



Jaqueline Raquel Bender

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE PEÇAS EM
FERRO FUNDIDO APÓS O PROCESSO DE PINTURA**

Horizontina-RS

2019

Jaqueline Raquel Bender

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE PEÇAS EM
FERRO FUNDIDO APÓS O PROCESSO DE PINTURA**

Projeto do Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a o Trabalho Final de Curso na Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina, sob orientação do professor (Me) Geovane Webler, e co-orientação do professor (Dr) Vódice Amoroz Feisther.

Horizontina-RS

2019

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

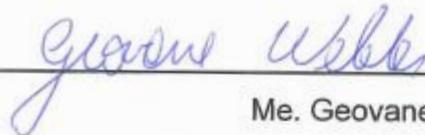
**“DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE PEÇAS EM
FERRO FUNDIDO APÓS O PROCESSO DE PINTURA”**

Elaborada por:

Jaqueline Raquel Bender

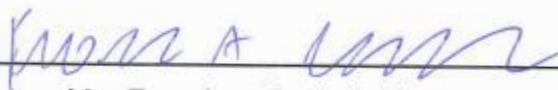
Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 27/11/2019
Pela Comissão Examinadora

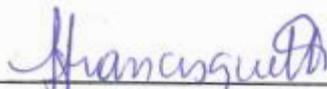


Me. Geovane Weblar

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador



Me. Francisco Antônio Kraemer
FAHOR – Faculdade Horizontina



Dr. Janice Zulma Francesquett
FAHOR – Faculdade Horizontina

À minha família, por todo apoio atribuído durante a graduação, por me ensinar os princípios a serem seguidos, por me guiarem a conseguir chegar ao propósito e principalmente me mostrar os reais valores que a vida têm. Vocês são extremamente essenciais para cada passo que dou, desde sempre.

AGRADECIMENTO

A todos que de alguma forma confiaram no meu trabalho e dedicação, primeiramente minha família e meus orientadores que seguiram comigo até aqui. Muito Obrigada!

“Sua tarefa é descobrir o seu trabalho e, então,
com todo o coração, dedicar-se a ele”.

(Buda)

RESUMO

O uso de estufas no meio produtivo faz com que a geração de calor esteja presente no recinto, trazendo desconforto aos colaboradores e neste caso gera gargalo de produção. Uma solução para o problema de resfriamento das peças após o processo de estufa na linha de pintura da empresa Metalúrgica Candeia é o objetivo deste estudo. Trata-se de uma coleta de dados inicial e com isso o dimensionamento de um sistema de ventilação, do qual busca-se conhecimento apresentado no referencial teórico. Como resultado aplica-se o uso de ventilação diluidora e exaustora, ou seja, uma entrada de ar com ventilação forçada e uma saída de ar com exaustão, onde com base nos dados encontrados através dos dimensionamentos e da coleta de dados, foi possível determinar o tamanho e capacidade para os equipamentos necessários e também definir o tempo padrão de resfriamento.

Palavras-chave: Transferência de Calor. Ventilação. Exaustão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cura da película	19
Figura 2: Componentes básicos do circuito de refrigeração, Temperatura e estado Físico.....	21
Figura 3: Sistema básico do circuito de refrigeração – Pressão.....	21
Figura 4: Modelos de condicionadores.....	22
Figura 5: Ilustração de diâmetro equivalente.....	28
Figura 6: Demonstração de sistema aberto e fechado.....	30
Figura 7: Convenção de Sinais para Primeira Lei da Termodinâmica.....	31
Figura 8: Ação dos ventos em relação a pressão	34
Figura 9: Resistência da passagem do ar - Chaminé.....	36
Figura 10: Escalonamento da diferença das pressões para um ambiente com aquecimento.....	37
Figura 11: Efeito chaminé ou termossifão	37
Figura 12: Chaminés de Ventilação	39
Figura 13: Exemplos de aberturas para ventilação natural	39
Figura 14: Ilustração da remoção o calor sensível	41
Figura 15: Exemplo de ventilação exaustora.....	42
Figura 16: Fluxo do ar	43
Figura 17: escoamento laminar e turbulento.....	43
Figura 18: Mecanismos de transferência de calor.....	46
Figura 19: Condução.....	47
Figura 20: Valores para coeficiente de convecção.....	49
Figura 21: Transferência por convecção	49
Figura 22: Campo de aplicação de compressores e ventiladores.....	54
Figura 23: Principais tipos de ventiladores.....	57
Figura 24: Curva característica ventilador centrifugo de pás radiais	58
Figura 25: Curva característica ventilador centrifugo de pás para frente	59
Figura 26: Curva característica ventilador centrifugo de pás radiais	59
Figura 27: Curva característica ventilador axial propulsor.....	60
Figura 28: Cronograma de atividades	63
Figura 29: Ilustração de peças monitoradas.....	66
Figura 30: Ilustração do ventilador MC400 – 1750pm.....	76

Figura 31: Dados técnicos dos ventiladores axiais.....	76
Figura 32: Característica do alcance do jato de ar	77
Figura 33: Estufa de cura	77
Figura 34: Característica do alcance do jato de ar	78
Figura 35: Sugestão de instalação	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Valores recomendados de renovação de ar	33
Quadro 2: Diferenças de pressão obtidas por termossifão	38
Quadro 3: Trocas de ar por hora	41
Quadro 4: Modelo para coleta dos dados	65
Quadro 5: Valores para constante de condutividade térmica	68
Quadro 6: Valores encontrados para convecção térmica.....	70
Quadro 7: Valores encontrados para Nusselt.....	71
Quadro 8: Valores encontrados para Reynolds.....	73
Quadro 9: Valores encontrados para velocidade atual e futura	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	14
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.3 HIPÓTESES	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo geral	15
1.4.2 Objetivos específicos.....	15
1.5 JUSTIFICATIVA	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 PINTURA INDUSTRIAL	17
2.2 PROCESSO DE CURA E SECAGEM.....	18
2.3 REFRIGERAÇÃO.....	19
2.3.1 Resfriadores para superfície seca com circulação forçada de ar	22
2.3.1 Conceitos básicos e variáveis do processo.....	23
2.4 TERMODINÂMICA.....	29
2.5 VENTILAÇÃO.....	32
2.5.1 Ar de ventilação.....	32
2.5.2 Ventilação natural.....	34
2.5.3 Ventilação mecânica diluidora.....	39
2.5.4 Ventilação local exaustora.....	41
2.6 FENÔMENOS DE TRANSPORTE	42
2.6.1 Escoamentos laminar e turbulento	43
2.6.2 Fluxo de quantidade de movimento	44
2.6.3 Transporte de calor	45
2.6.4 Condutividade térmica.....	45
2.6.5 Convecção	48
2.6.6 Radiação térmica	50
2.6.7 Número de Nusselt.....	52
2.6.1 Número de Prandtl	53
2.6.2 Equação de Dittus- Boelter.....	53
2.7 MÁQUINAS DE FLUIDO	53
2.7.1 Ventiladores	55
3 METODOLOGIA.....	61
4 RECURSOS NECESSÁRIOS	64
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS.....	81
APÊNDICE A	83
APÊNDICE B	84
APÊNDICE C	85
APÊNDICE D	86
APÊNDICE E	87
APÊNDICE F.....	88
APÊNDICE G	89
ANEXO A	90
ANEXO B	91
ANEXO C	92

1 INTRODUÇÃO

O estudo sobre o resfriamento de peças em uma linha de pintura surgiu a partir do gargalo de produção que se no resfriamento de peças após a operação de estufa no processo, para cura da tinta, e antes de embalá-las. Isso pode acarretar atraso de produção, defeitos de pintura, acúmulo de peças na linha gerando retrabalho e atrasando a primeira etapa de um processo cíclico.

O uso de estufas para a cura das tintas é indicado para o aumento da produtividade, uma vez que as peças podem ficar ao ar livre durante várias horas e terão o mesmo desempenho. Pode ser especificado pelo responsável técnico de tintas uma hora, dois dias ou mais, isso depende das condições climáticas do ambiente de aplicação e do produto utilizado.

Segundo Furtado (2010) para acelerar a velocidade de secagem, especialmente em linhas de produção seriada, como por exemplo na indústria automotiva, são usadas as estufas, que são túneis, onde faz-se uma conjugação da circulação de ar quente, do ar frio e do aquecimento do ar e da superfície pintada, por meio de lâmpadas infravermelhas e/ou resistências elétricas. Assim, obtém-se o aquecimento controlado de acordo com cada faixa de trabalho, que pode variar de 60°C a 300°C. Nesta etapa do processo os solventes são evaporados e eliminados para a atmosfera. Este processo reduz para minutos o que ocorreria em horas à temperatura ambiente.

Este estudo se originou na estação do verão, quando a temperatura ambiente é elevada, chegando a picos de 35°C, com a estufa de cura trabalhando a 100°C. As peças são de material fundido possuem grande massa, e, em sua maioria extensa área, levando a longos períodos de resfriamento impossibilitando o manuseio e armazenamento. É possível perceber, ainda, dois outros agravantes da temperatura neste setor. Na linha de tratamento superficial existe um tanque de imersão denominado desengraxe que trabalha a 68°C e uma estufa de secagem das peças do pré-tratamento que trabalha a 120°C, ocasionando uma troca de calor muito grande com o ambiente e agravando esta situação principal, que é o resfriamento das peças após a pintura.

Como possíveis soluções têm o projeto de um sistema de ventilação ou resfriamento de peças, a compra de um equipamento específico para este processo, um desvio para peças críticas – as que demoram mais para resfriar e um melhor

planejamento do PCP (Planejamento e Controle da Produção), das quais podem ser implementadas em conjunto ou individual.

1.1 TEMA

Este estudo tem como foco verificar e dimensionar um método eficaz para resfriamento das peças, após o processo de pintura.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema a ser solucionado com este trabalho é a ausência de um método para realizar o resfriamento das peças após a pintura. Este resfriamento sem ajuda de algum equipamento é bastante demorado e pode interferir em diversas etapas do processo produtivo.

Assim, a pergunta científica a qual este trabalho se dedica é: qual seria o método eficaz para o resfriamento das peças após o processo de pintura?

1.3 HIPÓTESES

Entre as hipóteses estabelecidas no presente trabalho, cita-se:

- a) O sequenciamento de produção pode melhorar o processo de resfriamento das peças após a pintura;
- b) O método de resfriamento diminuirá o calor acumulado no setor de pintura;
- c) O estabelecimento de um tempo de resfriamento para as peças pode evitar a necessidade de uso de máquinas neste processo, quando não levar em conta produtividade;
- d) O desenvolvimento de um equipamento automaticamente estabelece o tempo padrão e soluciona a questão do resfriamento, mas pode ter custo elevado não sendo vantajoso perante o custo benefício;
- e) Poderá se optar em dimensionar um sistema de ventilação para suprir o resfriamento de peças em um tempo pré-determinado;

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste estudo é padronizar o tempo de resfriamento das peças, levando a melhorias na linha de pintura através de processos, dimensionamentos e/ou projeto de uma máquina que acelere este processo de resfriamento.

1.4.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- a) Realizar uma coleta de dados referente ao tamanho (área), peso das peças, temperatura ambiente, umidade do ar, tempo necessário de estufa e temperatura necessária para embalar;
- b) Elaborar planilhas com os dados e determinar o ponto de estudo;
- c) Realizar estudo da troca de calor realizada entre as peças e o recinto, dimensionando estas trocas através da condução e convecção;
- d) Determinar o melhor método de resfriamento das peças;
- e) Solucionar os problemas de resfriamento das peças a partir de mudanças nos processos de produção;

Não solucionando o problema através das ações descritas até o item e):

- f) Projetar e construir um equipamento que resolva este gargalo no processo produtivo;

1.5 JUSTIFICATIVA

Este projeto foi desenvolvido no setor de pintura de uma empresa metalúrgica no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, pretendendo solucionar o problema da alta temperatura gerada neste setor.

É necessário realizar um estudo do calor gerado neste setor, tanto para aumento da produtividade quanto para a ergonomia e bem-estar dos colaboradores. O estudo irá quantificar e definir o calor gerado e em contrapartida estudar o melhor método, observando custo benefício, que solucionará os problemas propostos. Este calor gerado no ambiente contribui para os problemas que serão estudados e solucionados:

- a) As peças quando manuseadas em alta temperatura geram defeitos de aparência. Estes defeitos identificados internamente podem ser retrabalhados, entretanto, se não identificados podem chegar ao cliente, o que causa uma devolução e má impressão da empresa;
- b) O acúmulo de peças na linha de produção, em função do tempo necessário de resfriamento para o manuseio de peças, pois as peças devem esperar atingir uma temperatura próxima a ambiente para poder ser manuseadas, isso, quando ocorre, diminui consideravelmente a produtividade;
- c) A alta temperatura que a estação do verão proporciona agrava a situação ergonômica dos funcionários quanto ao ambiente. Para isso, cogita-se o desenvolvimento de um equipamento de resfriamento automático, sem necessidade de interação humana.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PINTURA INDUSTRIAL

A pintura industrial é aquela cuja finalidade principal é a proteção anticorrosiva. Apresenta, porém, outras finalidades complementares, entre as quais se destaca é a estética, auxílio na segurança industrial, impermeabilização, diminuição da rugosidade em superfícies, facilitação na identificação de fluidos em tubulações, impedimento da aderência de vida marinha ao casco das embarcações e boias e permitir maior ou menor absorção de calor. Quanto ao custo, a pintura é o método mais eficaz e com o melhor custo-benefício para o controle de corrosão (NUNES; LOBO, 2012).

Segundo Furtado (2010), a pintura tem versatilidade e importância quando se analisa a vida útil que ela proporciona aos equipamentos que sofrem agressões do ambiente, por exemplo. Além da vida útil na primeira aplicação (de fábrica), ela proporciona manutenções através de retoques e repinturas. Da fabricação até a aplicação, as tintas são tratadas como líquidos. Após a aplicação e secagem a tinta se constitui de um sólido com coesão, flexibilidade, dureza, facilidade de lixamento e brilho característicos deste estado.

Para Chiaverini (1977), a pintura constitui da aplicação de revestimentos não-metálicos orgânicos, tintas, a qual é a maior parte dos revestimentos anticorrosivos por ser de fácil aplicação e menor custo. A aplicação depende das características químicas desta, como veículos cuja função é formar a película e agregam pigmentos; pigmentos são pequenas partículas cristalinas insolúveis nos solventes utilizados; solvente que tem como função dissolver o veículo para possibilitar aplicação em camadas finas; materiais auxiliares que são conhecidos como secantes.

De acordo com Groover (2014) é a aplicação e revestimentos orgânicos produzidos sinteticamente ou naturalmente que secam ou endurecem como um filme fino nos substratos. O revestimento é interessante pela variação de cores e texturas, protegem superfícies dos substratos, oferecem baixo custo e facilidade de aplicação. Enfatiza também os métodos de aplicação destes revestimentos, podendo variar de acordo com o resultado envolvido como espessura do filme, taxa de produção, questões ambientais e de custos. Os métodos variam em trinchas, rolos, aspersão, imersão e processo contínuo. Trinchas e rolos têm alta eficiência de transferência, ou seja, aproximadamente 100% da tinta é aplicada na peça onde a perda de tinta no processo é próximo a zero, porém não atendem alta escala de produção; Aspersão é

o processo de atomização de um líquido que forma uma névoa de imediato antes da deposição sobre a peça, oferece uma cobertura uniforme sobre a peça (GROOVER, 2014).

2.2 PROCESSO DE CURA E SECAGEM

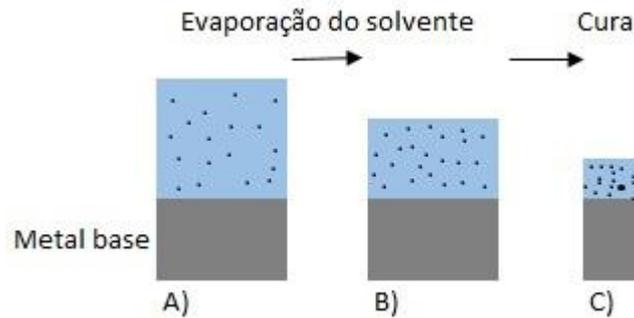
Para Groover (2014), após a aplicação do revestimento é necessário transformar o líquido para sólido, ação definida como secagem. Alguns revestimentos orgânicos secam pela evaporação de seus solventes. Para a formação de um filme durável sobre o substrato é necessária uma conversão, a qual é conhecida como cura. Esta por sua vez envolve uma reação química da resina orgânica, onde há polimerização ou formação de ligação cruzada que endurece o revestimento.

A reação química envolvida na cura é determinada pelo tipo de resina utilizada. Existem diferentes tipos de cura, dos quais os principais são: cura à temperatura ambiente, a evaporação do solvente e oxidação da resina; cura à elevada temperatura: a temperatura elevada é usada para acelerar a evaporação do solvente e promover a polimerização e ligações cruzadas da resina; cura catalítica: a resina partida requer agentes adicionados imediatamente antes da aplicação para permitir a polimerização e a ligação cruzada; cura por radiação: onde várias formas de radiação, como micro-ondas, luz ultravioleta e feixe de elétrons são utilizados (GROOVER, 2014).

