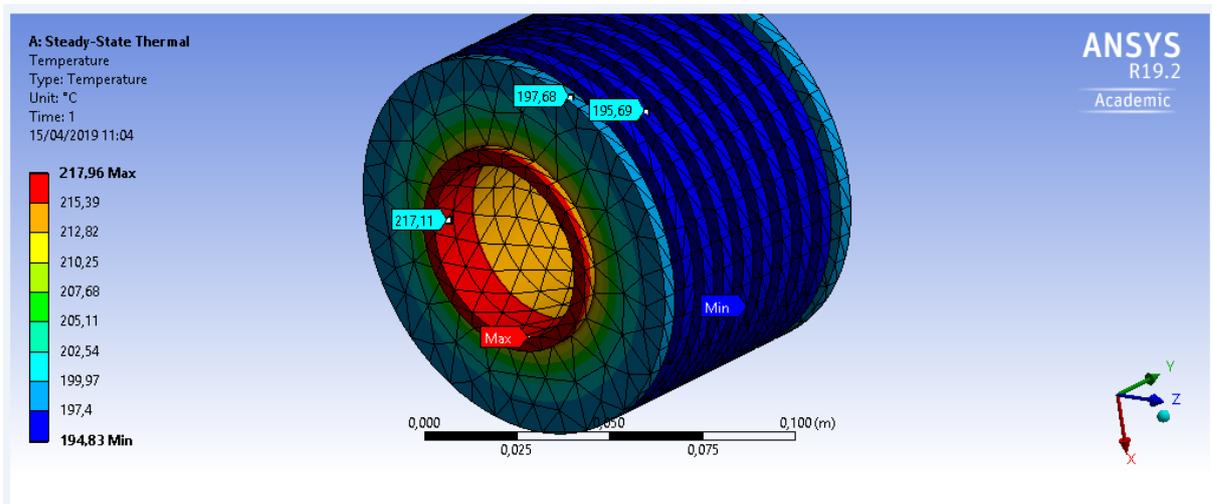
Figura 10: Distribuição radial de temperaturas em um conjunto de aletas alunares retangulares



Fonte: Do autor, 2019

A região de maior temperatura está localizada no interior do cilindro registrando aproximadamente 217,96 °C e a de menor temperatura na extremidade externa das aletas sendo de aproximadamente 194,83 °C. Uma variação de 23,13 °C ao longo do comprimento das aletas. Pela simulação é possível observar que não ocorreram variações na distribuição de temperatura entre o conjunto de aletas independente de sua posição. A malha para análise dos dados não pode ser refinada em função do limite de nós no uso da versão acadêmica do software Ansys Workbench 19.2. Na figura 11 é possível observar a região de maior temperatura indicada pela cor vermelha no interior do cilindro e a de menor temperatura indicada pela cor azul na região mais externa das aletas.

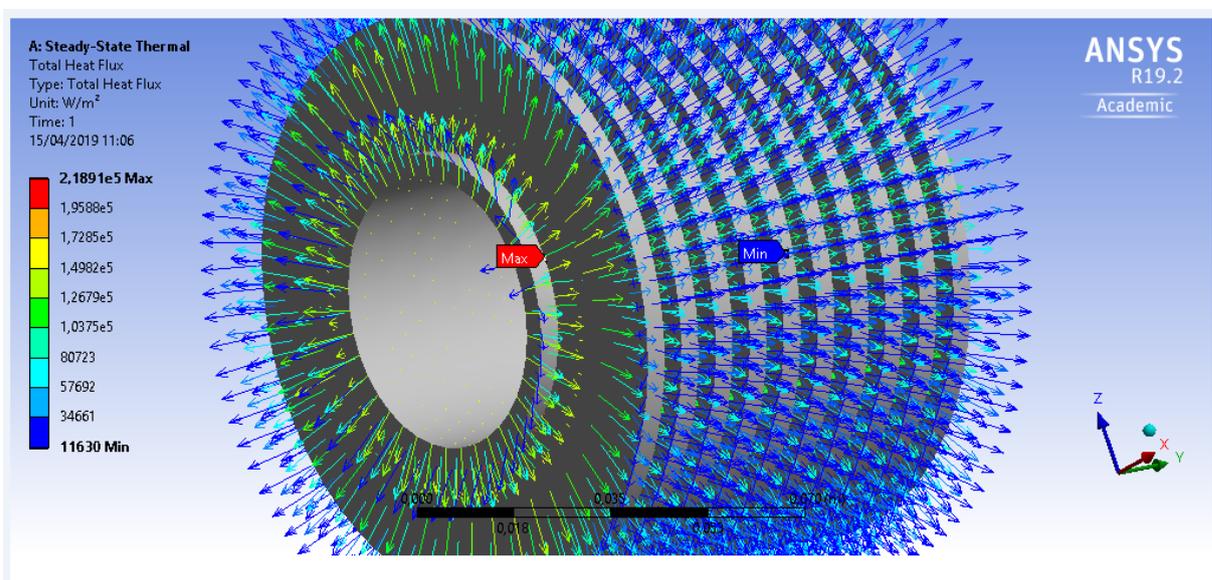
Figura 11: Indicação dos pontos de temperaturas mínimo e máximo



