

## DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR COM A REUTILIZAÇÃO DO AR QUENTE DE DIGESTORES

Marcos Junior da Silva<sup>1</sup>  
Rodrigo Konrath<sup>2</sup>

### RESUMO

O presente trabalho tem por objeto o dimensionamento de um trocador de calor com a reutilização do ar quente de digestores. Investigando a possibilidade de reutilização do ar, para que não haja danos ao trocador, pois o ar quente é constituído por gases gerado no cozimento de dejetos. Foram analisadas as buscas em teses e dissertações como aprofundamento de conhecimento dos equipamentos mencionados, descrevendo quais são os tipos e componentes existentes, esclarecendo as diferenças dos mesmos. Buscaram-se informações de um digestor existente na indústria onde coletamos dados para a inicialização de operações matemática. Como resultado, é desenvolvido uma base de cálculos concretos do dimensionamento de um trocador do tipo tubo duplo, descrevendo a possibilidade de reaproveitamento do ar quente, como forma de economia nas indústrias de abatedouros e graxarias. O comprimento do tubo dimensionado encontra-se de tamanho excessivo devido a temperatura do ar quente ser baixa. Para as empresas que possuem área de construção menor, para as mesmas condições de temperatura, o dimensionamento de um trocador de calor de casco e tubo é mais viável.

**Palavras-chaves:** Trocador de calor. Ar quente. Digestor. Reaproveitamento.

### 1 INTRODUÇÃO

Calor para a física representa uma forma de energia, sendo que a movimentação entre partículas atômicas gera energia térmica. Quanto maior a energia térmica, maior será a temperatura de um objeto em condições isoladas. Sendo assim, pelo fato de ser a energia térmica em movimento adotou-se o nome de transferência de calor, usado tanto de um corpo para outro, ou de um fluido para outro. Com essa energia em movimento foram construídos os trocadores de calor, que são equipamentos bastante usado para implementar a troca de calor entre os fluidos em temperaturas diferentes.

Para os trocadores de calor não existe limite para a criação de suas geometrias, portanto em muitos casos acabam se tornando padrões para cada atividade de ramos diferentes. Podemos classificar os equipamentos de diversas maneiras quanto ao modo de troca de calor, quanto ao número de fluidos, tipo de construção, etc.

São dispositivos de muita importância na área da engenharia, com desenvolvimento de várias características e modelos em diversos campos nas indústrias, usados em aplicações domésticas, como geladeiras e ar condicionados que são bem comuns em nosso dia-a-dia.

---

<sup>1</sup>Acadêmico de Engenharia Mecânica da UCEFF - E-mail: marcos\_0717@hotmail.com

<sup>2</sup> Docente da Engenharia Mecânica da UCEFF - E-mail: konrath@uceff.edu.br

Tendo em vista um maior conforto para o funcionário exposto a condições muitas vezes insalubres o uso de trocadores de calor serve como exemplo na qualidade de vida no decorrer do tempo, com isso muitas empresas ganham em tempo e produção. Os trocadores de calor estão cada vez mais sofisticados, tanto em sua eficiência energética quanto a seu material de fabricação. Atualmente os trocadores mais usados nas indústrias são os trocadores de casco e tubo, trocadores de placas e trocadores de placas aletadas.

Sendo que os trocadores de calor são bastante úteis nas empresas, procuram-se soluções de otimização destes equipamentos para que possam fazer o trabalho onde antes existiam mais despesas para seu funcionamento. Nos dias de hoje, os trocadores são muito comuns, sendo que foram projetados para fazer a troca de calor, mas também proporcionar o reaproveitamento da energia térmica existente nos fluidos, assim sendo que ao conservar a energia os trocadores transformam-se em ferramentas importantes para a preservação do meio ambiente.

Considerando a importância deste estudo para a área da Engenharia Mecânica e para nós como futuros profissionais na busca de projetos, **é possível o dimensionamento de um trocador de calor que possui a reutilização do ar quente de digestores para aperfeiçoamento e melhoria dos sistemas?** Busca-se estudar o assunto para trazer melhorias e benefícios satisfatórios às empresas. Assim, analisado o ar quente dos digestores, verificar se podem os mesmos ser reaproveitados. Em seguida, ver se é viável fazer este reaproveitamento sem que haja danos no equipamento, diferenciando as vantagens e desvantagens.

Deste modo nos processos industriais existem trocadores de calor de geometrias, características e processos diferentes, sendo assim o objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um trocador de calor onde seu funcionamento para o aquecimento da água será através da reutilização do ar quente que é gerado pelos digestores da empresa, onde eram desaproveitados, ou seja, eliminado a céu aberto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pelo fato da sociedade humana estar em desenvolvimento, as suas necessidades sofrem gradativo aumento. Alimento, moradia, água e energia, por exemplo, são necessidades gerais para as nações ao redor do mundo. Quando o assunto é energia, para se ter sua disponibilidade necessitamos de investimentos frequentes do governo para agradar as necessidades das indústrias e dos consumidores. Isso ocorre apesar de estudos e pesquisas em fontes de energia,

onde muitos trabalhos foram desenvolvidos e orientados para economizar energia por meio de melhorias em seu uso.

A crescente competitividade entre as indústrias de processamento tem incentivado a otimização de processos e desenvolvimento de novos equipamentos com o objetivo de redução de custos operacionais. Quando é falado em conservação de energia, essas inovações ganham uma atenção especial nas indústrias, sendo que isso acarrete na minimização de custos fixos e operacionais e a maximização dos processos (GUT, 2012).

Em todos os métodos de se obter energia ocorre um processo chamado transferência, onde o trabalho executado é transformado em energia, seja cinética, mecânica ou potencial, neste caso potencial onde é usado energia térmica (calor) para aquecimento de fluidos nas áreas industriais utilizados para outros fins. Sendo assim, a transferência de calor é uma fração de energia que pode ser transferida de um corpo a outro quando há uma diferença de temperatura, sendo que a energia térmica em trânsito é chamada de calor.