Conforme Nunes; Lobo (2012), existem mecanismos para a formação da passagem da película úmida para película seca que é o estado final, após a secagem ou cura. Os mecanismos apresentados são: (i) evaporação do solvente: mecanismo presente na maioria das tintas industriais mesmo nas em que se utiliza outros tipos de mecanismos. Existem tipos de tintas em que este é o único mecanismo presente, são tintas que utilizam solventes para diluição que melhoram sua aplicação, a evaporação do solvente pode introduzir poros, bolhas ou crateras na película seca da tinta, levando a uma diminuição da proteção anticorrosiva por barreiras; (ii) polimerização térmica: ocorre nas resinas que não se polimeriza a temperatura ambiente, tendo necessidade da utilização de uma energia térmica para ativação. São tintas curáveis em estufa aplicada em pintura industrial de equipamentos e instalações submetidas a ambientes altamente corrosíveis; (iii) polimerização por condensação: ocorre nas resinas em que se utiliza um semipolímero como reagente e um agente de cura que quando misturados dão início a polimerização;

Para Furtado (2010), a etapa de secagem ou cura podem ser rápidas ou lentas, dependendo se ocorrer em temperatura ambiente dentro dos limites e especificações, mas podem ter a secagem e a cura aceleradas em estufas especiais. O processo de cura acontece conforme apresentado na Figura 1:

Figura 1: Cura da película



Fonte: a autora, 2019.

A Figura 1, mostra todo o processo de cura das tintas onde apresenta um metal base, que é a peça a ser pintada. No primeiro processo (A), a tinta recém aplicada não teve evaporação do solvente, no segundo processo (B) já se percebe uma evaporação do solvente da tinta e na etapa (C) já apresenta a cura do filme aplicado (FURTADO, 2010).

2.3 REFRIGERAÇÃO

O objetivo do condicionamento de ar na indústria pode ser por conforto ou industrial, onde o conforto visa as pessoas e o industrial satisfaz a condição dos processos (STOECKER; JABARDO, 2002).

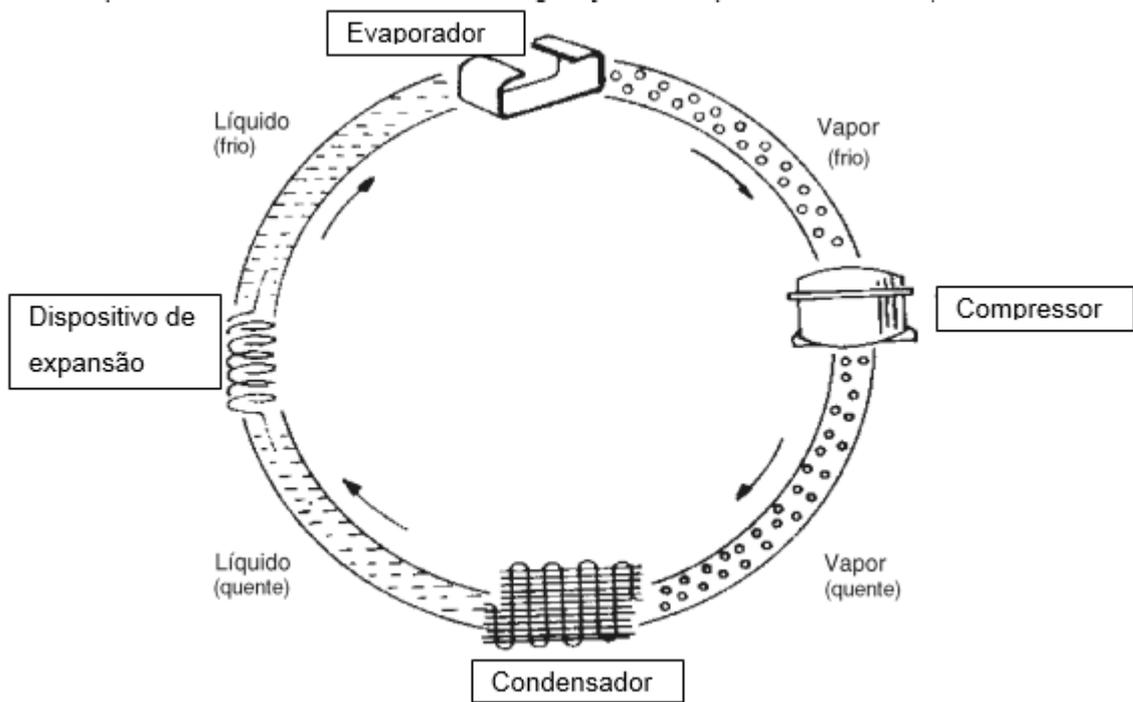
Segundo Miller (2014), a refrigeração é um processo de retirada de calor, podendo ser de alimentos ou do ar de uma sala, onde proporciona conforto, existem também aplicações na indústria onde o calor não é desejado e por isso é retirado através deste método. Durante este processo o calor retirado é transferido mecanicamente para outro local onde não afeta o processo. Para auxiliar neste processo é preciso utilizar um fluido refrigerante, que pode ser qualquer substância que evapore e vaporize temperaturas relativamente baixas, durante este processo o refrigerante absorve calor. Durante a operação o meio permite que o refrigerante vaporize no interior de tubos que estão em contato, direta ou indiretamente com o

meio que precisa ser resfriado. Os controles de temperatura que são alcançadas são determinados no projeto de engenharia.

Conforme Costa (1994), a retirada de calor de um corpo que é conhecida como refrigeração pode ter algumas distinções sobre a forma que isso acontece, podem ser por arrefecimento onde se baixa a temperatura de um corpo até a temperatura ambiente, resfriamento onde baixa-se a temperatura de um corpo até a temperatura de congelamento, ou seja, próximo a 0°C e congelamento onde a temperatura do corpo chega abaixo da sua temperatura de congelamento. De todas as formas se conclui que refrigeração é a retirada de calor de um corpo dispendendo energia. A tendência natural do calor é passar do corpo quente para o corpo frio, então o arrefecimento de um corpo em relação ao ambiente pode ser de forma natural e para o resfriamento e o congelamento é necessário a criação de um fluxo de calor em sentido contrário ao do gradiente térmico natural, que segundo a segunda lei da termodinâmica necessita energia utilizável, que esta pode ser mecânica, elétrica ou calorífica. A quantidade de calor a ser retirada de um corpo na unidade de tempo é chamada de potência frigorífica ou carga térmica de refrigeração, que são mostradas como toneladas de refrigeração (TR), medida em frigorias por hora (fg/h). Frigoría é uma quilocaloria retirada, ou quilocaloria negativa conforme estudos termodinâmicos.

Para formar um circuito de refrigeração ou frigorígeno são necessários quatro componentes básicos, conforme apresentado na Figura 2, (i) compressor: promove a circulação de um fluido ou gás refrigerante por todo o sistema com o auxílio de um dispositivo de expansão, eleva a pressão no condensador, reduz a pressão no evaporador; (ii) o condensador: tem função de eliminar o calor absorvido pelo evaporador somado ao calor promovido pela compressão do compressor, com esta eliminação de calor, o fluido refrigerante que entra no condensador em forma de vapor se transforma em líquido; (iii) o evaporador: absorve o calor do ambiente interno e faz com que o fluido refrigerante que sai do dispositivo de expansão e entra neste em estado líquido evapora, ou seja, se transforma em vapor; (iv) o dispositivo de expansão: pode ser um tubo capilar, pistão ou válvula de expansão termostática (VET), sua função é restringir ou dificultar a passagem do fluido refrigerante líquido que vem do condensador para o evaporador, e isto provoca a elevação da pressão no condensador e uma redução brusca de pressão no evaporador (SILVA, 2010).

Figura 2: Componentes básicos do circuito de refrigeração, Temperatura e estado Físico

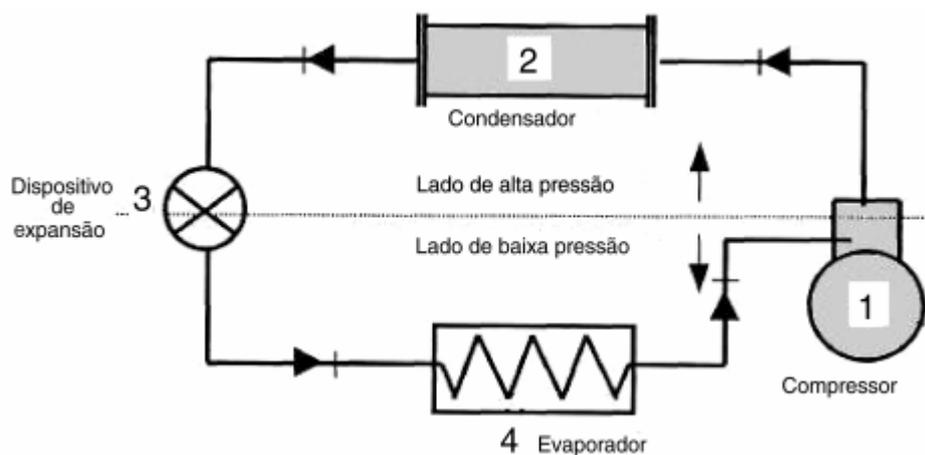


Fonte: Adaptado de Silva, 2010, p. 12.

Desta forma Silva (2010) demonstra o passo-a-passo o circuito de refrigeração ou refrigerante com as alterações da temperatura e estado físico do fluido.

Para as mudanças de pressão citadas acima verifica-se a Figura 3.

Figura 3: Sistema básico do circuito de refrigeração – Pressão



Fonte: Silva, 2010, p. 12.

Neste circuito Silva (2010) demonstra os locais de alta pressão e baixa pressão para a refrigeração.

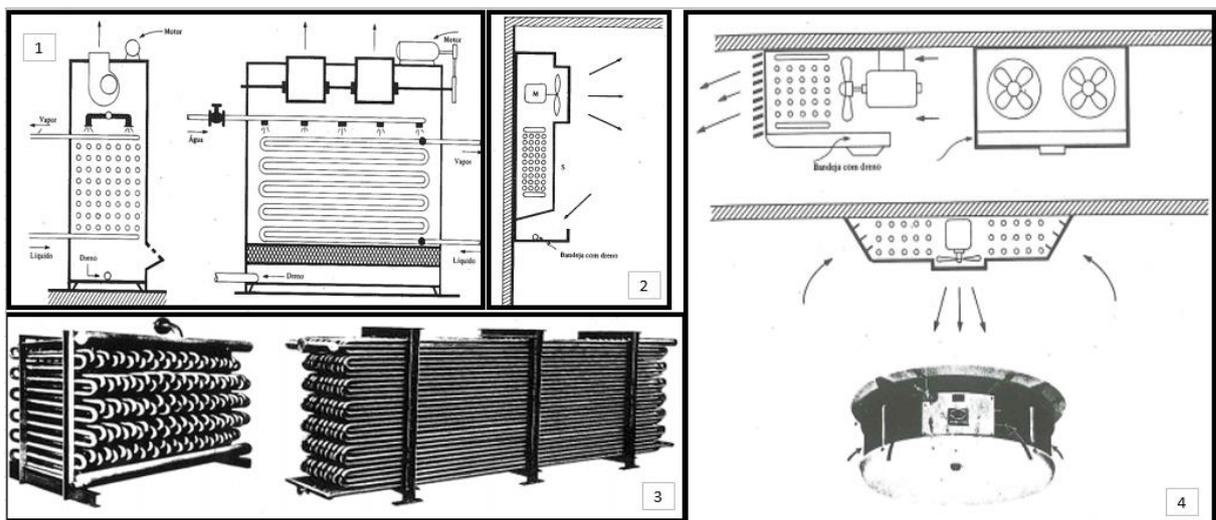
2.3.1 Resfriadores para superfície seca com circulação forçada de ar

Para Costa (1994), estes evaporadores também são conhecidos como unidades resfriadoras, *unit coolers*, ou condicionadores, normalmente construídos a partir de uma caixa metálica ou de alvenaria, na qual onde são instalados intercambiador de calor, um forçador de ar (ventilador) e um opcional de borrifador de água.

- Intercambiadores: são fabricados com tubos de aço de 5/8" a 1", lisos ou com aletas planas e helicoidais, de material aço zincado ou aletas de cobre ou alumínio dependendo do gás a se utilizar. As aletas são utilizadas em número máximo e 4 por polegada ou 160 por metro para temperaturas superiores a 0°C.
- Forçadores de ar: são utilizados ventiladores centrífugos como helicoidais. Suportando uma quantidade de ar de 1500 a 3000 m³/h por TR, que corresponde a uma troca de temperatura que varia de 3°C a 6°C (incluindo o calor latente).

Costa (1994) ainda apresenta alguns modelos de construção conforme Figura 4.

Figura 4: Modelos de condicionadores



Fonte: Adaptado de Costa, 1994, p. 114.

Conforme Costa (1994), na Figura 4 é apresentado (1) condicionador em forma de armário; (2) condicionador vertical; (3) condicionador de serpentina horizontal; (4) condicionador horizontal. Estes modelos demonstram a facilidade de usabilidade

conforme o ambiente a ser instalado, podendo ser instalado diretamente no piso, suspenso na parede, em corredores ou até mesmo suspenso no forro. As vantagens destes modelos são: construção compacta, a menor superfície de transmissão de calor (maior K) e boa distribuição do frio.

2.3.1 Conceitos básicos e variáveis do processo

2.3.1.1 Temperatura

Pena (2002) apresenta que esta é uma propriedade da matéria, considerada uma medida de nível energético de um corpo, para uma alta temperatura é indicado um alto nível de energia, é também uma função da energia cinética interna, sendo um índice da velocidade molecular, expressa em graus Celsius (°C), Fahrenheit (F) ou Kelvin (K).

2.3.1.2 Calor

Conforme Borgnakke; Sonntag (2013), calor é a forma de transferência de energia através da fronteira do sistema, com uma temperatura, para outro sistema ou ambiente que apresenta uma temperatura inferior. Sendo assim um fenômeno em trânsito e nunca estático em um corpo. Pode ser encontrado nas unidades: J (Joule, SI), lbfft (libra-pés-força) ou Btu (*British thermal unit*). Considera-se positivo o calor transferido para um sistema e negativo o calor recebido de um sistema. Pode ser calculada a transferência de calor por unidade de massa do sistema com a Equação 01:

$$q = \frac{Q}{m} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

q= calor específico transferido (J/kg)

Q= calor transferido (J)

M= massa (kg)

2.3.1.3 Calor específico

Calor específico é considerado a energia necessária para aumentar a temperatura em um grau de unidade de massa de dada substância (BORGNAKKE;

SONNTAG, 2013). Para sólidos ou substâncias incompressíveis é possível calcular o calor específico através da Equação 02:

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

ΔU = energia interna (J)

m= massa (Kg)

c= calor específico (kJ/Kg°C)

ΔT = Variação de temperatura (°C)

2.3.1.4 Calor sensível

Para Pena (2002) calor sensível é toda introdução ou remoção de calor em um corpo, variando sua temperatura sem mudar seu estado físico, considerando assim que a matéria perdeu ou recebeu calor sensível.

2.3.1.5 Calor latente

Conforme Pena (2002) calor latente, muito similar ao calor sensível, porém é toda a introdução ou remoção de calor de um corpo, variando o estado físico, por exemplo, líquido para vapor ou líquido para sólido e vice-versa.

2.3.1.6 Umidade relativa do ar

Pena (2002) deduz como sendo a relação entre as massas de vapor d'água presente em um volume e a massa de vapor que saturaria este volume com a mesma temperatura e pressão total. Pode ser definida pela Equação 03:

$$UR = \frac{m_{\text{vapor H}_2\text{O}}}{m_{\text{vapor H}_2\text{O máx.}}} \quad (\text{Eq. 03})$$

A umidade relativa do ar pode ser medida por higrômetros ou psicrômetros, consistem basicamente em dois termômetros, um com bulbo seco e outro com bulbo úmido. A temperatura indicada com bulbo seco é referente a mistura ar-vapor, é considerada a mesma temperatura para ambos elementos, ar e vapor. A temperatura indicada com bulbo úmido é obtida através de um termômetro com uma gaze molhada, expostos a uma corrente de ar até que o equilíbrio da temperatura da mistura ar-vapor/bulbo seja obtida, esta temperatura sempre será inferior à de bulbo seco (PENA, 2002).

Para Mesquita (1977), a umidade relativa do ar é expressa em porcentagem, relacionando a pressão parcial do vapor d'água no ar, a uma dada temperatura, e, a pressão de vapor d'água de saturação, à mesma temperatura.