Fonte: Do autor, 2019

O fluxo total de calor apresenta maior intensidade na base do cilindro em contato com as aletas indicado na figura 12 com um fluxo de $2,189 \times 10^5$ W/m². A região de menor fluxo está localizada na extremidade externa das aletas ao centro com um fluxo de 11630 W/m².

Figura 12: Fluxo total de calor em aletas anulares retangulares



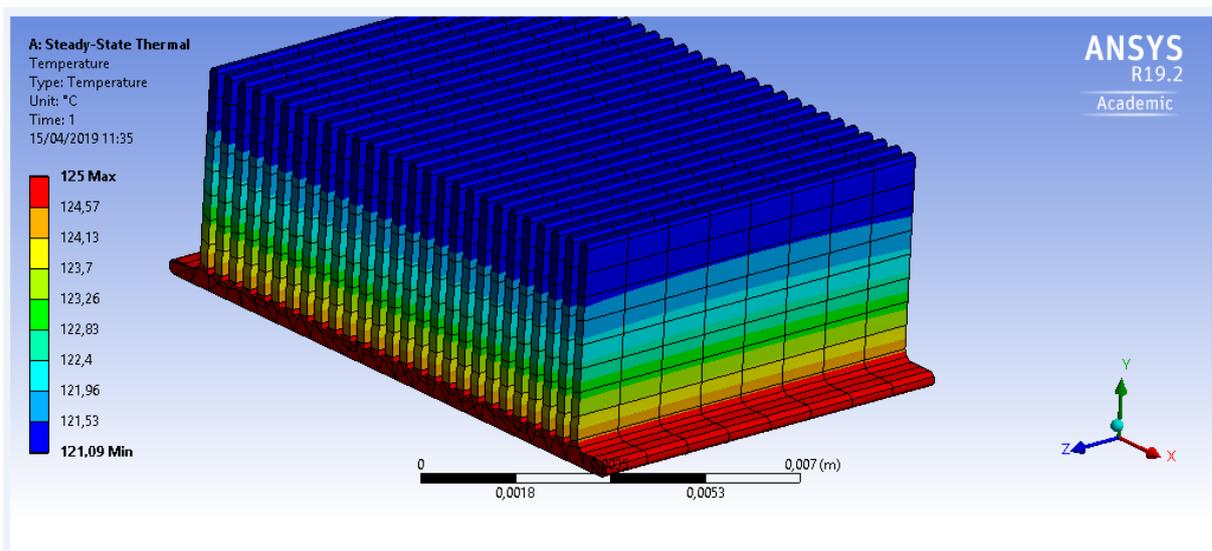
Fonte: Do autor, 2019

5.3 Aleta retangular

A simulação foi realizada em um conjunto de 27 aletas igualmente espaçadas sobre uma superfície de 216 mm tendo cada aleta uma espessura de 4 mm e 20 mm de altura e 100

mm de comprimento. No software as aletas foram definidas como sendo de cobre e instaladas em uma base a 125 °C. O coeficiente convectivo foi definido como 398 W/m².K. Para o ambiente foi considerado uma temperatura de 14 °C impulsionada por um ventilador com coeficiente convectivo de 150 W/m².K. A condição de simulação é para condição de condutividade isotrópica no interior da aleta com os resultados observados na Figura 13. Ao longo dos 20 mm das aletas é possível observar uma variação de temperatura de 3,91 °C estando a região de menor temperatura na extremidade das aletas com temperatura aproximada de 121,09 °C.