Para os estudos da termodinâmica, trata-se apenas da quantidade de calor transferido em um sistema quando ele muda em um processo, de seu estado de equilíbrio para outro, enquanto que para a ciência da transferência de calor é a taxa de transferência de calor que é a principal área de conhecimento e avaliação de transferência de energia em equipamentos (ÇENGEL E GHAJAR, 2012).

Existem três formas de transferência de calor, condução convecção e radiação, sendo que para a primeira, o processo de transferência de energia é através de um meio material, onde a energia térmica se espalha, assim fazendo o processo de propagação do calor. Esse processo ocorre em sólidos, líquidos ou gases. Com base nessas condições o fluxo de calor por condução ocorre devido aos impactos intermitentes em uma substância, gerando imediatamente a transferência de energia cinética.

Assim Moran *et al* (2013), expressa que quando existir um gradiente de temperatura em meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, utilizamos o termo condução para nos referirmos à transferência de calor que irá ocorrer através do meio. Do mesmo modo, Moran *et al* (2013) ainda nos diz que a construção física da condução envolve os conceitos de atividade atômicas e molecular, que alimenta a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas que possuem menor energia de uma substância devido às relações que existem entre as partículas.

No processo de condução, a equação da taxa térmica é dada pela lei de Fourier, que para uma parede plana unidimensional com distribuição de temperatura  $T(x)$ , conforme Moran *et al* (2013), a equação do fluxo térmico é representada na forma abaixo.

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

Como o fluxo térmico é a taxa de transferência de calor por unidade de área, em condições de estado estacionário e com temperatura linear, o gradiente de temperatura pode ser representado em forma de taxa (MORAN *et al*, 2013).

$$q''_x = -k \frac{dT}{dX} \quad (2)$$

Na segunda forma temos a convecção que ocorre quando há líquidos e gases em escoamento sobre uma superfície com diferença de temperatura entre eles, assim fazendo a transferência de energia. A convecção existe de dois modos: a natural, onde não existe ação externa e o fluido escoar naturalmente pelo efeito dos fluidos se expandirem quando aquecidos a pressões constantes; e a forçada que contém ações externas aplicadas, podendo serem mecânicas (ventiladores) ou naturais (força dos ventos).

Na mesma linha de raciocínio, Moran *et al* (2013) coloca que o termo convecção trata-se da transferência de calor que irá acontecer entre uma superfície e um fluido estacionário ou em movimento quando tem-se a diferença de temperaturas entre eles. Também nos diz que a transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além da transferência de energia através do movimento molecular aleatório, a energia é transferida também pelo movimento global do fluido.

De mesmo modo, Incropera *et al* (2008) refere-se que o método de transferência de calor por convecção é abrangente em dois dispositivos, pois além de transferência de energia devido ao movimento molecular, também a energia é diferida através do movimento global do fluido. Este tipo de movimento está associado à qualquer instante com um grande número de moléculas está se deslocando de forma adjunta.

Assim, a taxa de transferência de calor por convecção é demonstrada segundo Moran *et al* (2013) pela lei do resfriamento de Newton.

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Moran *et al* (2013), também descreve que para o fluxo térmico temos a seguinte equação.

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

Moran *et al* (2013), esclarece que a equação para o balanço térmico é descrita como:

$$Q = \dot{m} * c_{p_{Aq}} * \Delta T \quad (5)$$

## 2.1 TROCADORES DE CALOR

Trocadores de calor são equipamentos usados para fazer o processo de aquecimento e/ou resfriamento de dois ou mais fluidos. Os fluidos podem estar separados por uma parede sólida que evita a mistura ou estarem diretamente em contato. Esses equipamentos são bastante utilizados nas indústrias, para fazer o aquecimento e condicionamento de ambientes, recuperadores de calor, processos químicos entre outros. Desta forma, os trocadores de calor podem ser definidos, de forma mais restritiva, como equipamentos não sujeitos a chamas, onde dois ou mais fluidos realizam troca de calor (SABINO, 2008).

Esses equipamentos possuem um campo de aplicação muito abrangente, desta forma os encontramos em equipamentos domésticos que são tradicionais e nos mais difíceis e aprimorados equipamentos industriais (PERUSSI, 2010).

Neste sentido é onde os projetos de engenharia ganham espaço, onde os mesmos são projetados para trazerem economia para as empresas reutilizando materiais e transformando-os em benefícios. Também complementa Kreith e Bohn (2011), o trocador de calor é um dispositivo no qual o calor é transferido entre uma substância quente e uma substância mais fria, geralmente fluidos.

Do mesmo modo, Godoy (2008) nos diz que os trocadores de calor são encontrados nas mais abundantes aplicações pelo mundo, desde as primeiras indústrias em seus estágios de desenvolvimento até as etapas dos processos atuais, sempre adquiriram o uso bastante extensivo desses equipamentos nos sistemas. Como são utilizados para aquecimento ou resfriamento de líquidos, para a manutenção de temperaturas em máquinas, para estocagem de alimentos e muitas outras aplicações, destaca-se o uso dos trocadores de calor na área de conforto térmico, especialmente quando voltadas para o aquecimento e resfriamento de ar.

Dentro de todo o contexto de trocadores de calor, sabe-se que existem diversos equipamentos e processos, assim determina o processo de transferência que o equipamento irá trabalhar, para a elaboração de projetos. Desta maneira, os equipamentos possuem classificações conforme seu processo de transferência e de acordo com o seu tipo de fabricação.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são separados conforme seu processo de transferência de calor, que de acordo com estudos e pesquisas têm-se apenas dois tipos, os trocadores de contato direto e os trocadores de contato indireto. Os trocadores de contato indireto são trocadores que fazem a transferência de calor entre dois fluidos, mas separados por uma parede, onde nesta parede o calor é transferido continuamente até a temperatura que se deseja obter (INCROPERA *et al*, 2008).