2.3.1.7 Viscosidade cinemática do ar

Para Clezar; Nogueira (1999), considerando que na área de ventilação os níveis de pressão dos escoamentos são muito próximos a pressão atmosférica, a dependência da viscosidade com as variações de pressão pode ser desconsiderada, ficando somente em função da temperatura. A viscosidade cinemática é apresentada como uma derivada da viscosidade absoluta, para aplicações na ventilação é utilizado a Equação 04 para defini-la:

$$v = (13 + 0,1T) * 10^{-6} \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde:

v= coeficiente de viscosidade cinemática (m²/s)

T= temperatura do ar (°C)

2.3.1.8 Volume específico e massa específica do ar

Conforme Clezar; Nogueira (1999), o volume ocupado por uma massa de ar pode ser estimado pela equação dos gases perfeitos, conforme Equação 05:

$$V = \frac{m * R_{ar} * T}{P} \quad (\text{Eq. 05})$$

Onde:

V= volume (m³)

m= massa de ar (kg)

P= pressão absoluta do ar (Pa)

R_{ar} = constante do ar =287 J/kg.K

T= temperatura absoluta do ar (K)

Para encontrar o volume específico, usa-se a Equação 06:

$$\vartheta = \frac{V}{m} \quad (\text{Eq. 06})$$

Onde:

ϑ= volume específico (m³/kg)

Para encontrar a massa específica, usa a Equação 07:

$$\rho = \frac{P}{R_{ar}T} \quad (\text{Eq. 07})$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 08})$$

Onde:

ρ = massa específica (kg/m³)

2.3.1.9 Vazão volumétrica

Para Çengel; Ghajar (2012), vazão volumétrica é a quantidade de volume que escoar em um duto em uma unidade de tempo (V_v), pode ser calculada através da Equação 09:

$$V_v = VA = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (\text{Eq. 09})$$

Onde:

V_v = vazão volumétrica (m³/s)

V = volume (m³)

A = área de um duto circular (m²)

\dot{m} = vazão mássica (Kg/s)

ρ = densidade do fluido (Kg/m³)

2.3.1.10 Vazão mássica

Para Çengel; Ghajar (2012), vazão mássica é a quantidade de massa que escoar em um duto em uma unidade de tempo (\dot{m}), pode ser calculada através da Equação 10:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

\dot{m} = vazão mássica (Kg/s)

V = volume (m³)

A = área de um duto circular (m²)

ρ = densidade do fluido (Kg/m³)

2.3.1.11 Viscosidade absoluta

Conforme Clezar; Nogueira (1999), o coeficiente de viscosidade absoluta pode ser obtido através da Equação 11:

$$\mu = \nu \rho \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

μ = coeficiente de viscosidade absoluta (kg/m.s)

2.3.1.12 Pressão estática

Conforme Clezar; Nogueira (1999), pressão estática (P_e) é a função do estado termodinâmico do escoamento o ar, exercida igualmente em todas as direções, também conhecida como pressão termodinâmica.

2.3.1.13 Pressão da velocidade

Conforme Clezar; Nogueira (1999), pressão de velocidade (P_v) é associada a energia cinética do escoamento do ar. Em razão da inércia do fluido, é também conhecida como pressão dinâmica, pode ser calculada com a Equação 12:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

P_v = pressão da velocidade (Pa)

V = velocidade (m/s)

2.3.1.14 Pressão total

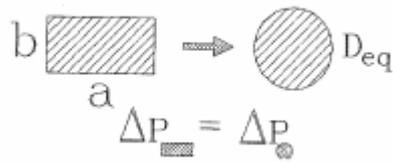
Conforme Clezar; Nogueira (1999), pressão total (P_t) é a soma da pressão estática e pressão da velocidade, resulta da desaceleração do fluido até o repouso, também conhecida como pressão de estagnação, conforme Equação 13:

$$P_t = P_e + P_v \quad (\text{Eq. 13})$$

2.3.1.15 Cálculo para diâmetros equivalentes

Conforme Clezar; Nogueira (1999), na determinação da perda de carga em dutos de seção não circular é realizada utilizando o cálculo de diâmetro equivalente, baseia-se na determinação do diâmetro de um duto circular, igual ao duto de seção qualquer, ou seja, assim o diâmetro de um duto de seção retangular tem as mesmas perdas de carga, por unidade de comprimento de um duto circular, conforme Figura 5. Pode ser calculado através da Equação 14, quando a velocidade é constante ou pela Equação 15, quando a vazão é constante.

Figura 5: Ilustração de diâmetro equivalente



Fonte: Clezar; Nogueira, 1999, p. 39

$$D_{eq} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$D_{eq} = 1,3 * \frac{(a \cdot b)^{0,625}}{(a + b)^{0,625}} \quad (\text{Eq. 15})$$

2.3.1.16 Entalpia

Conforme Silva (2010) apresenta, entalpia é uma propriedade das substâncias que corresponde a quantidade de energia térmica ou calor total, por exemplo, quando o fluido refrigerante absorve energia sua entalpia aumenta, ao contrário de quando o fluido refrigerante perde energia.

Borgnakke; Sonntag (2013), a entalpia ocorre quando a transferência de calor em um processo quase estático a pressão constante, incluindo variação de energia interna e trabalho no processo. Os valores tabelados da entalpia se encontram no Anexo A. Podem haver casos em que não se encontre o valor da energia interna, então o mesmo pode ser calculado pela Equação 16:

$$u = h - Pv \quad (\text{Eq. 16})$$

Para Silva (2010), na análise térmica de processos são encontradas combinações de propriedades termodinâmicas, sendo uma delas a entalpia que ocorre quando se tem um processo de pressão constante, definida pela Equação 17:

$$h = u + Pv \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

h= entalpia

u= energia interna

P= pressão

v= volume específico

Para Pena (2002), entalpia é uma variável termodinâmica de posição ou quantidade, considera-se diferenças de entalpias, isso corresponde a quantidade de calor trocado pelo ar entre duas posições.

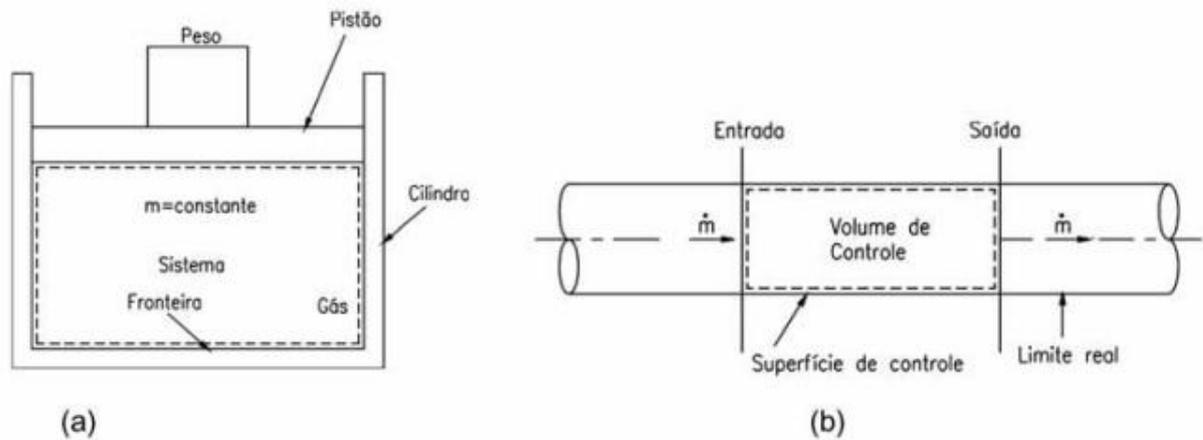
2.4 TERMODINÂMICA

2.4.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica

Segundo Bernnett; Myers (1978), a partir da visualização de um problema deve-se considerar o lado externo do envoltório físico, as variações internas deste envoltório são medidas através das correntes que entram e saem deste processo e as variações de energia do mesmo, através disso pode-se considerar o balanço global de energia aplicado junto a primeira lei da Termodinâmica, estas considerações podem ser tomadas também para o balanço global de massa. Usualmente se considera somente o lado externo do envoltório para o balanço, em caso de necessitar envolver o envoltório interno, deve-se envolver balanços semelhantes para um volume pequeno ou diferencial. Os balanços diferenciais podem ser integrados para situações onde conhece-se algumas propriedades características do fluido, tal como viscosidade de um líquido.

Silva (2010), conceitua a Primeira Lei da Termodinâmica como “Princípio de Conservação de Energia”, onde a energia não pode ser criada e nem destruída, mas sim transformada. Para efetuar um balanço de energia é necessário conceituar o sistema termodinâmico, este consiste em uma quantidade de matéria ou região para qual a atenção é voltada, ou seja, demarca-se um sistema em função do que se procura analisar, tudo que estar fora desta marcação é conhecido como vizinhança, é delimitado pelas fronteiras, que podem ser móveis, fixas, reais ou imaginárias. O sistema pode ser aberto ou fechado, conforme Figura 6.

Figura 6: Demonstração de sistema aberto e fechado



Fonte: adaptado, Silva (2010), p. 24

Na Figura 6 é visível que o sistema fechado (a), corresponde a uma região onde não ocorre o fluxo de massa através das fronteiras e no sistema aberto (b) ocorre a transição de massa através das fronteiras sendo conhecido também como volume de controle (SILVA, 2010).

Silva (2010) estabelece que para realizar o balanço de energia é necessário estabelecer um intervalo de tempo, realizar o somatório dos fluxos de energia entrando no volume de controle que é igual ao somatório dos fluxos de energia saindo do volume de controle mais a variação da quantidade de energia armazenada pelo mesmo intervalo de tempo considerado. Podendo ser calculado com a Equação 18:

$$\sum E_{entrada} = \sum E_{saída} + \frac{\Delta E_{vc}}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde:

$E_{entrada}$ = energia entrando no volume de controle

$E_{saída}$ = energia saindo do volume de controle

E_{vc} = quantidade total de energia armazenada no volume de controle

Δt = intervalo de tempo considerado

Silva ainda ressalta que para avaliar a energia, quando se trata em estado termodinâmico, é necessário avaliar como energia potencial (E_p), energia cinética (E_c) e energia interna (U). A energia cinética e potencial é dada pelas Equações 19 e 20, e a energia interna está associada ao movimento ou força intermolecular da substância em análise.

$$E_p = mgz \quad (\text{Eq. 19})$$

Onde:

E_p = Energia potencial

m = massa (kg)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

z = altura de elevação em consideração com o sistema (m)

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde:

V = velocidade do sistema (m/s)

Com estas equações é possível determinar a equação a Primeira Lei da Termodinâmica, conforme Silva (2010) na Equação 21:

$$\Sigma Q = \Sigma_{entrada} m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \Sigma_{saída} m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) + \Sigma W \quad (\text{Eq. 21})$$

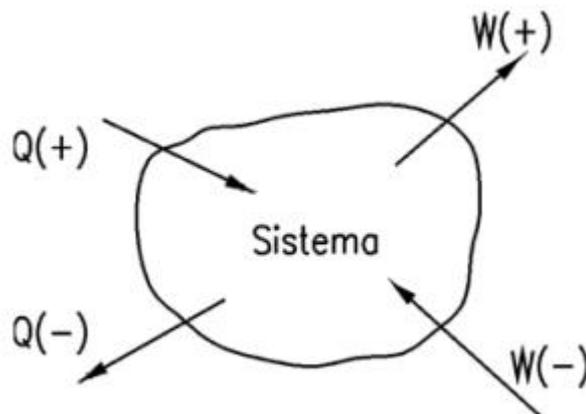
Onde:

m = vazão mássica (kg/s)

h = entalpia (J/kg)

Com base nisto Silva (2010) demonstra com uma figura como irá funcionar a convenção de sinais, conforme Figura 7:

Figura 7: Convenção de Sinais para Primeira Lei da Termodinâmica



Fonte: Silva (2010), p.27

Onde todo calor que entra e se transforma em trabalho que saíndo tem sinal positivo e todo trabalho que entra e gera calor saíndo tem sinal negativo.

2.5 VENTILAÇÃO

Para Pena (2002), ventilação é quando o ar é introduzido em um ambiente a fim de controlar a sua temperatura, tendo como limite a temperatura exterior, remove energia térmica gerada no seu interior por pessoas, equipamentos, entre outros. Não permite que seja determinado um valor fixo para o controle da temperatura pois depende da temperatura externa ao ambiente em estudo.

Conforme Costa (2005), ventilação é a renovação de ar de um ambiente, seu principal objetivo é controlar a pureza e o deslocamento do ar em um ambiente fechado, embora, dentro de certos limites a substituição do ar também pode se controlar a temperatura e a umidade do ambiente.

Para Mesquita et al (1977), ventilação é um dos métodos disponíveis para controle de um ambiente ocupacional, consiste na movimentação de quantidades relativamente grande de ar através de espaços confinados, objetivando uma melhoria do ambiente pelo controle da temperatura, da umidade, da velocidade, da distribuição e da pureza do ar. Pode ser classificada em ventilação geral para manutenção do conforto, onde através do restabelecimento as condições do ar, alteradas pela presença deste, ou da refrigeração e do aquecimento do ar; e ventilação geral para manutenção da saúde e segurança do homem, através do controle da concentração de gases, vapores e partículas emitidas no ar ocupacional.

2.5.1 Ar de ventilação

Conforme Pena (2002), o ar de ventilação é conhecido como renovador do ar interno que é depreciado, tanto pela queima por metabolismo humano ou pela agregação de poluentes internos. Este ar se encontra externamente e ao admiti-lo introduz uma carga térmica sobre o sistema, condicionador de ar. Assim que calculado a taxa de admissão, também chamada de vazão, e o salto entálpico, diferença entre a condição do ar exterior / ar interior, a carga térmica introduzida pode ser estimada.

Para Costa (2005), para ventilação permanente de ambientes onde são produzidas grandes quantidades de calor e sem grande poluição, como por exemplo: salas de máquinas, de caldeiras, de fornos, cozinhas, churrasarias, etc. ou mesmo ambientes com grande carga de insolação, no quais se deseja manter uma temperatura interna pouco superior à do exterior, pode-se calcular a quantidade de ar necessária conforme a Equação 22:

$$V = \frac{Q}{\rho C_p (t_r - t_e)} \quad (\text{Eq. 22})$$

Onde:

V = quantidade de ar necessária (m³/h)

Q = calor a ser arrastado do ambiente, por meio da renovação do ar (kJ/h ou kcal/h)

ρ = massa específica do ar, em condições ambiente médias vale 1,2 kg/m³

C_p = calor específico à pressão constante do ar que igualmente vale 1,009 kJ/kg.°C (0,241 kcal/kg.°C)

t_r = temperatura interna

t_e = temperatura externa

Para definir o calor (Q) utiliza-se a diferença entre a quantidade de calor produzida no recinto por todos os elementos que representam fontes de calor e a quantidade de calor trocada com o exterior por transmissão, em vista da diferença de temperatura recinto/exterior (COSTA, 2005).

Conforme Costa (2005), a ventilação natural tem um índice de renovação do ar da ordem de 1 a 2, onde disposições adequadas das aberturas de ventilação possam aumentar muito esse valor, já com o uso de ventilação artificial atinge-se um número de 6 a 20. Cita a empresa de ventiladores Clarage (EUA) onde recomenda o uso dos valores do Quadro 1.

Quadro 1: Valores recomendados de renovação de ar

Índice de renovação de ar	
Ambiente	n
Auditórios, igrejas, túneis, estaleiras	6
Fábricas, oficinas, escritórios, lojas, salas de diversões	10
Restaurantes, clubes, garagens, cozinhas	12
Lavanderias, padarias, fundições, sanitários	20

Fonte: adaptado pela autora de Costa (2005), p.33

Para valores superiores a 20 considera-se casos excepcionais e deve ser tomado cuidados especiais, a fim de evitar deslocamento de ar com velocidade excessiva (COSTA, 2005).

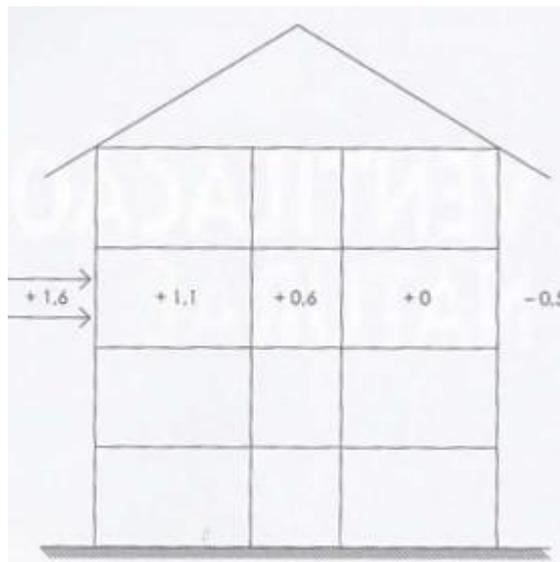
Costa (2005) traz que existem dois tipos de ventilação, a natural ou espontânea e a forçada ou artificial.

- Ventilação natural ou espontânea: é aquela que ocorre através da diferença de pressões naturais, ocasionadas pelos ventos e gradientes de temperatura existentes através das superfícies que delimitam o ambiente considerado;
- Ventilação forçada ou artificial: é aquela por qual o ar se movimenta por meios mecânicos, podendo ser geral diluidora, onde o ar novo se mistura com o ar ambiente diluindo seus contaminantes antes de sair o recinto, diluidora por exaustão, onde quando o ambiente é sujo, como por exemplo fundições ou oficinas, ou excessivamente quente, como por exemplo casas de máquinas, fornos, etc., prefere-se extrair o ar deixando que o ar exterior penetre através de aberturas naturais, ou local exaustora utilizada em locais onde os contaminantes podem ser retirados do recinto antes que se espalhem, como na maior parte das operações industriais, é a mais indicada por ser mais eficiente e econômica.