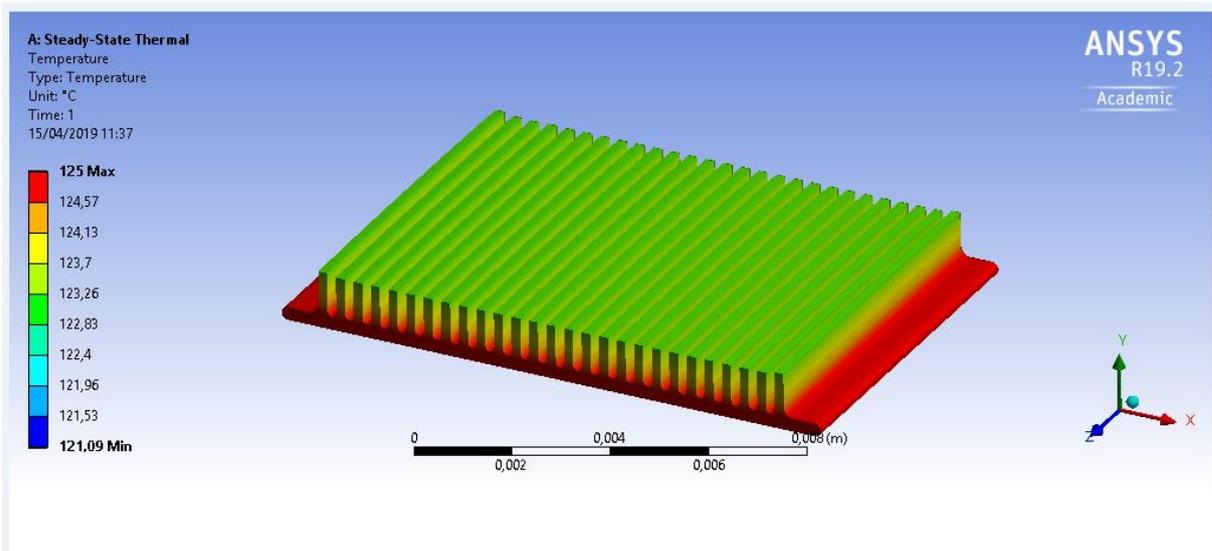
Figura 13: Distribuição de temperatura em um conjunto de aletas retangulares



Fonte: Do autor, 2019

O software Ansys Workbench 19.2 permite uma avaliação do conjunto de aletas através de *isosurface*, superfície na qual a temperatura é constante, que consiste em cortes ao longo das aletas possibilitando a observação de dados em um ponto específico. Os mesmos podem ser observados na figura 14.

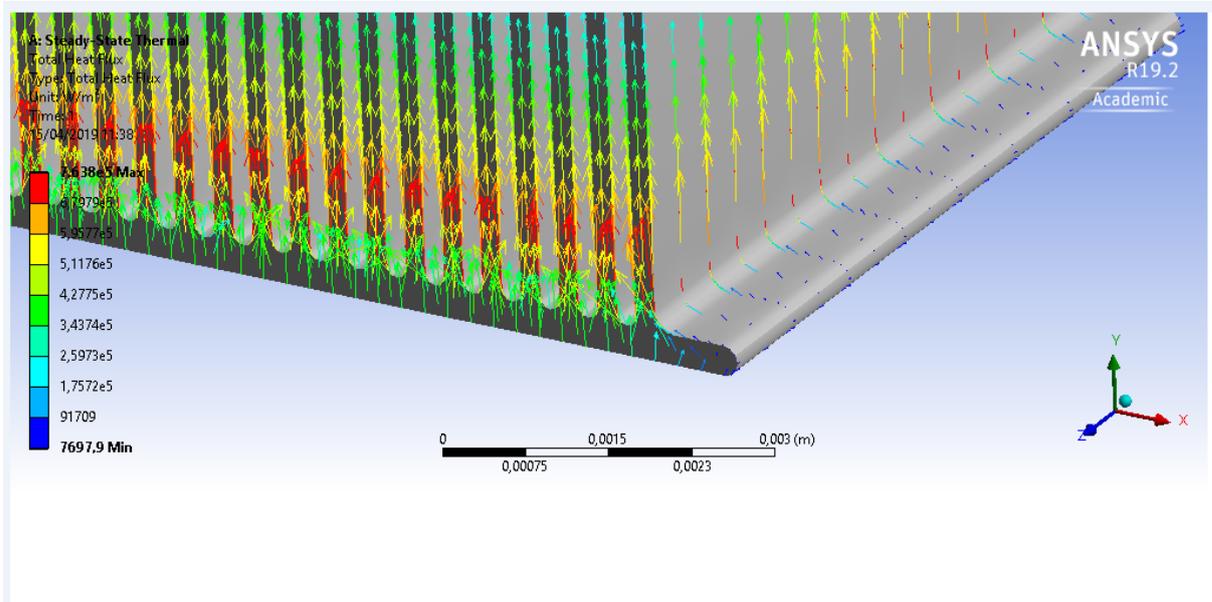
Figura 14: Distribuição de temperatura com corte das aletas em isosurface



Fonte: Do autor, 2019

O fluxo total de calor possui maior intensidade acima da região parabólica de junção da base com as aletas onde apresenta um valor de aproximadamente $7,638 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ e de menor intensidade nas extremidades das aletas onde apresenta um valor de $7697,9 \text{ W/m}^2$ indicado respectivamente pelas setas em vermelho e azul na figura 15.

Figura 15: Fluxo total de calor em um conjunto de aletas retangulares



Fonte: Do autor, 2019

6 CONCLUSÕES

O uso de dissipadores de calor aletados auxilia na melhoria da eficiência térmica em processos industriais tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento de produtos, matéria prima ou equipamentos. A capacidade de troca de calor pode ser melhorada pela combinação entre o material utilizado para confecção das aletas, sua configuração geométrica, espaçamentos e utilização de convecção forçada.