Assim, Kreith e Bohn (2011) explicam sobre os tipos de trocadores de calor de contato indireto: o primeiro são os recuperadores, que nesse tipo de trocador de calor, o fluido quente e frio são separados por uma parede, e o calor é transferido por meio de uma combinação de convecção a partir da parede e de condução através da parede. O segundo são os regeneradores, onde os fluidos quente e frio ocupam alternadamente o mesmo espaço no núcleo do trocador. O núcleo do trocador ou matriz serve como dispositivo de armazenagem de calor que, periodicamente aquecido pelo fluido mais quente, transfere o calor para o fluido mais frio.

Nos trocadores de contato direto, os fluidos quente e frio entram em contato direto. Exemplo de tal dispositivo é uma torre de refrigeração, na qual um jorro de água cai do topo da torre e entra em contato direto com um fluxo de ar ascendente, que o resfria. Outros sistemas de contato direto utilizam líquidos imiscíveis ou troca de sólido para gás (KREITH e BOHN, 2011).

Ou seja, os trocadores de calor de contato direto, são trocadores que comprometem a transferência de calor entre duas correntes, as frias e as quentes, onde todo esse processo ocorre na ausência de uma parede de separação das correntes. A grande maioria desses equipamentos de contato direto tem como princípio de funcionamento o escoamento, onde entra vapor na forma de calor e o líquido de resfriamento em forma de gotas, spray ou filmes. Esses trocadores de calor são de maior utilização em sistemas de ar condicionados residenciais e veiculares.

## 2.3 TIPOS DE TROCADORES DE CALOR

### 2.3.1 Trocadores de calor de tubo duplo

São construídos em tubos circulares, usados geralmente na transferência de calor líquido/líquido, onde um líquido escoar na parte interna do tubo e o outro na parte externa. Esses trocadores são usados para as funções de fazer o aquecimento, resfriamento, condensadores, economizadores e também para controle de temperatura em tanques de armazenamento. São também fabricados em modelos diferenciados dependendo da área de troca térmica, o tamanho do equipamento e o processo de troca descrevem (MORTEAN, 2014).

Um típico trocador de calor de tubo duplo consiste de um tubo colocado concentricamente dentro de outro tubo de diâmetro maior. Onde um fluxo com uma temperatura passa por dentro do tubo de diâmetro menor e o outro com temperatura diferente passa pelo tubo de diâmetro maior. Vários trocadores de calor de tubo duplo podem ser colocados em série ou paralelo para atender a perda de carga e a temperatura adequada do projeto. O principal uso deste trocador de calor se faz em processos que necessitem de sensível aquecimento ou resfriamento onde pequenas áreas são requeridas (FELICIO 2012).

### 2.3.2 Trocadores de calor casco e tubo

São trocadores vastamente utilizados em todos os processos industriais como aquecimento, resfriamento, evaporação ou vaporização e condensação de todas as variedades de fluidos. Esses equipamentos são bastante utilizados porque possuem sua área de transmissão de calor bastante ampla. Eles consistem de tubos paralelos que é por onde circulam os fluidos, e são montados num casco cilíndrico no qual possuem a circulação de outro fluido. Também tem suas vantagens na fabricação, que são os custos deste equipamento e o seu desempenho térmico, fazendo com que possam ser construídos com superfícies de trocas de calor grandes em comparação com seu volume pequeno (COSTA, 2012).

Por ser constituído de forma cilíndrica e trabalhar em um sistema fechado. Esses equipamentos possuem sua estrutura dividida em partes que são os cabeçotes, o casco e os feixes, para que assim se torne mais fácil a manutenção em sua parte interna e na remoção das peças danificadas. Onde o feixe tubular é um conjunto de tubos que são fixados em suas extremidades duas placas, chamada espelhos. Esse feixe cruza chapas metálicas caracterizadas chicanas, que são ocasionalmente colocadas entre os espelhos, visando evitar a flexão dos tubos

e melhorar a troca térmica são fixados por tirantes, o que aumenta a turbulência do fluido que se move no casco (BICCA, 2006).

Assim Sabino (2008) descreve que o casco geralmente é no formato cilíndrico, é o revestimento do trocador de calor que envolve o feixe e o fluido que passa na parte externa deste feixe. Na parte das extremidades o casco é fechado pelos cabeçotes que junto com os espelhos se tornam câmaras de entrada e saída do fluido. O casco contém dois ou mais bocais para entrada e saída do fluido na superfície do casco, e os cabeçotes têm esses bocais para entrada e saída do fluido na extremidade dos tubos. Em contrapartida se um dos cabeçotes é de retorno este não possui bocal.

### **2.3.3 Trocadores de calor de placas**

Para Tito (2012) são utilizados para refrigeração e aquecimento em geral, assim os trocadores de calor a placas possibilitam uma grande capacidade de troca de calor em um espaço físico reduzido, assim permite alto desempenho em pequenas vazões como em grande gradiente de temperatura. Com essa especificação esses trocadores de calor possibilitam o máximo aproveitamento a energia térmica disponível, utilizando essa energia em outra parte do processo. Os equipamentos são de fácil aplicação e de manutenção simples.

Os trocadores de calor a placas são vastamente usados nos processamentos contínuos de alimentos líquidos que possuem baixa viscosidade e sem material particulado, como exemplos o leite, sucos ou cerveja. As maiores vantagens deste equipamento são a facilidade de higienização, tendo que sua manutenção também é de fácil aplicação e a sua alta eficiência térmica. Consegue levar turbulência mesmo em baixas velocidades de escoamento devido a suas placas ter o corrugamento (GUT, 2012).