2.5.2 Ventilação natural

Como citado anteriormente, para Costa (2005), a ventilação natural é provocada pelos ventos, embora que intermitente ocasiona escalonamento das pressões externas no sentido horizontal, conforme Figura 8.

Figura 8: Ação dos ventos em relação a pressão



Diferenças de pressões na ordem de 0,5N/m², já são suficientes para obter correntes de ar satisfatórias desde que haja caminho adequado para elas.

Para Mesquita et al (1977), ventilação natural é o deslocamento controlado ou intencional de ar através de aberturas específicas (janelas e portas), o fluxo de ar que entra ou sai de um edifício depende da diferença de pressão entre o interior e o exterior da estrutura e a resistência ao fluxo de ar oferecidas pelas aberturas do prédio. Esta diferença de ar pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar fora e dentro do edifício.

Para Clezar; Nogueira (1999), ventilação natural é aplicada em edifícios industriais, públicos habitações e garagens. Acontece pelos diferenciais de pressão disponíveis para movimentação do ar, decorrentes do vento e das diferenças de temperatura entre o ar exterior e interior, podendo agir de forma separada ou combinada, dependendo das condições atmosféricas, do projeto e da localização do edifício.

Conforme Mesquita et al (1977), a ventilação por forças naturais encontra aplicação em edifícios industriais, públicos, escolas, habitações e garagens. As forças naturais utilizadas para movimentação do ar são a força do vento e as diferenças de temperatura entre o interior e exterior. Em problemas com remoção de calor, conhecida como a quantidade de calor a ser removida, e selecionando uma diferença de temperatura desejável, a quantidade de ar que deve atuar por hora para manter a diferença de temperatura é determinada pela Equação 23:

$$Q = \frac{C_r}{c_p \cdot \rho \cdot 60(T_i - T_e)} = \frac{C_r}{1,08(T_i - T_e)} \quad (\text{Eq. 23})$$

Onde:

Q= vazão de ar (pés³/min)

C_r= calor removido (Btu/h)

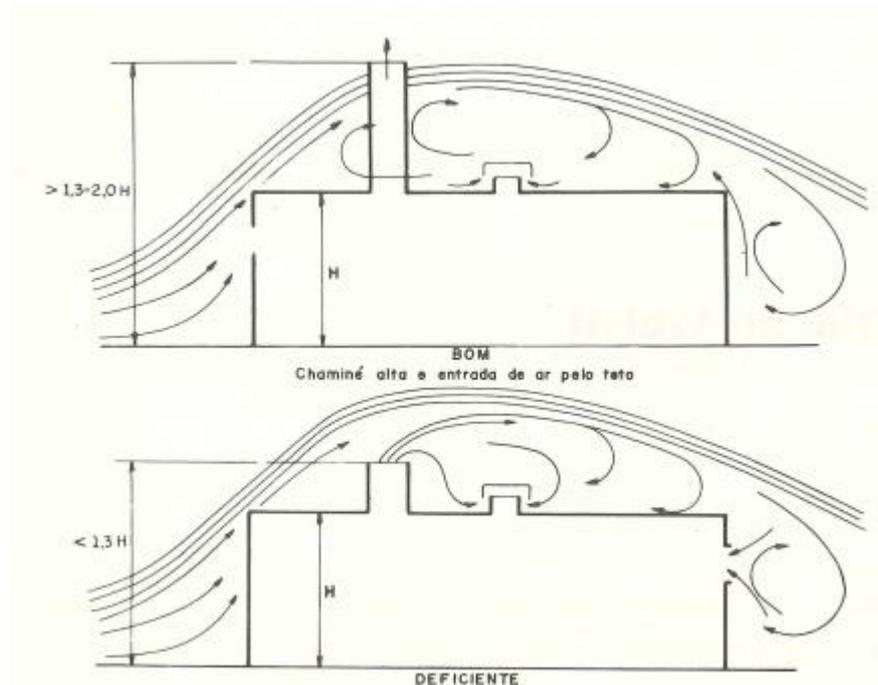
C_p= calor específico a pressão constante (0,24 Btu/lb.°F)

ρ= massa específica do ar (70°F ou 21,1°C 29,92 pol Hg ou 0,075lb/pé³)

T_i – T_e= diferença de temperatura (°F)

Para Macintyre (1990), a ventilação natural consiste em entrada e saída do ar de um ambiente de forma controlada e intencional através de aberturas para este fim. O fluxo de ar depende do ar que penetra ou sai pelas aberturas através da diferença de pressão (interna e externa), da resistência das aberturas do prédio, pode-se ver um exemplo na Figura 9.

Figura 9: Resistência da passagem do ar - Chaminé



Fonte: adaptado pelo autor de Macintyre (1990), p.38

Pode ser visto que com chaminé alta e entrada de ar pelo teto (1) e Chaminé com baixa e entrada pelo teto e pelas janelas (2).

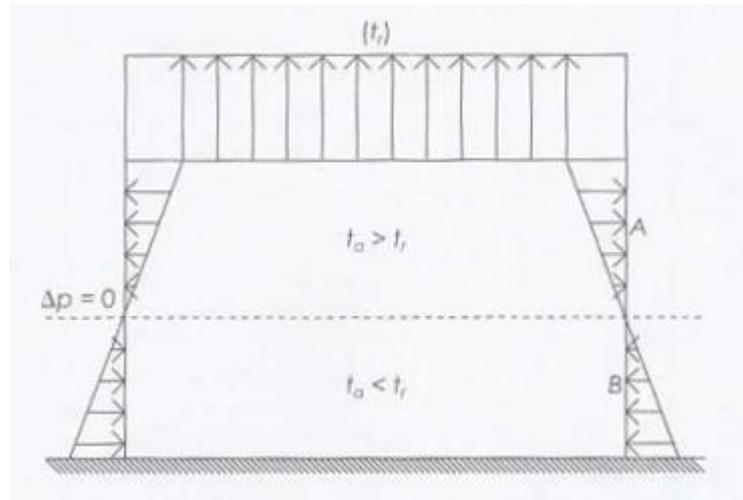
Costa (2005), traz que a diferença de pressão devido ao deslocamento de ar (pressão dinâmica) é dado pela energia acumulada por unidade de volume, ao passar do repouso para a velocidade correspondente. Com efeito de que uma massa de ar passe do repouso para uma velocidade num tempo se adquire energia.

Para Costa (2005), a ventilação provocada através da ação dos ventos pode ser intensificada através de aberturas dispostas convenientemente.

2.5.2.1 Ventilação por diferença de temperatura

Costa (2005), traz que o aquecimento do ar de um ambiente provoca redução de sua massa específica, com a conseqüente formação de diferença de pressão, em relação ao exterior, que se apresentam na parte superior, conforme Figura 10.

Figura 10: Escalonamento da diferença das pressões para um ambiente com aquecimento

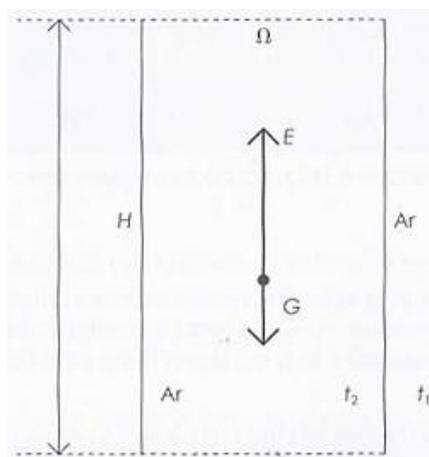


Fonte: Costa (2005), p.38

A diferença de pressão criada por uma coluna de ar quente em um ambiente a uma temperatura definida, superior a outra temperatura, depende destas temperaturas e da altura da coluna. Aplica-se o princípio de Arquimedes, conhecido também como efeito termossifão ou chaminé, conforme Figura 11 (COSTA, 2005).

O efeito de diferença de densidade é conhecido por efeito chaminé, quando a temperatura interna do recinto é maior que a exterior, produzindo uma pressão interna negativa e um fluxo de ar que entra pelas partes inferiores, o que causa uma pressão interna positiva e um fluxo de ar que sai na parte superior do edifício. O inverso ocorre quando a temperatura interior é menor que a exterior (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1977).

Figura 11: Efeito chaminé ou termossifão



Fonte: Costa (2005), p.38

De acordo com a lei de Gay Lussac, os pesos específicos ou massas específicas são inversamente proporcionais a sua temperatura absoluta. Para as variações de temperatura e desníveis usuais na prática, a partir de uma temperatura definida como a mais desfavorável do verão ($t_1 = 32^\circ\text{C}$), obtêm-se o Quadro 3 (COSTA, 2005).

Quadro 2: Diferenças de pressão obtidas por termossifão

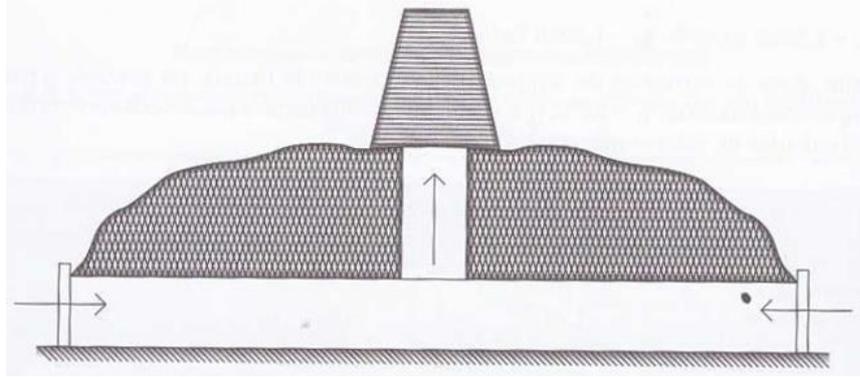
Diferença de temperatura	H (m)	ΔP (N/m ²)	ΔP (kgf/m ²)
3	2	0,2211	0,02255
	4	0,4422	0,04509
	10	1,1055	0,11273
	20	2,2109	0,22545
	30	3,3164	0,33818
6	2	0,438	0,04466
	4	0,8759	0,08932
	10	2,1896	0,22328
	20	4,3793	0,44656
	30	6,5689	0,66984
10	2	0,7206	0,07348
	4	1,4412	0,14696
	10	3,6031	0,36741
	20	7,2061	0,73482
	30	10,8092	1,10223

Fonte: Costa (2005), p.39

Os valores do quadro 3 nos trazem que as diferenças de pressão através das variações de temperatura do ambiente em relação a temperatura exterior (COSTA, 2005).

Costa (2005), traz que a diferença de nível entre as temperaturas de entrada e saída do ar é importante, elas podem ser aumentadas por meio de canais adicionais, técnica utilizada na ventilação de minas, túneis e mesmo ambientes industriais também conhecido como chaminés de ventilação, semelhantes a Figura 12.

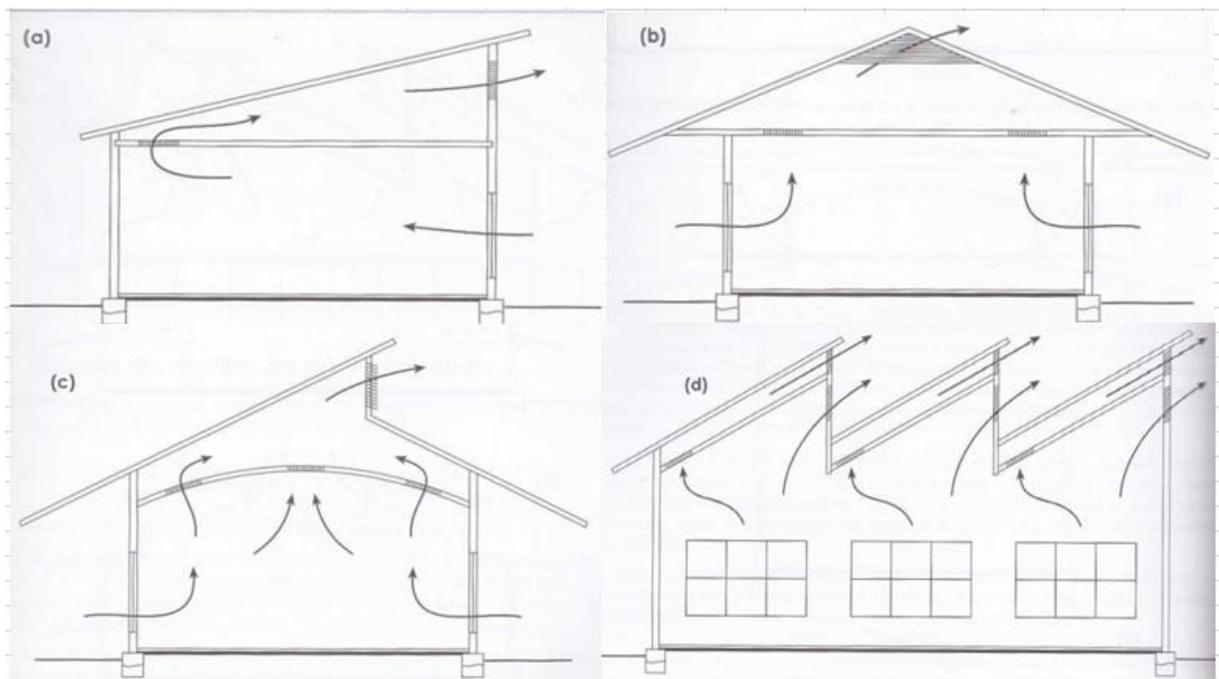
Figura 12: Chaminés de Ventilação



Fonte: Costa (2005), p.40

Esta é uma solução adotada na construção de aberturas (de residências, pavilhões industriais), as quais acrescentam ventilação natural, permitem arrasto do calor de insolação das coberturas, conforme Figura 13.

Figura 13: Exemplos de aberturas para ventilação natural



Fonte: Costa (2005), p.41 - 42

2.5.3 Ventilação mecânica diluidora

Conforme Costa (2005), é quando a movimentação de ar de ventilação é obtida por diferenças de pressão criadas mecanicamente. Adota-se este método sempre que os meios naturais não proporcionam o índice de renovação de ar desejado, ou como

elemento de segurança nas condições de funcionamento precário da circulação natural do ar, podendo ser geral diluidora ou local exaustora.

Para Mesquita et al (1977), ventilação diluidora é um método de insuflar ar em um ambiente ocupacional, de extrair ar desse ambiente, ou ambos a fim de reduzir os contaminantes.

Neste tipo de ventilação mecânica, o ar exterior de ventilação é misturado com o ar viciado do ambiente, assim, diluindo os contaminantes até limites admissíveis, é a ventilação adotada quando se tem dificuldade de capturar o contaminante antes que seja dissipado no ambiente, como em locais onde a poluição é ocasionada por pessoas ou fontes esparsas de calor ou poluentes (COSTA, 2005).

Conforme Macintyre (1990), est tipo de ventilação é utilizada quando a ventilação natural não possui condições de confiabilidade e eficiência para atender a vazão, temperatura e umidade desejada. Pode ser utilizado um ou mais ventiladores para enviar o ar exterior para o interior do recinto desejado.

Para Clezar; Nogueira (1999), a ventilação geral diluidora pode ser aplicada para ventilar salas com grande desprendimento de calor, para este caso o balanço de energia é efetuado para se determinar a vazão de ar a ser insuflada para remoção e calor sensível, em regime permanente tem-se a Equação 24:

$$\dot{q}T = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (\text{Eq. 24})$$

Onde:

$\dot{q}T$ = carga térmica total (W)

\dot{m} = vazão mássica (kg/s)

Podendo ser calculada através da Equação 25:

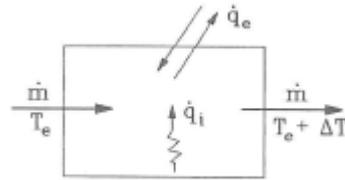
$$\dot{m} = \rho VA \quad (\text{Eq. 25})$$

c_p = calor específico do ar (J/kg.°C)

ΔT = aumento da temperatura do ar (°C)

O mesmo autor ilustra a Figura 14 para melhor entendimento do processo.

Figura 14: Ilustração da remoção o calor sensível



Fonte: adaptado pelo autor de Clezar; Nogueira (1999), p.80

Clezar; Nogueira (1999), também citam a ventilação geral diluidora para aplicações gerais, como por exemplo onde tem alto número de pessoas ou onde a geração de contaminantes oferecem pouco risco a saúde dos ocupantes, podendo calcular a vazão pela Equação 26:

$$Q_e = N * V \quad (\text{Eq. 26})$$

Onde:

N= número de trocas de ar por hora, conforme Quadro 3.