A simulação computacional permite o desenvolvimento de protótipos virtuais que reproduzem a realidade com um menor gasto de matéria prima e tempo garantindo a confiabilidade dos resultados por permitir uma avaliação detalhada da distribuição de calor por toda a superfície do dissipador de calor. A simulação permite ainda executar rapidamente quaisquer alterações no projeto sem que haja aumento considerável em seu custo antes da construção física do protótipo final.

No ambiente acadêmico o uso de projetos que agreguem o uso de simulação tem grande capacidade para desenvolver o interesse de discentes por projetos de engenharia que favoreçam o desenvolvimento das indústrias de alimentos dentre outros setores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUTOMATIZACG, 2017. Produtos. Disponível em: <<http://automatizacg.com/shop/kit-dissipador-de-calor-autoadesivo-raspberry-pi-3-pi-2-b-e-b-em-aluminio-3-unidades>>. Acesso: 10/04/2019.
- BUENO, S.S. **Modelagem do escoamento ao longo de evaporadores de serpentina com tubos aletados**. 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2004.
- ÇENGEL, Y.A. ; GHAJAR, A.J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. Porto Alegre: AMGH, 4ª ed. 2012, 415p.
- DA SILVA, W.P. ; PRECKER, J.W. ; SILVA, C.M.D.P.S. ; SILVA, D.D.P.S ; SILVA, C.D.P.S. Medida de calor específico e lei de resfriamento de newton: Um refinamento na análise dos dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 25, n. 4, p. 392 – 398, 2003.
- DEITOS, D. **Estudo experimental do desempenho de uma nova geometria de tubos para evaporadores de túneis de congelamento**. 2012. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2012.
- ENSUS, 2018. Disponível em: <<http://ensus.com.br/como-simular-unioes-parafusadas/>>. Acesso: 07/04/2019.
- EYMARD, R. ; GALLOUËT, T. ; HERBIN, R. **Finite Volume Methods**. Université de Paris XIII, Marne-la-Vallée. 2003. 253 p.
- FRAGA, F.F. ; CARVALHO, G.C. ; OLIVEIRA, T.F. Transferência de calor aplicada a prototipagem rápida por deposição de metal em camadas sucessivas utilizando soldagem 3D. **Soldag. Insp**. v. 18, n. 4, p. 302 -313, 2013.
- GUMERATO, H.F. ; SCHMIDT, F.L. Introduzindo o conceito de F_o crítico no processamento térmico em batelada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 29, n. 4, p. 847 – 856, 2009.
- IACT, 2016. Disponível em: <<http://iactthermography.org/>>. Acesso: 10/04/2019.
- INCROPERA, F.P. ; DEWITT, D.P. ; BERGMAN, T.L. ; LAVINE, A.S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª ed. 2008, 656p.
- PERALTA, L. ; REGO, F. Detecção da radiação térmica emitida por um filamento de tungstênio aquecido. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 38, n. 1, p.1503, 2016.
- PIFER, A. ; AURANI, K.M. A teoria analítica do calor de Joseph Fourier: Uma análise das bases conceituais e epistemológicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 37, n. 1, p. 1603, 2015.
- QUEVEDO, T.L. **Estudo teórico-experimental de um dissipador de calor para uso em fontes LED RGB por meio de análise de materiais, geometrias e simulações computacionais**. 2018. 117p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2018.

RAMASWAMY, H. ; MARCOTTE, M. Food processing: Principles and applications. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**. v. 42, n. 2, p. 420, 2005.

SCHUSTER, C. ; GONZALEZ, H.L. ; BÜCHLE, J. ; TIMM, C.D. Avaliação de equipamento alternativo para pasteurização lenta de leite previamente envasado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 26, n. 4, p. 828 – 831, 2006.

SOUZA, T.M. **Análise de dissipadores de calor com filmes de diamante CVD**. 2008. 59p. Tese (Título de professor livre docente em Materiais Elétricos) – Universidade Estadual Paulista “ Júlio de Mesquita Filho”, 2008.

SOUZA, D.A.C. ; GÓMEZ, L.C. ; SILVA, J.A. ; CAMPOS, J.C.C.C. Application of optimization for improvement of the efficiency of louvered-fin compact heat exchangers. **REM - International Engineering Journal**. v. 69, n. 3, p. 309 – 316, 2016.

VIVALDINI, D.O. ; MOURÃO, A.A.C. ; SALVINI, V.R. ; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Cerâmica**. v. 60, n. 354, 297 – 309, 2014.

VOIGDLENER, T. **Desempenho térmico de motores elétricos de indução**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.