### **2.3.4 Trocadores de calor compactos**

Segundo Kays e London (1964) *apud* Gutierrez (2013) trocadores de calor compactos são equipamentos que são muito utilizados nas indústrias de hoje. Eles contam com uma alta taxa de transferência de calor em relação com a sua área de troca térmica que é bem menor, ser for comparado aos outros tipos de trocadores. Geralmente esses equipamentos não necessitam ser de porte grande, pois com as características diferenciadas, tem capacidade de ser construído em massa menor, assim diminuindo também seu espaço ocupacional.

Conforme Shah e Sekulic (2003) *apud* Morteau (2014), trocadores de calor compactos comparados com os do tipo casco e tubo são caracterizados pela ampla área superficial de troca térmica por unidade de volume. Assim com essas características tem-se a redução de seu peso, de seu espaço e da estrutura do equipamento, gerando a redução dos custos e da energia que era preciso para seu processo de funcionamento. Esses equipamentos têm como os principais fluidos para seu funcionamento os líquidos e gases, e são muito importantes quando se busca eficiência energética.

### 2.3.5 Trocadores de calor aletados

Os trocadores de calor aletados são classificados como trocadores compactos, e são utilizados quando se exige rejeitar calor a temperaturas baixas, podendo utilizar como método de resfriamento a água ou o ar. Quando se utiliza o ar se tem algumas vantagens como, o ar está sempre disponível, pode ser aplicado a baixas temperaturas, não é corrosivo e não causa incrustações nas condições usuais. Mas, também tem as desvantagens que podemos citar que são; a baixa condutividade térmica, baixa densidade, baixo calor específico, baixo coeficiente de transferência de calor convectivo e maior volume é necessário para determinada quantidade de calor (SHAH *et al.* 2003 *apud* SILVA, 2016).

Desta forma, como método de resfriamento utiliza aletas, que nada mais é do que ondulações elevadas nas superfícies assim fazendo a troca térmica. Para Silva (2016) as aletas podem ser encontradas das mais diversas formas, sendo as aletas triangulares e retangulares as mais comuns. As aletas retangulares são mais resistentes que as aletas triangulares para uma mesma área de passagem e uma mesma espessura de aleta.

## 2.4 COEFICIENTES GLOBAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) é proveniente da equação da taxa de transferência de calor e combina os mecanismos de convecção e condução responsáveis pela transferência de calor entre o fluido quente e o fluido frio.

Incropera e Dewitt (2002) *apud* Avanço (2010) afirma que, o coeficiente global de transferência de calor deve levar em consideração as resistências: de condução térmica através da parede do tubo, de transferência de calor por convecção através dos fluidos, bem como as resistências de contato entre diferentes materiais especialmente no caso de haver incrustações

na parede do tubo. A resistência de calor é obtida através da área e do coeficiente global de transferência de calor.

Segundo Kreith e Bohn, (2011) o coeficiente  $U$  é uma função da resistência térmica que para um trocador de tubo é escrita como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (6)$$

## 2.5 MÉTODOS DTML PARA ANÁLISE DOS TROCADORES DE CALOR

Diferença de temperatura média logarítmica, também conhecido como DTML ou MLTD, são usados para definir qual é a força que conduz a transferência de calor dos trocadores de calor em seus mecanismos de fluxo. O DTML é a média logarítmica das correntes frias nas extremidades do trocador, sendo que quanto maior o DTML maior será a transferência de calor. Esse método baseia-se em relacionar a taxa de transferência de calor, o produto entre o coeficiente global de transferência de calor e a área de troca,  $UA$ , é um valor médio adequado das diferenças de temperatura entre os fluidos (AVANÇO, 2010).

De mesmo modo, Kreith e Bohn (2011) explica que em geral, as temperaturas dos fluidos em um trocador de calor não são constantes, variando de ponto para ponto à medida que o calor passa do fluido mais quente para o mais frio. Acrescenta também que quando se tem resistência térmica constante, a uma variação na taxa de fluxo de calor ao longo do percurso, onde seus resultados dependem da diferença de temperatura na seção, temperatura do fluido quente e frio.

Para Kreith e Bohn (2011), os trocadores de calor que possuem fluidos escoando em contracorrente e concorrente usamos a seguinte equação:

$$DTML = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (7)$$

Apenas consideramos que para cada situação temos:

Correntes paralelas:

$$\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,e}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,s}$$

Contracorrentes:

$$\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,s}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,e}$$

## 2.6 NÚMEROS DE REYNOLDS

O regime de escoamento depende principalmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido. Essa relação é chamada de número de Reynolds (Re) e sua unidade é admissível (KREITH e BOHN, 2011), o qual para o escoamento em tubos circulares é expresso como:

$$Re = \frac{\dot{m} * D}{A * \mu} \quad (8)$$

Onde para a condição de escoamento completamente desenvolvido no interior de um tubo tem-se:

Regime laminar:  $Re \leq 2100$

Regime de transição:  $2100 \leq Re \leq 2300$

Regime turbulento:  $Re \geq 2300$

## 2.7 EQUAÇÃO DE DITTUS-BOELTER

Para escoamento turbulento em tubos cilíndricos, usamos a equação de Dittus-Boelter, para determinar o número de Nusselt (Nu), que é a razão de transferência de calor convectiva e é um número adimensional (KREITH e BOHN, 2011).

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^n \quad (9)$$

## 2.8 DIGESTORES

Com o aumento da demanda por carne pela população, houve grande aumento no número de unidades frigoríficas. Segundo Pinto (2007), o crescente consumo deste alimento levou ao aumento de abatedouros e a busca do setor pelo aperfeiçoamento e modernização de seus processos produtivos, viabilizando a qualidade do produto final.