V= Volume (m^3)

Quadro 3: Trocas de ar por hora

Situação	Trocas de ar por hora - N
Auditórios e salas de reunião	4 - 6
Casas de caldeiras	20 - 30
Salas de máquinas	20 - 30
Oficinas	6 - 10
Fundições	20 - 30
Salas de fornos	30 - 60
Garagens	6 - 8
Hospitais, geral	4 - 6
Salões de pintura	30 - 60
Casas de carnes	6 - 10
Residências	1 - 2

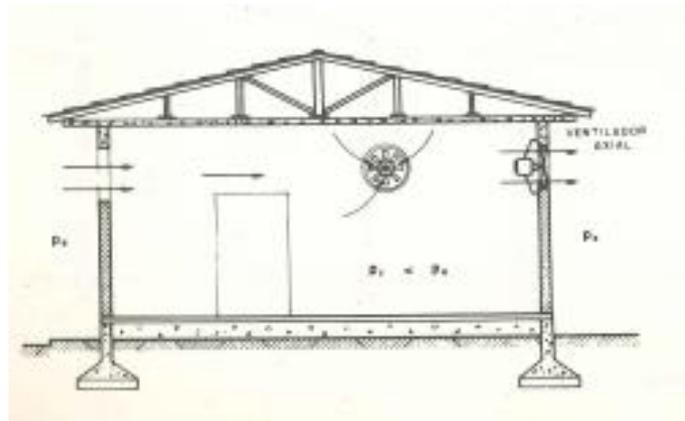
Fonte: adaptado pela autora de Clezar; Nogueira (1999), p.88

2.5.4 Ventilação local exaustora

Mesquita et al (1977), cita que a ventilação exaustora tem como objetivo principal a proteção do trabalhador, uma vez que capta os poluentes de uma fonte antes que os mesmos se dispersem no ar do ambiente de trabalho.

Conforme Macintyre (1990), é quando um ou mais exaustores removem o ar do interior do recinto. Deve ser instalado na parede oposta à de admissão do ar e em nível mais alto possível em relação ao piso, em casos que isso não é possível deve ser considerada a utilização de dutos. Pode ser visto um exemplo na Figura 15.

Figura 15: Exemplo de ventilação exaustora



Fonte: Macintyre (1990), p. 74

Macintyre (1990), nos mostra um ventilador de cobertura, onde o motor fica isolado do ar removido e é ventilado pelo ar exterior.

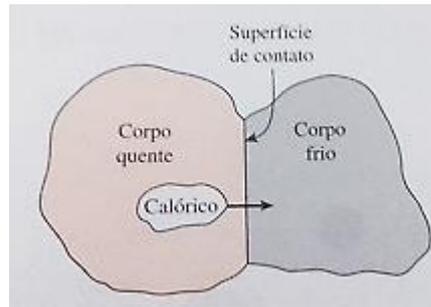
Para Clezar; Nogueira (1999), ventilação local exaustora é um meio de remover o contaminante junto ao ponto que ele é gerado, evitando se espalhar pelo ar do recinto, necessitando quantidades menores de ar.

Para Costa (2005), é aquela que extrai o contaminante mecanicamente no próprio local em que ele é produzido, antes de se espalhar pelo ambiente. O ar extraído do ambiente é substituído por igual quantidade de ar exterior, contribuindo assim para a renovação do ar.

2.6 FENÔMENOS DE TRANSPORTE

Para Borgnakke; Sonntag (2013) é o transporte de energia em virtude da diferença de temperatura entre quantidades de matéria. O calor tende a fluir do corpo mais quente para o mais frio, conforme Figura 16 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Figura 16: Fluxo do ar



Fonte: Çengel; Ghajar (2012), p. 4

2.6.1 escoamentos laminar e turbulento

Um fluido escoando em um tubo de diâmetro pequeno ou com baixas velocidades, assim o faz em um escoamento laminar, também chamado de escoamento viscoso ou de linhas de corrente. As camadas de fluido deslizam umas sobre as outras sem que ocorra uma mistura macroscópica e a velocidade, em escoamento macroscópico, em regime estacionário, é constante em qualquer ponto. Em velocidades mais elevadas o escoamento se torna turbulento; há mistura, ocasionada por turbilhões, entre as camadas e mesmo em regime estacionário a velocidade em um ponto oscila ao redor de um valor médio, pode-se verificar na Figura 17 estes comportamentos (BERNETT; MYERS, 1978).

Figura 17: Escoamento laminar e turbulento



Fonte: Çengel; Ghajar (2012), p. 379

Gioretti (2015) demonstra um método de visualizar essa transição de escoamento laminar a escoamento turbulento. Em um tubo incolor é adicionado um líquido colorido onde é verificado inicialmente uma transição laminar e aos poucos ocorrem pequenas oscilações, que se inicia o escoamento turbulento, e por último o estado de transição completamente turbulento.

Çengel; Ghajar (2012), apresenta que pode-se classificar os fluidos por laminar ou turbulento determinando o número de Reynolds, conforme Equação 27:

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde:

Re= número de Reynolds

V = velocidade de escoamento livre

L= comprimento característico da geometria (m)

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

μ = viscosidade dinâmica (kg/m.s)

Quando encontrado números grandes para Reynolds, é considerado que o fluido é turbulento, ou seja, as forças da inércia são grandes em relação às forças viscosas. Quando o número é baixo diz-se que o escoamento é laminar, ou seja, as forças viscosas são grandes o suficiente para suprir estas flutuações e manter o fluido alinhado.

2.6.2 Fluxo de quantidade de movimento

Segundo Bernnett; Myers (1978), a tensão de escoamento (T) é a quantidade de movimento por unidade de área/segundo, podendo ser encontrada nas unidades (g)(cm/s)/(cm²)(s), conforme Equação 28.

$$\tau = u * \frac{du}{dy} \quad (\text{Eq.28})$$

Onde :

T = tensão de cisalhamento

u = viscosidade o fluido

du/dy = taxa de deformação, onde du é a velocidade e dy a camada do fluido.

O mesmo ainda destaca que a viscosidade de um gás aumenta com o aumento da temperatura; a viscosidade de um líquido, que é muito maior que a viscosidade da mesma substância no estado de vapor, à mesma temperatura, diminui com o aumento da temperatura. Para um gás ideal a viscosidade é independente a pressão, mas para os gases reais e de líquidos a viscosidade aumenta com o aumento da pressão.

2.6.3 Transporte de calor

Para Bernnett; Myers (1978), transferência de calor é o transporte de energia que ocorre devido a diferença de temperatura. Existem alguns mecanismos que possibilitam esta troca de calor: condução, convecção e radiação.

- **Condução:** o calor é conduzido pelo transporte de energia de movimento entre moléculas adjacentes.
- **Convecção:** transporta porções e a mistura macroscópica de elementos de líquido ou gás. O transporte é parcialmente regido pela mecânica dos fluidos, uma vez que o fenômeno envolve movimento de fluidos. Quando é introduzida por diferença de densidades resultantes de diferenças de temperaturas no seio do fluido, chama-se de convecção natural, se o movimento é através de forças externas chama-se de convecção forçada.
- **Radiação:** ocorre devido ao transporte de energia por radiação eletromagnética, ou fótons, com uma certa faixa de comprimentos de onda. As mesmas leis que regem a faixa especial de comprimentos de onda, mais conhecida como luz visível, regem também as radiações de energia conhecidas como calor. A radiação ocorre através de gases, líquidos e sólidos, estes meios absorvem alguma ou toda energia, e esta é irradiada através do espaço vazio.

2.6.4 Condutividade térmica

Para Bernnett; Myers (1978), a condução de calor através de gases ocorre basicamente pelo movimento randômico, difusão e colisão, ou seja, as moléculas gasosas de alta temperatura difundem-se entre as moléculas gasosas de baixa temperatura, colidem com elas e cedem energia cinética. Ressalta que existe relação entre viscosidade e condutividade térmica de um gás. A viscosidade de um gás é a medida do arraste exercido pela difusão de moléculas gasosas de uma região que se move a uma velocidade média para o seio das moléculas de uma região que se move com outra velocidade média, similar a condução do calor, exceto que no caso da condução, a quantidade transportada é a energia cinética, associada ao movimento randômico das moléculas, em lugar da quantidade de movimento. As condutividades

térmicas de gases, líquidos e sólidos são dependentes da temperatura. O aumento da temperatura acarreta no aumento da condutividade dos gases e diminuição da condutividade nos líquidos e sólidos – existem exceções.

Para Silva (2010), a transferência de calor por condução se dá pela interação de moléculas de um material, diretamente proporcional a diferença de temperatura e inversamente proporcional à resistência do sistema, pode ser correlacionada a Lei de Fourier, como na Equação 29:

$$Q = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Eq.29})$$

Onde:

Q = Fluxo de calor (W)

k = condutividade térmica (W/m.K)

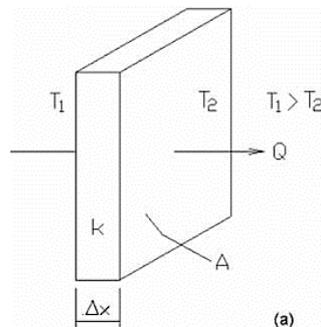
A= área do fluxo de calor (m²)

ΔT= diferença de temperatura (K)

Δx= espessura da placa (m)

Para melhor entendimento da equação Silva (2010) apresenta a Figura 18:

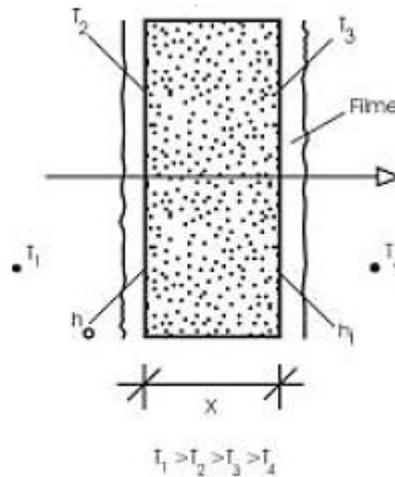
Figura 18: Mecanismos de transferência de calor



Fonte: Silva (2010), p. 28

Para Pena (2002), condução envolve a transferência de energia entre as moléculas dentro de um corpo, por contato físico, podendo ser em corpos sólidos, líquidos ou entre eles. A condução através de um corpo depende de sua área, resistência térmica do material predominante no corpo, condutibilidade térmica, espessura e da diferença de temperatura sendo exemplificada na Figura 19.

Figura 19: Condução



Fonte: Pena, 2002 p.35

Onde estão sendo apresentado o fluxo térmico (ϕ) em kcal/h ou BTU/h, a área (A) em m² ou ft², coeficiente de película externo e interno (h_0 e h_1) em BTU/h.ft².F ou kcal/h.m².°C, espessura da parede (X), temperaturas (T1, T2, T3 e T4) em F ou °C (Pena, 2002). Através destas variáveis obtém-se as equações de fluxo térmico:

$$\frac{\phi}{A} = h_o (T_1 - T_2) \quad (\text{Eq.30})$$

$$\frac{\phi}{A} = \frac{k}{x} (T_2 - T_3) \quad (\text{Eq.31})$$

$$\frac{\phi}{A} = h_i (T_3 - T_4) \quad (\text{Eq.32})$$

Se realizar o somatório tem-se:

$$T_1 - T_4 = \frac{\phi}{A} \left(\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o} \right) \quad (\text{Eq.33})$$

$$\text{Se, } \frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o}$$

Então:

$$\phi = AU(T_1 - T_4) \quad (\text{Eq.34})$$

O autor Çengel; Ghajar (2012) apresenta a Equação 63 para determinar o fluxo de calor:

$$Q = \phi \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 35})$$

Onde:

Q= calor transferido (J)

ϕ = taxa de transferência (W)

Δt = tempo de transferência

Com isso Pena (2002) ressalta que o fluxo térmico é proporcional a área, ao diferencial de temperatura e ao coeficiente h , que representa o coeficiente Global de Transmissão de Calor, na unidade de BTU/h.ft².F ou kcal/h.m².°C.

2.6.5 Convecção

O transporte de calor resultante da condução e escoamento fluido simultâneo foi definido como convecção forçada, quando o movimento é decorrente principalmente de um gradiente de pressão ocasionado por uma bomba ou ventilador, e como convecção natural quando este movimento é provocado somente pela diferença de densidade associada a temperatura (BENNETT; MYERS, 1978).

Para Borgnakke; Sonntag (2013) o escoamento desloca matéria, que apresenta um nível energético, sobre ou próximo a uma superfície que apresenta uma temperatura diferente daquela do meio que escoar, como por exemplo o vento escoando sobre um edifício.

Para Silva (2010) convecção é o processo de transferência executado pelo escoamento de um fluido, que transporta energia de uma superfície ou para uma superfície. Esta é influenciada pelas características de escoamento de um fluido, como: perfil de velocidades e turbulência. Pode se calcular o coeficiente de convecção com o uso da Equação 36:

$$q = \alpha A \Delta T \quad (\text{Eq.36})$$

Onde:

α = coeficiente de convecção (W/m².K)

A = área (m²)

$\Delta T = (T_s - T_\infty) =$ Variação da temperatura (Temperatura superfície – Temperatura ambiente ou do ar)

Borgnakke; Sonntag (2013) traz uma tabela na qual apresenta alguns valores a serem utilizados como coeficientes de convecção, conforme Figura 20.

Figura 20: Valores para coeficiente de convecção

Natural convection	$h = 5-25$, gas	$h = 50-1000$, liquid
Forced convection	$h = 25-250$, gas	$h = 50-20\ 000$, liquid
Boiling phase change	$h = 2500-100\ 000$	

Fonte: Borgnakke; Sonntag (2013), p.104

Para Çengel; Ghajar (2012), o coeficiente de convecção pode ser calculado através da Equação 37:

$$\alpha = \frac{-k_{\text{fluido}} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (\text{Eq.37})$$

Onde:

α = coeficiente de convecção (W/m².K)

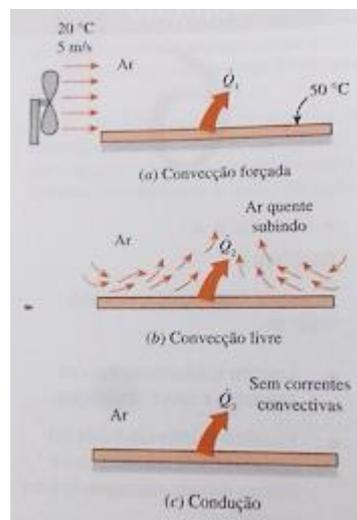
($T_s - T_\infty$) = Variação da temperatura (Temperatura superfície – Temperatura ambiente ou do ar)

k_{fluido} = condutividade térmica do fluido (W/m.K)

$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$ = Variação da temperatura ao longo do comprimento (K/m)

Para Pena (2002), convecção envolve a transferência de energia térmica dentro de um fluido, através de uma mistura, pode ocorrer naturalmente por diferença de densidade ou por interferência de um agente externo (ventilador, bomba, entre outros, conforme a Figura 21.

Figura 21: Transferência por convecção



Fonte: Çengel; Ghajar (2012), p. 374

A Figura 21 apresenta a movimentação de moléculas e um agente externo para auxiliar na homogeneização das mesmas.

2.6.6 Radiação térmica

A radiação térmica é emitida por todos os corpos que possuem temperatura maior que zero absoluto. Muitas vezes se torna insignificante, sua importância depende da quantidade de calor a ser transportada. Os corpos podem emitir, além da radiação térmica, energia sobre outras formas. Normalmente um corpo exposto a uma forma de radiação emite uma outra radiação conhecida como radiação secundária. Todas as formas produzem calor quando absorvidas, porém, somente a radiação eletromagnética produzida pela temperatura do corpo que emite que se chama radiação térmica. A quantidade emitida depende da temperatura e condição da superfície do corpo. Durante a radiação ocorre absorção, transmissão e reflexão, para definir conduz a Equação 38 (BENNETT; MYERS, 1978).

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (\text{Eq.38})$$

Onde:

α = Absortividade

τ = Transmissividade

ρ = Refletividade

Para Silva (2010), a transferência por radiação é o resultado do deslocamento de fótons de uma superfície para outra, quando atingir a superfície, esses fótons são absorvidos, refletidos ou transmitidos. A energia irradiada é definida pelo poder emissivo, que pode ser encontrado com a Equação 39:

$$E_n = \sigma T^4 \quad (\text{Eq.39})$$

Onde:

E_n = energia irradiada

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T = temperatura do corpo (em Kelvin)

Para Borgnakke; Sonntag (2013), radiação é o modo de transferência que transmite energia através de ondas eletromagnéticas no espaço.

Para Bennet; Myers (1978) os corpos que possuem absortividade unitária são conhecidos como corpos negros, quando a soma da absortividade com a refletividade

é igual a 1 (um) é conhecida como opaca, para líquidos e gases é considerado que são transparentes. A absorvidade de um material depende muito de da sua própria temperatura, apesar de que qualquer alteração deste efeito é menos significativa quando comparado a temperatura do corpo emissor. Refletividade e emissividade são características mais comuns, por exemplo, superfícies metálicas polidas apresentam refletividades levadas e superfícies granulares refletividades baixas.

Silva (2010) traz que os corpos reais não são radiadores perfeitos, isto é, corpos negros irradiam mais energia à mesma temperatura. Calcula-se a emissividade através da relação apresentada na Equação 40:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_n} \quad (\text{Eq.40})$$

Onde:

E = poder emissivo corpo real

E_n = poder emissivo corpo negro

Conforme Pena (2002) radiação envolve a transferência de energia radiante entre dois corpos separados, esta transferência não requer meio contínuo, é propagada por ondas de todos os corpos e direções, é proporcional a área, ao tipo de superfície e à diferença de temperatura absoluta (K) entre as superfícies.

Para Mesquita et al (1977), a radiação é a transferência de calor de um corpo a outro, não em contato, por meio e movimento ondulatório através do espaço. É uma energia radiante emitida continuamente por todos os corpos e pode ser considerada uma forma de movimento ondulatório, conhecido como fenômeno eletromagnético. Um corpo negro absorve todo calor radiante incidente sobre sua superfície e nada reflete. A maioria dos materiais reflete uma fração (refletividade) e absorve a fração remanescente de energia incidente (absortividade), a relação entre o poder de radiação de uma superfície e do corpo negro é a emissividade da superfície, que é igual a absorvidade, pode ser visto alguns modelos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de emissividade, absorvidade e refletividades

Superfície	Emissividade ou absorvidade	Refletividade
Superfícies negras não-metálicas (asfalto, carvão)	0,90 a 0,98	0,10 a 0,02
Vidros comuns de janelas	0,90 a 0,95	0,10 a 0,05
Tijolo, concreto, pedra	0,85 a 0,95	0,15 a 0,05
Superfícies pintadas	0,85 a 0,95	0,15 a 0,05
Chapa de aço oxidada	0,75 a 0,80	0,25 a 0,20
Chapa de ferro lisa	0,55 a 0,60	0,45 a 0,40
Pintura de alumínio	0,40 a 0,60	0,60 a 0,40
Chapa de aço galvanizada	0,20 a 0,30	0,80 a 0,70
Chapa de alumínio fosca	0,10 a 0,20	0,90 a 0,80
Chapa de alumínio polida	0,02 a 0,05	0,98 a 0,95

Fonte: Mesquita et al 1977, p. 129

Quando a irradiação não acontece no vácuo ela normalmente é acompanhada por transporte de calor por convecção, o fluxo total de calor transportado é a soma das contribuições dos mecanismos. Para trabalhar com ambos mecanismos simultaneamente, é necessário definir um coeficiente de transporte de calor para irradiação semelhante ao de convecção, conforme Equação 41:

$$h_r = \sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \quad (\text{Eq.41})$$

Onde:

h_r = coeficiente de radiação

σ = constante de Stefan Boltzmann

T_1 = Temperatura da "fonte"

T_2 = Temperatura do "sumidouro"

2.6.7 Número de Nusselt

Çengel; Ghajar (2012) apresenta que é um coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção. O número de Nusselt representa o aumento da transferência de calor através da camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução do mesmo fluido em toda a camada, quanto maior o número de Nusselt melhor vai ser a convecção. Pode ser calculado pela Equação 42:

$$\frac{q}{Q} = Nu \quad (\text{Eq.42})$$

Onde:

q= quantidade de calor transferido por convecção (W)

Q= quantidade de calor transferido por condução (W)

2.6.1 Número de Prandtl

Para Çengel; Ghajar (2012) é a espessura relativa de camadas limite de hidrodinâmica e térmica. Para os fluidos varia entre 0,01 para metais líquidos até mais de 100000 para óleos pesados. Para os gases é considerado a cerca de 1, isto indica que a quantidade de movimento quanto calor dissipam-se através do fluido aproximadamente na mesma taxa.

2.6.2 Equação de Dittus- Boelter

Conforme apresentado por Çengel; Ghajar (2012), a equação de Dittus-Boelter pode ser utilizada quando a diferença de temperatura entre fluido e superfície ser pequena. Pode ser calculado conforme Equação 43:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n \quad (\text{Eq.43})$$

Onde:

Nu= número de Nusselt

Re= número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

n= é considerado 0,4 para aquecimento e 0,3 para resfriamento do fluido em escoamento.

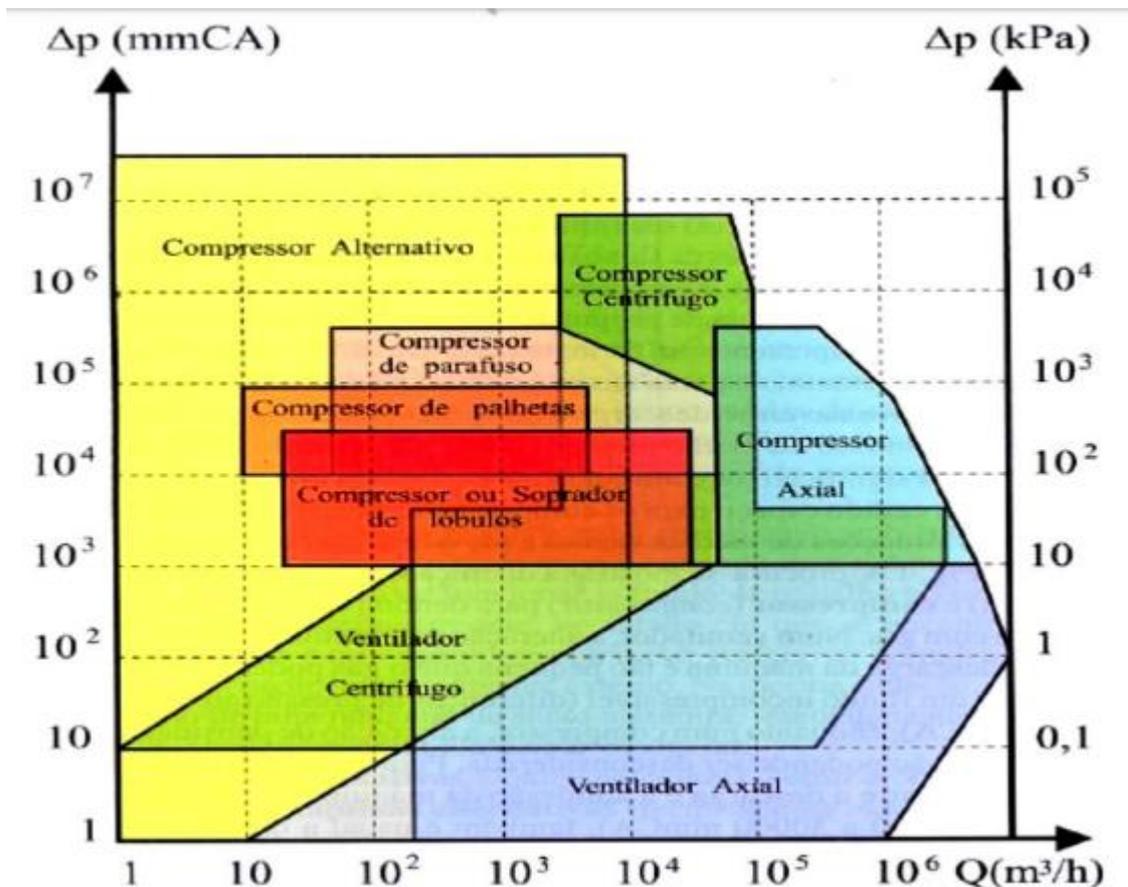
2.7 MÁQUINAS DE FLUIDO

Para Henn (2012), máquina de fluido é o equipamento que promove a troca de energia entre um sistema mecânico e fluido, transformando energia mecânica em energia de fluido ou vice-versa. Quando a transformação ocorre da mecânica para o fluido existe um aumento do nível energético de um fluido a partir do fornecimento de energia mecânica, por um gerador elétrico, designando-se uma máquina de fluido geradora. No caso de produzir energia mecânica através da redução do nível de um fluido, com um motor elétrico é designado de máquina de fluido motora.

As máquinas de fluido são utilizadas para transportar líquidos, gases e sólidos, na geração ou acúmulo de energia ou em processos químicos que precisam de elevadas pressões. Para o desenvolvimento destas máquinas é necessário entendimento analítico acompanhado de análise de operações básicas e conhecimento dos princípios comuns que regem seu funcionamento, tudo isso para uma melhor performance (HENN, 2012).

Para Henn (2012) o campo de aplicação destas máquinas é muito amplo que muitas vezes dificulta a escolha de qual o melhor método a ser escolhido, por exemplo, no caso de bombas e compressores é preciso definir se a melhor solução é o emprego de uma máquina de deslocamento positivo ou de uma máquina de fluxo. Analisando o caso de compressores que são caracterizados pela vazão de gás aspirado e pela pressão na descarga, observa-se na Figura 39, o domínio dos compressores centrífugos e axiais para regiões de grandes vazões.

Figura 22: Campo de aplicação de compressores e ventiladores.



Pode-se observar a distinção de ventiladores e compressores. Para um ventilador a alteração de densidade é muito pequena fazendo com que o fluido pode ser considerado incompressível – diferença de pressão até 10 KPa, para o compressor a alteração de densidade é significativa, não podendo ser desconsiderada – diferença de pressão de 10 a 300 KPa (HENN, 2012).

Henn (2012) traz conceitos fundamentais da Termodinâmica e da Mecânica dos Fluidos para o estudo das máquinas de fluidos como energia, vazão e volume. Considerando a aplicação do primeiro princípio da termodinâmica para sistemas escreve-se da seguinte forma:

$$\boxed{\text{Energia que o sistema recebe}} - \boxed{\text{Energia que o sistema entrega}} = \boxed{\text{Variação da energia total do sistema}}$$

A Aplicação deste conceito, para Henn (2012), em um volume de controle limitado pelas seções de admissão (a) e descarga (d) em uma máquina e fluido em regime permanente e utilizando grandezas referidas à unidade de massa do fluido de trabalho tem-se a Equação 44:

$$q - Y = u_d - u_a + p_d v_d - p_a v_a + \frac{1}{2}(c_d^2 - c_a^2) + g(z_d - z_a) \quad (\text{Eq.44})$$

Onde:

q = quantidade de calor por unidade de massa recebida pela máquina de fluido (J/kg)

Y = trabalho específico realizado pela máquina (J/kg)

u = energia interna do fluido (J/kg)

p = pressão estática do fluido (N/m²)

v = volume específico do fluido (m³/kg)

c = velocidade absoluta da corrente fluida (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

z = cota de referência de um ponto do escoamento (m)

2.7.1 Ventiladores

Para Silva (2010), existem dois tipos fundamentais de ventiladores: axiais e centrífugos. Nos axiais o ar mantém a direção do eixo antes e após sua passagem pelo rotor, já nos centrífugos o ar é descarregado na direção normal à direção de entrada. O ventilador axial é apropriado para movimentar grande volume de ar com

pequeno aumento de pressão, tem custo relativamente baixo e sua eficiência pode chegar a 85% se bem dimensionado, o diâmetro pode alcançar a nove metros dependendo de seu uso, permite que o ângulo de ataque das pás pode ser alterado facilmente. O ventilador centrífugo constitui-se por uma carcaça e um rotor, pode ser de dupla ou simples aspiração, quando utilizado em torres em séries, quando necessita baixos níveis sonoros, utiliza-se ventiladores de dupla aspiração lateral para usabilidade de pequenas vazões e pressões maiores que para o axial. Existem três tipos de ventiladores centrífugos: de pás radiais, pás curvadas para frente e pás curvadas para trás. Para o modelo de pás curvadas para frente suas características principais são: utilizados em torres de resfriamento por possuir alta velocidade do ar que abandona o rotor; possui dimensões menores e é mais econômico.

Clezar; Nogueira (1999), citam que ventiladores são estruturas mecânicas utilizadas para converter energia mecânica de rotação em aumento de pressão do ar. A ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), limita o campo correspondente aos ventiladores, fixando um acréscimo de 7% na massa específica do ar em suas saídas. Podendo denominar algumas características, vazão (Q) de um ventilador é o volume de ar deslocado numa unidade de tempo; pressão total do ventilador (PTV) é a diferença entre pressão total (Pt) do ar de saída e na entrada do ventilador; pressão de velocidade do ventilador (PVV) é a pressão de velocidade correspondente à velocidade média do ar na saída do ventilador; e pressão estática do ventilador (PEV), é a pressão total do ventilador, conforme Equação 45:

$$PEV = PTV + PVV \quad (\text{Eq.45})$$

Onde, tem-se as Equações 46 e 47:

$$PTV = Pt_{saída} - Pt_{entrada} \quad (\text{Eq.46})$$

$$PTV = Pe_{saída} + PVV - Pt_{entrada} \quad (\text{Eq.47})$$

Substituindo na Equação 47, tem-se a Equação 48:

$$PEV = Pe_{saída} - Pt_{entrada} \quad (\text{Eq.48})$$

Clezar; Nogueira (1999), ainda traz que a potência no eixo do ventilador (P_{eixo}), é a potência necessária para impor ao escoamento os parâmetros PTV, PEV e Q, assim expressa na Equação 49:

$$P_{eixo} = \frac{Q \cdot PTV}{\eta_{vt}} \quad (\text{Eq.49})$$

Ou ainda a Equação 50:

$$P_{eixo} = \frac{Q \cdot PEV}{\eta_{ve}} \quad (\text{Eq.50})$$

Onde:

P_{eixo} = potência no eixo (W)

Q = vazão (m^3/s)

PTV = pressão total do ventilador (Pa)

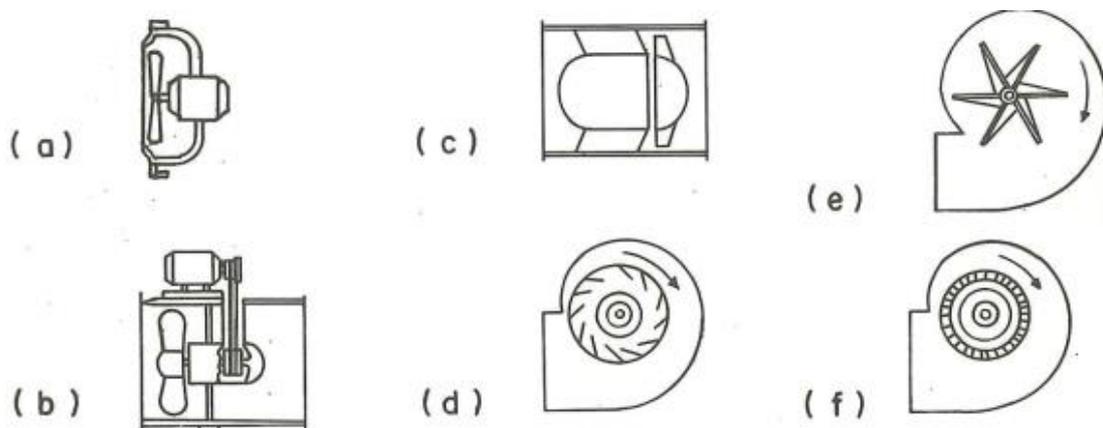
PEV = pressão estática do ventilador (Pa)

η_{vt} = eficiência total do ventilador

η_{ve} = eficiência estática do ventilador

Conforme Mesquita et al (1977), no ramo industrial os modelos mais utilizados são os axiais ou centrífugos e raramente os sopradores e ejetores. Sua função básica é mover uma quantidade de ar por um sistema de ventilação, gerando uma pressão estática que vence as perdas do sistema e uma pressão cinética que mantém o ar em movimento. Quando o ventilador centrífugo se encontra em repouso, comporta-se como um vaso volumétrico contendo um volume de ar, já em movimento o ar contido nele é centrifugado, recebendo um incremento de energia, o vazio do ventilador vai renovando o ar através da pressão atmosférica, a uma velocidade capaz de repor a quantidade descarregada. Quando em movimento a uma rotação constante, o volume específico é induzido e descarregado continuamente dependendo apenas da rotação do ventilador. Como a energia cinética é função da velocidade ao quadrado a pressão varia com o quadrado da rotação. E potência em função de ambos varia com o cubo da rotação. Abaixo na Figura 23 apresenta os principais tipos.

Figura 23: Principais tipos de ventiladores



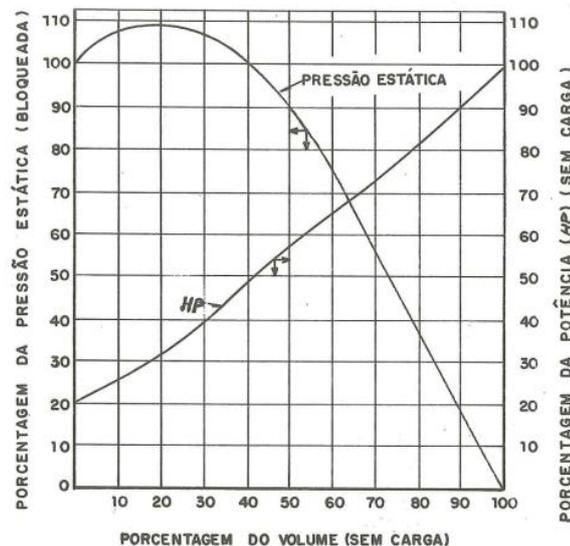
Fonte: adaptado pelo autor de Mesquita et al 1977, p. 279

Onde pode-se ver axial propulsor (a), axial comum (b), axial com guias (c), centrífugo, pás para trás (d), centrífugo, pás retas (e), centrífugo, pás para frente (f) (MESQUITA ET AL, 1977).