Pinto (2015) também complementa que, com todo o aumento da demanda, a indústria avícola brasileira é responsável por uma produção anual superior a 106 milhões de toneladas, demonstrando-se assim como o maior produtor na escala mundial neste segmento. Conseqüentemente a geração de subprodutos teve um crescimento elevado, sendo possível estabelecer uma relação correspondente aos impactos gerados por essa cadeia produtiva.

Assim, como em todos os outros tipos de processos industriais, os subprodutos e resíduos que são gerados nas técnicas de abate de aves devem ser gerenciados dentro das normas, ou seja, da maneira mais adequada possível. Desta forma, possibilita-se a recuperação e o aproveitamento dos materiais, não necessitando depositar os mesmos em aterros, evitando a geração de impactos ambientais. Para este setor o maior desafio é eliminar ou reutilizar estes resíduos da forma mais adequada possível e baixo custo.

Entre todos os resíduos gerados nos abatedouros, encontram-se penas, vísceras, sangue, dentre outros tipos de subprodutos, que podem ser processados e transformados em diversos tipos de mercadorias, onde podemos citar cosméticos, farinhas, etc. As penas são as mais processadas, dando origem a farinha de penas, que são destinadas a produção de rações animais para peixes e frangos de corte.

O aumento da produção e abate de aves tem o comprometimento da responsabilidade para a destinação adequada dos resíduos de abatedouros. Pressionadas pelas legislações e políticas ambientais, também pelas oportunidades de negócios, criaram-se as indústrias de processamento de subprodutos de origem animal, geralmente conhecidas como graxarias. O objetivo dessas indústrias é realizar o processamento dos resíduos transformando-os em farinhas, as quais possuem alto valor agregado, sendo utilizadas na composição de rações (SINHORINI 2013).

De acordo com Ferroli *et al* (2000) *apud* Sinhorini (2013), as graxarias surgiram no início do século XXI com a finalidade de promover o aproveitamento dos subprodutos gerados no abate de aves, suínos e bovinos (penas, pelos, vísceras, cascos, etc.). Os mesmos antes eram simplesmente dispostos sem tratamento algum no ambiente. O objetivo principal das graxarias é a geração de alimentos com alto grau protéico para os animais.

Barros (2007) *apud* Sinhorini (2013) relata que a indústria que recicla os resíduos de origem animal é conhecida tradicionalmente por graxaria, podendo ser independente ou integrada aos frigoríficos e abatedouros. Descreve também, que os equipamentos responsáveis para a realização deste processamento são chamados de digestores, os quais têm por função

básica fazer o cozimento de resíduos dos frigoríficos. Os digestores são as principais máquinas de uma fábrica de farinhas e óleos.

O digestor foi projetado para proporcionar uma boa transferência de calor das paredes internas quentes ao produto frio (vísceras e/ou penas). Esses equipamentos fazem o cozimento através do vapor que é fornecido por uma caldeira, que preenche internamente a camisa, o eixo e as pás, mantendo sob pressão. Possui como uma das vantagens ter como produto final um produto homogêneo que facilita a prensagem. Outra vantagem é o fato do digestor ter um baixo consumo de vapor em seu processo, o que auxilia na diminuição do uso de energia elétrica pela indústria (SINHORINI, 2013).

### **2.8.1 Farinha de penas e sangue**

É o produto resultante do processamento de cocção sob pressão de penas limpas não decompostas, bem como vísceras de aves abatidas. São permitidas inclusões de carcaças, sangue e gordura. As penas constituem-se em ingrediente importante, pois possuem queratina que é rica em aminoácidos sulfurados (principalmente a cistina). Porém essa proteína é extremamente insolúvel, sendo que sua limitação encontra-se na deficiência de aminoácidos como lisina, metionina e histidina (XAVIER, 2005).

### **2.8.2 Farinha de vísceras**

É o produto resultante do processo de cocção de vísceras de aves (intestinos e pulmões), sendo permitida a inclusão de cabeças e pés, mas não deve conter penas, resíduos de incubatório nem contaminação com casca de ovo. De acordo com Anfal (1998), as farinhas de origem animal para serem utilizadas devem atender algumas normas de garantia.

### **2.8.3 Processamento**

Para o processamento dos subprodutos de origem animal, o método de recuperação a seco é o mais utilizado pelos abatedouros, sendo o mais eficaz e econômico. O processo básico consiste na retirada do excesso de água dos restos de matança triturados ou moídos que são levados aos digestores e submetidos a cozimento sob pressão, promovendo posteriormente a

despressurização do equipamento, drenando o excesso de líquido, iniciando então a secagem do produto para propiciar a moagem (BELLAVÉR, 2002).

O cozimento é realizado através de vapor que é gerado pela caldeira da indústria. Durante este processo, o digestor libera grande quantidade de ar quente, devido ao vapor estar no procedimento. Esse ar quente sai do equipamento carregado de gases como gás sulfídrico, sulfetos de metila e dimetila (LICCO; BARROS, 2010). Estes tipos de gases não prejudicam os equipamentos, assim pode-se fazer o reaproveitamento do ar quente dos digestores. O único problema dos gases é a emissão de odores indesejáveis, os quais não são tóxicos, porém incômodos. Além do mais, esses odores existem em vários pontos na indústria, sendo o principal local nos digestores térmicos.

### 3 METODOLOGIA

Concedendo de que o método é um procedimento para alcançar determinada finalidade e a busca do conhecimento. A metodologia é o componente onde será descrito que tipo de pesquisa que será empregado, quais as etapas a serem realizadas, quais serão a revisão na literatura, como se executa a coleta de dados e as análises de dados. Todas essas peças formam um conjunto de ações que geram as propostas para encontrar a solução para um problema.

A pesquisa foi desenvolvida através do método indutivo, que é o método que obtém conclusões gerais a partir de premissas individuais, ou seja, partimos de algo particular para uma questão muito mais ampla.