Para Clezar; Nogueira (1999) as curvas características de um ventilador expressam seu desempenho para uma massa específica de ar, são definidas em laboratórios e obedecem a normas regulamentadoras apropriadas.

- Centrífugo de pás radiais: é robusto, específico para movimentar efluentes com ande caga de poeira, poeira pegajosa e corrosiva, dificilmente se “afoga”, usado para trabalhos mais pesados, em eficiência baixa e é barulhento, pode-se ver sua curva característica na Figura 24.

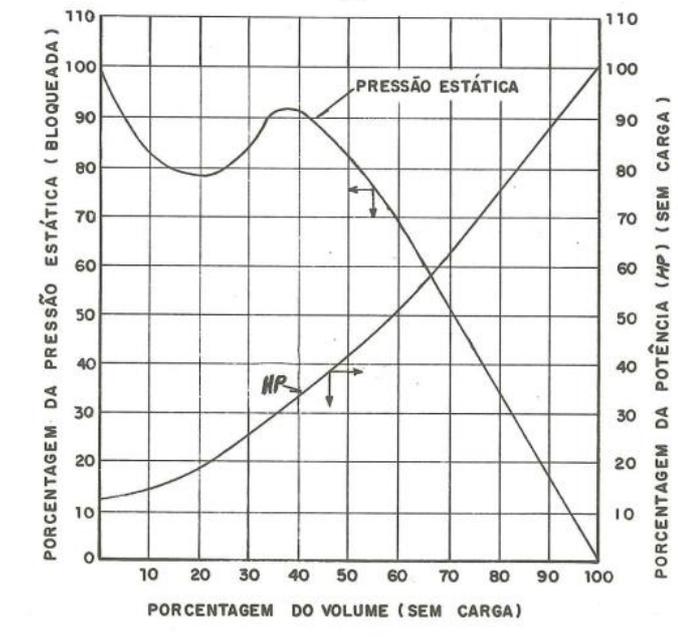
Figura 24: Curva característica ventilador centrífugo de pás radiais



Fonte: adaptado pelo autor de Mesquita et al 1977, p. 280

- Centrífugo de pás para frente: tem melhor eficiência, capacidade exaustora elevada e baixa velocidade, contraindicado para altas cargas de poeiras apresentando problemas de corrosão se mal utilizado, cuidados devem ser tomados para o ponto de trabalho cair à direita do segundo pico da curva característica, visto na Figura 25.

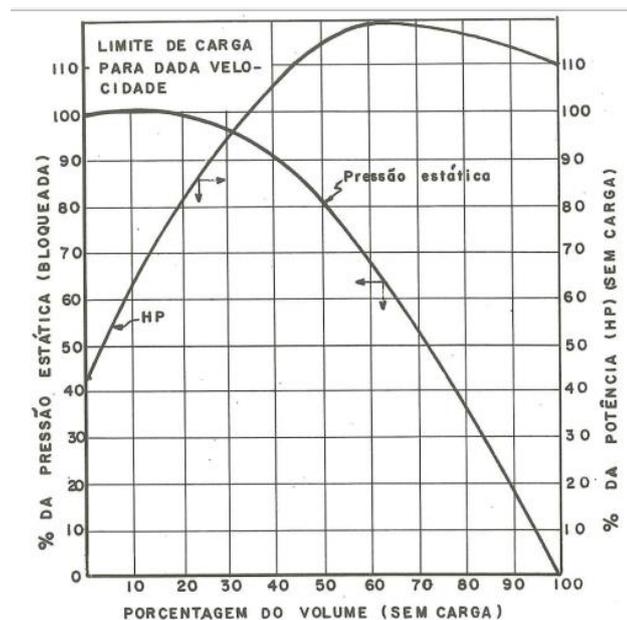
Figura 25: Curva característica ventilador centrifugo de pás para frente



Fonte: adaptado pelo autor de Mesquita et al 1977, p. 280

- Centrífugo de pás para trás: apresenta eficiência maior e autolimitação de potência, ou seja, se utilizado em sua máxima potência o motor não será sobrecarregado por mudanças de sistemas de dutos, é um ventilador silencioso. Pode-se ver a curva característica na Figura 26.

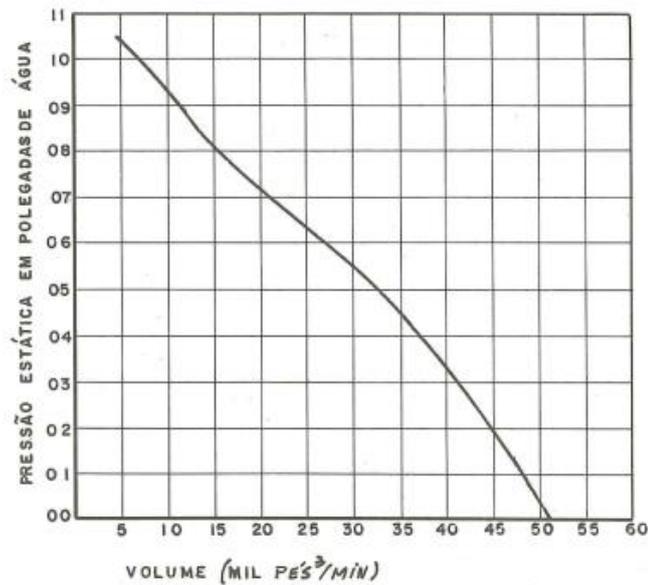
Figura 26: Curva característica ventilador centrifugo de pás radiais



Fonte: adaptado pelo autor de Mesquita et al 1977, p. 281

- Axial propulsor: modelo mais barato para grandes volumes de ar a baixas pressões, normalmente utilizado para circulação de ar ambiente e raramente para ventilação local exaustora, pode-se ver sua curva característica na Figura 27.

Figura 27: Curva característica ventilador axial propulsor



Fonte: adaptado pelo autor de Mesquita et al 1977, p. 281

- Tubo axiais: similar ao axial propulsor, porém com pás mais grossas e mais largas, colocando dentro de um tubo que permite conexão direta com dutos.

Mesquita et al (1977), cita a lei dos ventiladores, as relações citadas anteriormente referentes a rotação acrescidas das relações com a variação de vazão, pressão e potência com a densidade do fluido e tamanho do ventilador.

Para Mesquita et al (1977), a variação da vazão com a rotação faz com que muitos aumentem-na para alcançar vazões maiores, mas o aumento da potência com o cubo da rotação faz com que nem sempre o motor suporta este aumento, havendo risco de danificação.

3 METODOLOGIA

Para definir o caminho a seguir para solução do problema encontrado na linha de pintura da empresa metalúrgica utilizou-se a metodologia de pesquisa de cunho exploratório.

Segundo Gil (2002), a pesquisa de cunho exploratório tem o objetivo de familiarizar-se com o problema, para deixar mais explícito ou construir hipóteses, aprimorar ideias ou descobertas de intuições. O planejamento desta pesquisa consistiu em levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema e análise de exemplos que ajudam na compreensão dos dados e resultados.

A primeira etapa consiste em pesquisa bibliográfica, onde buscou se entender os conceitos teóricos do processo, assim como, o estudo de diversas maneiras de resolução do problema que envolve o resfriamento de peças após o processo de pintura.

Após foi necessária uma coleta de dados para quantificar as deficiências do processo atual. Esta coleta se baseou nos principais tipos de peças que são processadas, e destas peças coletado *in loco* características como a massa, a área, maior espessura, tempo que as peças levam para atingir a temperatura ideal para embalar em diferentes condições de temperatura ambiente e umidade do ar. As peças processadas nesta linha são de ferro fundido, o qual por natureza tende a ser de grande massa. Para a coleta de dados foi utilizado uma tabela que é capaz de separar as variáveis que buscava, ou seja, um medidor de temperatura a laser, um termo higrômetro e um cronômetro ou relógio.

A etapa seguinte consistiu da análise e a tabulação destes dados e início do dimensionamento. Com os dados iniciais foi possível calcular a condutividade e convectividade do sistema, assim como as demais variáveis que são necessárias para saber o tipo de transição de calor que predomina, velocidade do escoamento do ar. A partir disto é possível direcionar a alternativa a ser escolhida para solucionar o problema, com a opção de buscar alguma alternativa pronta no mercado ou projetar/dimensionar um equipamento capaz de realizar este processo. Os equipamentos serão escolhidos através de catálogos técnicos, para que os materiais utilizados sejam padrões e normatizados o que auxilia na escolha e também reduz o custo.

Para a opção de dimensionar um sistema com equipamentos já existentes, ventiladores ou climatizadores, é necessário saber a quantidade de calor gerada neste processo, para assim ser possível escolher o melhor equipamento para realizar a operação. Para esta escolha ser efetiva é necessário dimensionar a quantidade de a necessária, vazão mássica, vazão volumétrica, vazão de insuflamento, pressão total, pressão de velocidade e pressão estática que o sistema oferece. Com os resultados obtidos procurou-se encontrar os equipamentos mais eficientes a este uso.

A escolha das variáveis, a serem coletadas e dimensionadas, parte de dados mensuráveis no processo atual, e que principalmente apresentam impacto no processo. A coleta, tabulação e análise destes dados ocorreu em 19 tipos diferentes de peças, dos quais foi possível repetir a medição em diferentes condições climáticas, temperatura ambiente e umidade, os quais serão tratados como itens diferentes resultando assim em 28 peças, todos estes dados estão disponíveis (Apêndice A) neste arquivo. Através de um *software* CAD (Desenho Assistido por Computador) foi possível coletar alguns dados do processo, como por exemplo a quantidade de peças que podem ser processadas no mesmo ciclo, sempre levando em consideração que pode ser processado diversos tipos de peças no mesmo ciclo, mas como a abrangência de combinações seria muito grande optou-se em trabalhar com um tipo de item por ciclo. As demais considerações estarão colocadas junto a próxima etapa que será apresentado os resultados obtidos durante a realização deste trabalho.

Para a realização deste trabalho foi respeitado o cronograma, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28: Cronograma de atividades

ATIVIDADES	PERÍODO											
	fev./mar./abr.	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro			
1º Semestre												
Definição do assunto a ser estudado	■	■	■									
Definição do tema da pesquisa		■	■									
Escolha do orientador		■	■									
Definição do orientador		■	■									
Entrega da 1ª etapa (título, tema e problema)		■	■									
Entrega de evidencia da 1ª reunião ou contato formal com o orientador		■	■									
Entrega da 2ª etapa (título, tema, problema, hipótese, objetivos e justificativa)			■	■								
Entrega do projeto de TFC concluído (etapas anteriores, referencial teórico, metodologias, recursos e cronograma)				■	■							
Apresentação dos projetos (banners)				■	■							
2º semestre												
Orientações com o professor		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Coleta de dados do processo				■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tabulação dos dados					■	■	■	■	■	■	■	■
Análise dos dados						■	■	■	■	■	■	■
Dimensionamento do sistema de ventilação/refrigeração						■	■	■	■	■	■	■
Pesquisa e projeto para o desenvolvimento de um sistema de ventilação/refrigeração						■	■	■	■	■	■	■
Entrega do TFC (03 cópias físicas)										■	■	■
Início das bancas											■	■

Fonte: a autora (2019).

A Figura 28 apresenta as etapas de projeto que ocorreram no primeiro semestre de 2019 e a etapa de conclusão do trabalho que ocorreu no segundo semestre deste mesmo ano.

4 RECURSOS NECESSÁRIOS

Para realização deste projeto foram necessários alguns equipamentos e documentos, entre eles se destacam:

- a) Livros, objetos de pesquisa;
- b) Tabelas para busca e apontamento de dados;
- c) Equipamentos de registro (lápiz, canetas, borrachas, tinta etc.);
- d) Peças em ferro fundido;
- e) Medidor de temperatura a laser;
- f) Cronômetro/Relógio;
- g) Termo higrômetro;
- h) *Software* CAD;
- i) Catálogo de equipamentos e peças;

Figura 29: Ilustração de peças monitoradas



Fonte: a autora (2019)

Para entender melhor o comportamento destas peças no recinto, optou-se por coletar mais que uma vez os dados do mesmo item no processo, onde verificou-se que a temperatura ambiente e umidade relativa do ar contribuíam para acelerar ou pausar o resfriamento destas peças. Para isto, foi coletado dados de 19 itens os quais se apresentam em 28 peças.

5.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Foi possível verificar através dos dados coletados que o processo de resfriamento das peças permite acontecer através da transferência de calor das peças

para o recinto, esta ação é possível através de dois mecanismos: condução e convecção, que serão dimensionados e apresentados nos próximos tópicos.

5.1.1 Condução

Para haver condução é necessário que o calor seja conduzido através da colisão ou difusão. No processo atual consegue-se, através dos dados coletados, mensurar a quantidade de calor conduzido das peças para o recinto. Para apresentar o dimensionamento da quantidade de calor transferido por condução será realizado o cálculo para uma unidade de cada item e para a quantidade que compõe o ciclo, considerando o processo somente para este item, porém é necessário ressaltar que pode-se obter vários itens sendo processados ao mesmo tempo.

Serão apresentados os dados atuais e os futuros em forma de quadro (Anexo C) para melhor visualização e análise dos resultados. Onde no estado atual não se tem nenhum mecanismo de resfriamento, ele acontece naturalmente no tempo que foi necessário às condições climáticas que apresentava, para o sistema futuro é considerado um tempo de vinte minutos e estipulado que a peça deve chegar a 25°C para poder seguir o processo posterior que é embalagem das peças prontas.

Para o dimensionamento da condução foi necessário o uso da Equação 29:

$$Q = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Eq.29})$$

Onde:

Q = Fluxo de calor (W)

k = condutividade térmica (W/m.K)

A= área do fluxo de calor (m²)

ΔT= diferença de temperatura (K)

Δx= espessura da placa (m)

Observando que para o resultado deste dimensionamento ser próximo ao caso estudado é necessário fazer algumas considerações:

- Para o valor da condutividade térmica encontrou-se através de tabelas os valores do Quadro 15.

Quadro 5: Valores para constante de condutividade térmica

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência a tração (Mpa)	235	500	650
Módulo de elasticidade (Gpa)	110	140	165
Resistência à fadiga (Mpa)	100	140	165
Condutividade térmica (W/(mK))	48	35	28
Dureza (HB)	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425

Fonte: adaptado pela autora (2019).

Como, no processo, é usual ter os dois materiais destacados optou-se por trabalhar com a média entre os dois valores referentes a condutividade térmica;

- O valor de área o fluxo de calor é igual à área da peça em questão.
- Por se tratar de peças de geometria complexas para o valor de espessura da placa, utilizou-se o valor da maior espessura da peça, que consequentemente irá reter mais calor para realizar a transferência.

Obteve-se o resultado da peça 16 como mínimo no sistema atual e a peça 25 para o valor máximo. Os valores destes itens serão levados em consideração ao longo de todo o dimensionamento para ser possível a comparação e análise do comportamento dos mesmos.

Para determinar quanto calor condutivo flui no tempo, calculou-se o fluxo de calor condutivo, com a equação 35, que nada mais é que a divisão da condutividade pelo tempo em que o processo ocorreu.

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 35})$$

Onde:

Q = valor da condutividade (W)

Δt = tempo que o processo precisou para chegar na temperatura (s)

Os resultados encontrados estão apresentados no Anexo C.

Onde se percebe que para o sistema futuro da peça 16, no ciclo do processo, ou seja, considerando 126 peças, o valor para condutividade encontrado no futuro é 15,55% menor que no sistema atual e o fluxo de calor condutivo para esta mesma peça é 31,10% menor que o atual. Para a peça 25 o valor de condutividade encontrado no ciclo futuro, ou seja 130 peças, é 5,65% menor que no atual e o fluxo condutivo é aproximadamente 26% menor.

5.1.2 Convecção

Através dos dados coletados é possível calcular a quantidade de calor que é transferido através da convecção, como será apresentado abaixo. Convecção só ocorre pelo escoamento do fluido entre uma superfície e outra. Os dados obtidos são apresentados através do Quadro 6, para facilitar a análise do processo atual com o processo futuro.