A classificação referente ao nível de pesquisa adotada foi a exploratória, onde se objetiva em estudar as características de um fenômeno do assunto em foco, gerando o desenvolvimento de conceitos, soluções e benefícios aos problemas pesquisados.

A pesquisa desenvolvida foi classificada quanto ao delineamento como bibliográfica baseando-se exclusivamente em dados já publicados em livros, teses, dissertações e material eletrônico, juntando-se com o estudo de caso, em um profundo e exaustivo detalhamento do princípio de funcionamento de um digestor e dos trocadores de calor na graxaria.

Neste trabalho os instrumentos de coleta de dados utilizados foram a observação e documentos da vistoria realizada no ano de 2018. Realizado em uma indústria de abatedouro de aves, localizada no oeste de Santa Catarina, onde observamos que o ar quente e gases liberados pelo digestor, transitavam por uma estação de tratamento e posteriormente liberado a atmosfera. E através de documentos arquivados do equipamento obtivemos dados como a

temperatura de saída do ar quente depois do processo de tratamento, e a vazão máxima da saída dos gases, conferindo com um termômetro digital medidor de temperatura.

Do mesmo modo coletamos informações do método de cozimento dos dejetos na indústria. Aonde os gases de ar quente liberado são do processamento de vísceras em um cozimento contínuo de 01h20min cada carga de dejetos. Após este processo o equipamento esvazia e já recarrega novamente. A água utilizada na entrada do trocador de calor será na temperatura ambiente, coletado através do termômetro digital medidor de temperatura.

Com os dados obtidos, o primeiro passo é aplicar a organização dos mesmos, para dar sequência a realização das análises e interpretação para apresentar as probabilidades e significados que os dados possam ter. A técnica de análise e interpretação de dados utilizada foi à quantitativa, onde coletamos informações do equipamento para a realização de cálculos com relação ao dimensionamento de um trocador de calor.

Iniciamos com o cálculo para encontrar a vazão mássica dos gases de ar quente. Estipulamos o valor para a temperatura de saída da água quente, com a finalidade de realizarmos o balanço térmico das temperaturas, para obter a quantidade de calor necessário, que usaremos para a troca térmica no trocador de calor. Assim prosseguimos para desenvolver o coeficiente global, após realizamos cálculos da área e comprimento do equipamento, a fim de obter o dimensionamento do mesmo.

#### 4 RESULTADOS DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos dados coletados desenvolvemos a equação da transformação de vazão para determinar a vazão mássica de saída do ar quente, onde descrevemos que a temperatura de saída do ar quente seja aproximada de 55 °C. Definimos que a temperatura de saída da água quente é 55,5 °C e o calor específico (cp) do ar quente é 1016 J/kg. K, em temperatura média de 56°C, adotado através da tabela 27 apêndice 2 de (KREITH e BOHN, 2011).

Vazão máxima = 30000 kg/h

Vazão mássica do ar quente ( $\dot{m}_{aq}$ ) = 8.33 kg/s

Temperatura de entrada do ar quente ( $T_{Eaq}$ ) = 58.3 °C

Temperatura de saída do ar quente ( $T_{saq}$ ) = 55 °C

Temperatura de entrada da água ( $T_{Ea}$ ) = 23.1 °C

Temperatura de saída da água quente ( $T_{Sa}$ ) = 55.5 °C

Com as duas temperaturas de saída do ar quente definiram a taxa de transferência de calor no trocador.

$$Q = \dot{m} * c_{p_{Aq}} * \Delta T$$

$$Q = 8.33 \text{Kg/s} * 1016 \text{ J/kg. K} * (58,3 - 55)^\circ\text{C}$$

$$Q = 27928,824 \text{ J/s}$$

Determinamos para um trocador de calor de tubo duplo o diâmetro externo do tubo interno de 0,40m e para o diâmetro interno do tubo externo de 0,425m. Com uma temperatura média de 56 °C adotamos a viscosidade do fluido ar quente de  $19,67 * 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  pela tabela 27 apêndice 2 de (KREITH e BOHN, 2011). Com a equação 7 calculamos o número de Reynolds em tubos circulares.

Cálculos da definição do tubo interno (ar quente):

$$Re = \frac{\dot{m} * D}{A * \mu} \rightarrow Re = \frac{8,33 * 0,40}{\frac{\pi * 0,40^2}{4} * 19,67 * 10^{-6}} \rightarrow Re = 1348002,721$$

O número de Prandtl (Pr) é um número adimensional que aproxima a razão de difusividade de momento (viscosidade cinemática e difusividade térmica). Através da temperatura média do ar quente de 56 °C, adotamos o número de Pr de 0,71, e a condutividade térmica de 0,0274W/m.K, pela tabela 27 apêndice 2 de (KREITH e BOHN, 2011). Calculamos a equação de Nusselt pela equação 8.

Definição de n:

Para aquecimento n= 0,4

Para resfriamento n= 0,3

$$Nu = 0,023 * 1348002,721^{0,8} * 0,71^{0,3} \rightarrow Nu = 1662,87$$

Os coeficientes de transferência térmica dos tubos são expressos pela equação abaixo, onde:

$$Nu = h_i * D / k$$

$$1662,87 = \frac{h_i * 0,40}{0,0274} \rightarrow h_i = 113,91 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Cálculos da definição do tubo externo (água):

Com a equação da taxa de transferência de calor determinamos a vazão mássica da água no tubo externo, sendo que o calor específico é adotado em uma temperatura média de 40°C pela tabela 13 apêndice 2 de (KREITH e BOHN, 2011) de 4175 J/kg. K.

$$Q = \dot{m} * c_{p_{Aq}} * \Delta T$$

$$27928,82 \text{ J/s} = \dot{m} * 4175 \text{ J/kg.K} * (55,5 - 23,1)^{\circ}\text{C} \rightarrow \dot{m} = 0,20 \text{ Kg/s}$$

Calculamos o número de Reynolds (Re), pela equação 7, para o tubo de escoamento da água que será aquecida. Com a tabela 13 apêndice 2 de (KREITH e BOHN, 2011), com temperatura de 40°C temos as propriedades da água, onde a viscosidade é  $658 * 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ .

$$Re = \frac{\dot{m} * D}{A * \mu} \rightarrow Re = \frac{0,20 * (0,425 - 0,40)}{\frac{\pi * (0,425^2 - 0,40^2)}{4} * 658 * 10^{-6}} \rightarrow Re = 469,09$$

Do mesmo modo que elaboramos as definições e cálculos para o tubo de ar quente, realizamos para o tudo da água com as condições de temperatura da mesma. Com o número de Reynolds (Re) temos que o escoamento no tubo é laminar. Deste modo o cálculo para a determinação do número de Nusselt é através dos diâmetros, onde que para escoamento laminar dentro de um anel, usou-se a Tabela 1.

**Tabela 1: Numero de Nusselt pelo escoamento laminar**

D1/D2	Nu1	Nu2
0	--	3,66
0,05	17,46	4,06
0,1	11,56	4,11
0,25	7,37	4,23
0,5	5,74	4,43
1	4,86	4,86

Fonte: Kreith e Bohn (2011).

$$\frac{D1}{D2} \rightarrow \frac{0,40}{0,425} \rightarrow 0,941$$

Com a relação entre os diâmetros de 0,941, através da interpolação o valor de Nusselt encontrado foi:

$$Nu = 4,89$$

Define-se então o coeficiente de transferência térmica do tubo externo  $h_e$ .

$$Nu = h_e * D/k$$

$$4,89 = \frac{h_i * (0,425 - 0,400)}{0,633} \rightarrow h_e = 123,81 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Com as condições dos coeficientes de transferência do tubo externo e interno definidas, calculamos o coeficiente de transferência térmica global, que leva em conta os coeficientes de transferência de cada corrente térmica individuais, dado pela equação.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \rightarrow U = \frac{1}{\frac{1}{113,91} + \frac{1}{123,81}} \rightarrow U = 59,32 \text{ kw/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Após a obtenção dos coeficientes de transferência, define-se a diferença de temperatura média logarítmica (DTML), para definir qual é a força que conduz a transferência de calor nos trocadores expressa como:

$$DTML = \frac{(T_{Sv} - T_{Ea}) - (T_{Ev} - T_{Sa})}{\ln\left(\frac{T_{Sv} - T_{Ea}}{T_{Ev} - T_{Sa}}\right)} \rightarrow DTML = \frac{(55 - 23,1) - (58,3 - 55,5)}{\ln\left(\frac{55 - 23,1}{58,3 - 55,5}\right)} \rightarrow DTML = 11,96^\circ\text{C}$$

Pela equação da taxa de transferência de calor dos trocadores, define-se o comprimento do mesmo, sendo que o equipamento dimensionado é um trocador de tubo duplo. Se expressa a equação como:

$$Q = U * A * MLDT$$

$$27928,824 \text{ J/s} = 484,83 \text{ K.w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} * (\pi * 0,40) \text{ m} * L * 11,96^\circ\text{C} \rightarrow L = 31,32 \text{ m}$$

Com as informações coletadas na indústria desenvolvemos os cálculos para o dimensionamento de um trocador de calor, sendo do tipo tubo duplo. Através da limitação existente na temperatura de entrada do ar quente os resultados obtidos foram:

Diâmetro do tubo interno de 0,40m e diâmetro do tubo externo de 0,425m que foram determinadas pelo autor e como resultado o comprimento do trocador para a realização da troca térmica de 31,32m.

No estudo desenvolvido chegamos às conclusões de que é possível realizar o dimensionamento de trocador de calor, que possui como fonte de energia a reutilização do ar quente dos digestores. O ar quente pode ser reaproveitado através de tubulações sem dissipação, mas devido ao percurso pela estação de tratamento a sua temperatura diminui necessitando um maior comprimento no trocador de calor para a realização da troca térmica.

É viável a reutilização do ar quente dos digestores, pois é um método econômico de implantação ou aperfeiçoamento de sistemas de troca térmica, onde não há a necessidade de

possuir caldeiras a vapor na indústria para a realização do aquecimento de água para utilização na higienização. Assim tornando a viabilidade maior por não conter gastos pela compra e queima de materiais para aquecimento da água.

O ar quente por conter gases formados no processo de cozimento dos dejetos não efetua danos ao trocador de calor, pois antes de seu uso o mesmo passa pela estação de tratamento onde retêm os odores dos gases, para depois do processo ser liberado limpo a atmosfera. Este tipo de sistema tem como vantagem o reaproveitamento de energia térmica e economia de equipamentos. Sua desvantagem é o custo de implantação, onde necessita de materiais de alto valor pela necessidade de escoamento de energia térmica nas tubulações, evitando a perda de calor nos mesmos.

O equipamento desenvolvido possui seu comprimento bastante excessivo, onde que para uma indústria que possui uma área de construção menor, a viabilidade de implantação de um equipamento nestas formações não é vantagem. Nestes casos o dimensionamento de um trocador de calor de casco e tubo para as mesmas condições de trabalho de temperatura, fariam que se comprimento diminuísse, tornando um equipamento compacto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através de pesquisas, informações e documentos obtiveram-se resultados desejáveis, para a aplicação de um trocador de calor nas condições de trabalho existentes. Coletaram-se informações para uma base de cálculos, onde contém informações necessárias para a realização dos mesmos, chegando às respostas compatíveis com os objetivos, esclarecendo as dúvidas existentes em todo processo.

Demonstraram-se que o ar quente pode ser utilizado, gerando o reaproveitamento de energia térmica, o que em muitas indústrias não era possível à implantação de trocadores de calor, pela falta de uma caldeira para a geração de vapor. Descrevemos que o ar quente possui gases, causados pelo efeito do cozimento de dejetos, mas o mesmo não acarreta em danos ao equipamento, oferecendo o reaproveitamento desta energia.

Cita-se também que o dimensionamento foi realizado para um trocador de calor de tubo duplo. As pesquisas de fundamentação teórica trazem uma ampla descrição dos tipos e construções desses equipamentos, para aprofundamentos em cálculos de dimensionamento de equipamentos diferentes, como um trocador de calor de casco e tubo para áreas de menor ocupação.

Conclui-se que o ar quente é uma fonte de energia que pode ser utilizada para a realização de troca térmica, gerando economia em muitos casos. Enquanto que para outras indústrias o aprimoramento desses sistemas vem se inovando cada vez mais. E os trocadores de calor estão cada vez mais sofisticados, realizando a troca térmica em equipamentos mais compactos, adequando-se a os mais diversos processos.

## REFÊRENCIAS

- AVANÇO, Rafael Henrique. **Simulação numérica de evaporadores utilizados em aplicações frigoríficas**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de concentração em Térmica e Fluidos) - Escola de Engenharia d São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- ANFAL, **Compêndio brasileiro de alimentação animal**. São Paulo: SINDIRAÇÕES, 1998.
- BARROS, Fernando Duque; LICCO, Eduardo Antônio. **Graxarias e a geração de odores** . 2007. 10 f. Artigo (Engenharia Química) - Centro universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Mauá, 2007.
- BELLAVER, C. **Uso de resíduos de origem animal na alimentação de frangos de corte**. In: SIMPÓSIO BRASIL SUL DE AVICULTURA, 2002, 3. Chapecó. Anais..., Chapecó: ACAV-EMBRAPA, 2002.
- BICCA, Gerson Balbueno. **Modelagem hierárquica de trocadores de calor casco e tubos**. 2006. 189 f. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do SUL, Rio Grande do Sul - RS, 2008.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem pratica**. 4 ed. Porto Algre: AMGH, 2012. 904 p.
- COSTA, Rodrigo Caetano. **Protótipo de um recuperador de calor para resfriamento rápido de gases de incineração de resíduos perigosos**. 2012. 145 f. Dissertação (Dissertação de doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2012. Disponível em: <http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/engenharia%20agr%C3%ADcola/2012/243433f.pdf> . Acesso em: 08 out. 2017.
- FELICIO, R. S. **Design of heat exchanger applied to the water cooling mold of a continuous casting process**. 2012. 92f. Graduate Work (Graduate in Mechanical ngineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.
- GODOY, S. M. **Eficiência térmica de trocadores de calor compactos através de simulação numérica**. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- GUT, Jorge Andrey Wilhelms. **Modelagem matemática e validação experimental da pasteurização de alimento líquido em trocadores de calor a placas**. 2012. 119 f. Tese

(Livre-Docente em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2012.

GUTIERREZ, Carola Gean Carla Cavero. **Análise dinâmica de um processo contínuo de pasteurização em trocadores de calor a placas.** 2013. 141 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2013.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 6. ed. Rio de Janeiro – RJ: LTC, 2008.

KREITH, Frank; BOHN, Mark S. **Princípios de transferência de calor.** 6. ed. São Paulo - SP: Cengage Learning, 2011.

LICCO, Eduardo Antônio; BARROS Fernando Duque. **Graxarias e a geração de odores.** Relatório de Consultoria. Não publicado. São Paulo, 2002.

MORAN, Michael J. et al. (Org.). **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos.** Rio de Janeiro - RJ: Diagrama e Ação, 2013.

MORTEAN, Marcus Vinicius Volponi. **Desenvolvimento de tecnologias de recheios para trocadores de calor compactos soldados por difusão.** 2014. 212 f. Dissertação (Dissertação de mestrado) - Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2014.

PERUSSI, Ronaldo. **Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica.** 2010. 138 f. Dissertação (Dissertação de mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos - SP, 2013.

PINTO, Laura Adriane de Moraes et al. **Aspectos Ambientais do Abate de Aves.** Maringá - PR: [s.n.], 2007.

SABINO, Ricardo Schayer. **Inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor.** 2008. 115 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2008. Disponível em:  
<[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MDAD-7W7JCC/disserta\\_\\_o\\_mestrado\\_\\_inspe\\_\\_o\\_de\\_feixes\\_tubulares\\_de\\_troca.pdf?sequence=1%3E](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MDAD-7W7JCC/disserta__o_mestrado__inspe__o_de_feixes_tubulares_de_troca.pdf?sequence=1%3E)>. Acesso em: 08 out. 2017.

SILVA, Tatiane Caetano. **Dimensionamento de trocadores de calor para recuperação de calor residual em sistema ORC de uma FPSO.** 2016. 164 f. Dissertação (Mestre em Ciências em engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2016.

SINHORINI, Marcia Regina. **Processo de produção de farinha de Penas hidrolisadas: estudos de otimização do teor protéico e do valor de digestibilidade da proteína.** 2013. 110. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2013.

XAVIER, Suzany Aparecida Gomes. **Farinhas de penas e sangue e de vísceras em diferentes inclusões nas rações de frangos e seus efeitos no desempenho, digestibilidade e morfometria INTESTINAL.** 2005. 66 f. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Ciência Animal)- Escola de Veterinária, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

TITO, José Miguel Mayta. **Simulação de trocadores de calor de placas para sistema de refrigeração em cascata.** 2012. 72 f. Tese (Dissertação de mestrado) - Programa de pós graduação em engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2012. Disponível em:  
[https://www.maxwell.vrac.pucrio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=18986@1](https://www.maxwell.vrac.pucrio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=18986@1) .  
Acesso em: 15 maio. 2018.