Para atingir estes resultados é necessário o uso da Equação 64:

$$q = \alpha A \Delta T \quad (\text{Eq.64})$$

Onde:

q = fluxo de calor de convecção (W)

α = coeficiente de convecção (W/m².K)

A = área da peça (m²)

ΔT = variação da temperatura (K)

Para a resolução dos cálculos deste mecanismo também foram necessárias algumas considerações:

- Para o valor do coeficiente de convecção será calculado para cada situação, com a Equação 65:

$$\alpha = \frac{-k_{\text{fluido}} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (\text{Eq.65})$$

Onde:

α = coeficiente de convecção (W/m².K)

$(T_s - T_\infty)$ = Variação da temperatura (Temperatura superfície – Temperatura ambiente ou do ar)

k_{fluido} = condutividade térmica do fluido (W/m.K)

$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$ = Variação da temperatura ao longo do comprimento (K/m)

Quadro 6: Valores encontrados para convecção térmica

Peça 01	1 peça	768 peças	1 peça	768 peças	Peça 02	1 peça	768 peças	1 peça	768 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,055	42,2396621	1,4364	36,9165256		0,461	354,071962	9,8286	155,291605
Peça 03	1 peça	72 peças	1 peça	72 peças	Peça 04	1 peça	126 peças	1 peça	126 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0851	6,1265571	0,7715	14,2733616		0,0719	9,05911052	1,4848	52,1160689
Peça 05	1 peça	512 peças	1 peça	512 peças	Peça 06	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,2247	115,033527	6,5185	83,4372883		0,0272	5,21991705	1,2849	45,0983099
Peça 07	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças	Peça 08	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,5628	108,062575	8,4351	107,969077		0,0309	5,94132644	0,5253	9,71852635
Peça 09	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças	Peça 10	1 peça	126 peças	1 peça	126 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,021	4,04069308	1,1418	40,6469096		0,5681	71,5827717	6,9414	108,980625
Peça 11	1 peça	126 peças	1 peça	126 peças	Peça 12	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0822	10,3570961	1,3672	26,5228352		0,5451	104,663343	8,9548	114,620836
Peça 13	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças	Peça 14	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0269	5,17426443	0,7176	13,2751615		0,3952	75,8694974	8,5306	134,783381
Peça 15	1 peça	126 peças	1 peça	126 peças	Peça 16	1 peça	126 peças	1 peça	126 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0368	4,63507035	0,7225	13,3657953		0,335	42,2140675	7,2656	114,79611
Peça 17	1 peça	78 peças	1 peça	78 peças	Peça 18	1 peça	96 peças	1 peça	96 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,6416	50,0450982	7,6303	119,795606		0,0614	5,8923759	1,0641	27,3467833
Peça 19	1 peça	96 peças	1 peça	96 peças	Peça 20	1 peça	96 peças	1 peça	96 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0519	4,98137558	1,3861	48,653666		0,0865	8,30741141	1,2199	34,2787048
Peça 21	1 peça	96 peças	1 peça	96 peças	Peça 22	1 peça	132 peças	1 peça	132 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,8795	84,4309029	8,8423	139,708946		0,0502	6,63242718	1,1752	22,7989387
Peça 23	1 peça	130 peças	1 peça	130 peças	Peça 24	1 peça	130 peças	1 peça	130 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,088	11,4359634	1,3842	27,9601567		0,0852	11,0749554	1,5332	37,7171633
Peça 25	1 peça	130 peças	1 peça	130 peças	Peça 26	1 peça	1032 peças	1 peça	1032 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0916	11,9096488	1,5144	40,7374218		0,0271	27,9442093	1,4261	35,0815923
Peça 27	1 peça	1032 peças	1 peça	1032 peças	Peça 28	1 peça	1032 peças	1 peça	1032 peças
	q atual	q atual (W)	q	q Futuro		q atual	q atual (W)	q	q Futuro
	0,0258	26,5804146	1,5842	38,9722029		0,0046	4,7940685	1,3368	32,8852978

Fonte: a autora (2019)

Pode-se perceber que o valor da convecção no estado futuro aumenta, justamente por ser forçada. Isto é perceptível quando analisamos a peça 16 no ciclo atual com 126 peças, onde foi encontrado no ciclo futuro um valor 36,77% maior que o atual e na peça 25 encontrei 29,23% de aumento comparado ao sistema atual.

5.1.3 Número de Nusselt

Para encontrar a taxa de transferência convectiva sobre a transferência condutiva é utilizado o número de Nusselt. Esta taxa, quanto mais próxima a 1 mais convectivo é o sistema.

Para atingir estes resultados é necessário o uso da Equação 42:

$$\frac{q}{Q} = Nu \quad (\text{Eq.42})$$

Onde:

q= quantidade de calor transferido por convecção (W)

Q= quantidade de calor transferido por condução (W)

Para apresentação dos resultados encontrados será utilizado a forma de quadro para melhor visualização, conforme Quadro 7:

Quadro 7: Valores encontrados para Nusselt

Número de Nusselt		
	Nu (atual)	Nu (futuro)
Peça 01	0,00000750	0,00110562
Peça 02	0,00007276	0,01062785
Peça 03	0,00001433	0,00186957
Peça 04	0,00000380	0,00044344
Peça 05	0,00008659	0,01380008
Peça 06	0,00000658	0,00083159
Peça 07	0,00004472	0,00759620
Peça 08	0,00000454	0,00055928
Peça 09	0,00000474	0,00069546
Peça 10	0,00023022	0,03720928
Peça 11	0,00002338	0,00327015
Peça 12	0,00004344	0,00745685
Peça 13	0,00000441	0,00056964
Peça 14	0,00004344	0,00621510
Peça 15	0,00002514	0,00325000
Peça 16	0,00024760	0,03453002
Peça 17	0,00013900	0,02282556
Peça 18	0,00001423	0,00210761
Peça 19	0,00001464	0,00176582
Peça 20	0,00001090	0,00118453
Peça 21	0,00010425	0,01499714
Peça 22	0,00000970	0,00134028
Peça 23	0,00000221	0,00028212
Peça 24	0,00000224	0,00025166
Peça 25	0,00000224	0,00030187
Peça 26	0,00000439	0,00049377
Peça 27	0,00000439	0,00049412
Peça 28	0,00000324	0,00036456

Fonte: a autora (2019)

Com estes resultados do número de Nusselt pode ser visto que a transferência de calor ocorre basicamente somente por condução. Porém é analisado que os valores para a peça 16 e 25 no sistema futuro apresentam um acréscimo de 0,7%, ou seja, como já comentado nos tópicos anteriores, o sistema futuro passa a ser mais convectivo, mas ainda a transferência predominante é por condução.

5.1.4 Número de Reynolds

Para encontrar o número de Reynolds utiliza-se a Equação 43, esta determina se o escoamento é turbulento ou laminar. Os resultados foram obtidos através da Equação de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n \quad (\text{Eq.43})$$

Onde:

Nu= número de Nusselt

Re= número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

n= é considerado 0,4 para aquecimento e 0,3 para resfriamento do fluido em escoamento.

Para a resolução dos cálculos foram necessárias algumas considerações:

- O número de Prandtl é tabelado, e para o ar é considerado 0,7.
- O coeficiente (n), será utilizado como resfriamento, ou seja, 0,33.

Os resultados obtidos através dos dados acima estão apresentados no Quadro

8:

Quadro 8: Valores encontrados para Reynolds

Número de Reynolds		
	Re (atual)	Re (futuro)
Peça 01	0,00178399	0,09691642
Peça 02	0,01099067	0,59247237
Peça 03	0,00299648	0,14753829
Peça 04	0,00103581	0,04666337
Peça 05	0,01263297	0,73015841
Peça 06	0,00160791	0,07716838
Peça 07	0,00744584	0,45288624
Peça 08	0,00119455	0,05618403
Peça 09	0,00123656	0,06688548
Peça 10	0,02762060	1,61448085
Peça 11	0,00443124	0,23076280
Peça 12	0,00727466	0,44622736
Peça 13	0,00116709	0,05701546
Peça 14	0,00727466	0,38571825
Peça 15	0,00469682	0,22962477
Peça 16	0,02927604	1,52079022
Peça 17	0,01844729	1,09206642
Peça 18	0,00297823	0,16238443
Peça 19	0,00304715	0,14095121
Peça 20	0,00240631	0,10241132
Peça 21	0,01465485	0,78040239
Peça 22	0,00219302	0,11304953
Peça 23	0,00067032	0,03249782
Peça 24	0,00067820	0,02965972
Peça 25	0,00067820	0,03430569
Peça 26	0,00116330	0,05085494
Peça 27	0,00116330	0,05088343
Peça 28	0,00091296	0,03989596

Fonte: a autora (2019)

Os resultados obtidos nos resultam exatamente como o ambiente se apresenta, ou seja, os valores são muito baixos o que caracteriza o ambiente com ventilação estagnada, ou seja, quase sem trocas de ar. É possível analisar que para as peças 16 e 25 do sistema futuro o número de Reynolds encontrado é 1,9% maior que o atual.

Conhecendo o número de Reynolds é possível calcular a velocidade do escoamento para o resfriamento, conforme equação 27.

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde:

Re= número de Reynolds

V = velocidade de escoamento livre

L= comprimento característico da geometria (m)

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

μ = viscosidade dinâmica (kg/m.s)

Para a resolução dos cálculos foram necessárias algumas considerações:

- Para o valor de massa específica do fluido ser mais próximo do real, foi calculado conforme a Equação 07 e este resultado será apresentado juntamente ao Apêndice C.

$$\rho = \frac{P}{R_{ar}T} \quad (\text{Eq. 07})$$

- Para o valor do diâmetro, foi calculado com a Equação 13 de diâmetro equivalente, e este resultado será apresentado juntamente ao Apêndice C.

$$D_{eq} = \frac{2*a*b}{a+b} \quad (\text{Eq. 13})$$

- Para a determinação da viscosidade cinemática foi utilizado a Equação 04, e este resultado será apresentado juntamente ao Apêndice C.

$$v = (13 + 0,1T) * 10^{-6} \quad (\text{Eq. 04})$$

Os dados obtidos para a velocidade estão apresentados no Quadro 9:

Quadro 9: Valores encontrados para velocidade atual e futura

	Velocidade (m/s)	
	v atual (m/s)	v futuro (m/s)
Peça 01	0,00000083	0,00000004
Peça 02	0,00000478	0,00000027
Peça 03	0,00000068	0,00000004
Peça 04	0,00000104	0,00000004
Peça 05	0,00000452	0,00000028
Peça 06	0,00000093	0,00000004
Peça 07	0,00000516	0,00000034
Peça 08	0,00000086	0,00000004
Peça 09	0,00000099	0,00000005
Peça 10	0,00000380	0,00000024
Peça 11	0,00000062	0,00000003
Peça 12	0,00000519	0,00000035
Peça 13	0,00000087	0,00000004
Peça 14	0,00000530	0,00000030
Peça 15	0,00000061	0,00000003
Peça 16	0,00000374	0,00000021
Peça 17	0,00000420	0,00000026
Peça 18	0,00000073	0,00000004
Peça 19	0,00000079	0,00000003
Peça 20	0,00000079	0,00000003
Peça 21	0,00000445	0,00000025
Peça 22	0,00000074	0,00000004
Peça 23	0,000001007	0,00000005
Peça 24	0,000001048	0,00000005
Peça 25	0,000001064	0,00000005
Peça 26	0,00000092	0,00000004
Peça 27	0,00000092	0,00000004
Peça 28	0,00000097	0,00000004

Os resultados encontrados são baixos, mas assim como já analisado é característica de um ambiente com escoamento de ar estagnado, ou seja, o ar se movimenta lentamente, quase que não havendo a troca de ar deste recinto.

5.1.5 Dimensionamento do sistema de ventilação

Os dados obtidos através das equações apresentadas, oferecem dados para seguir o dimensionamento do sistema de ventilação a ser proposto. Inicialmente com as medidas da estufa consegue-se encontrar a massa de ar (m) necessária para a operação, conforme cálculos detalhados no Apêndice F. Após, com base no Quadro 4 consegue-se encontrar a quantidade de trocas de ar necessárias, considerou-se o equipamento como uma sala de máquinas, o qual necessita 30 trocas de ar por hora, com este valor e sabendo que o ciclo, no sistema futuro, é de 20 minutos é possível calcular que são necessárias 10 trocas de ar no ciclo. Estes dados ainda permitem que seja calculado a vazão mássica (\dot{m}), carga térmica (qT), velocidade média (V_m), vazão volumétrica (V_v) e vazão insuflada (V_i) de ar, que também se encontram junto ao Apêndice G.

Através destes dados calculados é possível a escolha do ventilador para o processo, a escolha ocorrerá através de catálogos técnicos. Também foi possível definir o tipo de ventilador através da Figura 41, apresentada no referencial teórico, onde é definido o campo de aplicação de compressores, onde os dados de pressão e vazão formam um gráfico de diferentes sistemas, e a partir destes resultados o sistema a ser utilizado é axial.

O ventilador escolhido é o Man Cooler 400 – 1750 (MC400 - 1750rpm), construído pela empresa Soler & Palau, conforme Figura 30:

Figura 30: Ilustração do ventilador MC400 – 1750pm



Fonte: Catálogo ventiladores axiais Man Cooler, p. 3

Este ventilador será adaptado ao uso, não sendo necessário este suporte que acompanha o mesmo de fábrica. As características do mesmo estão apresentadas na Figura 31, onde foi possível definir o tamanho a ser utilizado.

Figura 31: Dados técnicos dos ventiladores axiais

TAMANHO	400	500	630	710	800	900	1000	
Rotação	1750	1750	1750	1150	1750	1150	1150	1150
Vazão de ar m³/h na desc. livre	4970	9960	20100	18650	28860	26890	38450	52890
dB (A) a 1,5m	70	77	84	79	88	82	86	89
dB (A) eixo central para velocidade 1,0 m/s⁽¹⁾	63	67	72	66	74	69	71	73
dB (A) eixo central para velocidade 2,0 m/s⁽¹⁾	64	68	73	68	75	70	72	74

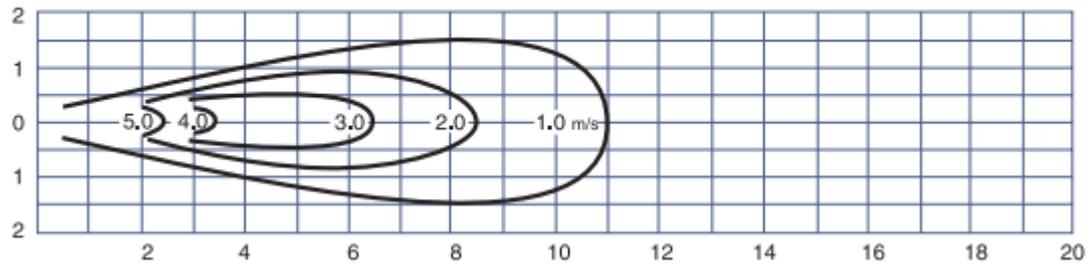
Fonte: Catálogo ventiladores axiais Man Cooler, p. 3

Para a escolha foi levado em conta a vazão de ar insuflada (m³/h) que é necessário, onde o dimensionamento resultou em 310,3613m³/h, não encontrando nada exato a isso foi definido escolher o equipamento mais próximo, que seria o MC400 – 1750, o mesmo tem uma capacidade de vazão de ar de 4970m³/h, o que é dez vezes mais do dimensionado, porém não interfere, pois pode ser incrementado itens de maior massa e área que seja necessário mais vazão para atender o tempo definido como 20 minutos (1200 segundos).

Outra variável que possibilitou a escolha deste equipamento foi o gráfico de alcance do ar, que apresenta o jato de ar de 11 metros de comprimento e 3 metros no diâmetro (altura e largura) conforme Figura 32.

Figura 32: Característica do alcance do jato de ar

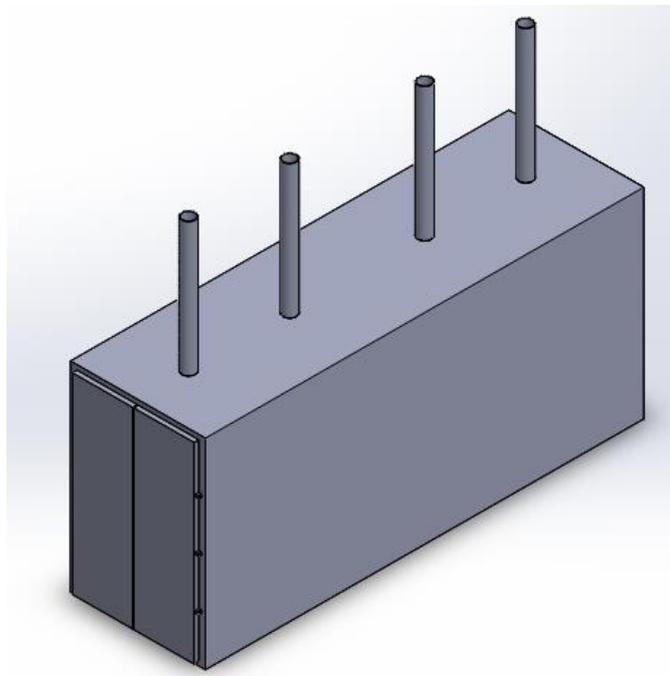
MC 400 - 1750 rpm



Fonte: Catálogo ventiladores axiais Man Cooler, p. 3

O equipamento gerador de calor (estufa) tem medidas de 3mx6,5mx2m (AxCxL) Figura 33.

Figura 33: Estufa de cura, sistema atual



Fonte: a autora, 2019

Pensando na troca de ar dentro da estufa, tem-se como sugestão o uso de um exaustor axial de mesmo tamanho e velocidade, ACR 400 – 1750 rpm, conforme

Figura 34, para que toda massa de ar que entra, sai em mesma quantidade, conforme - Anexo D.

Figura 34: Característica do alcance do jato de ar



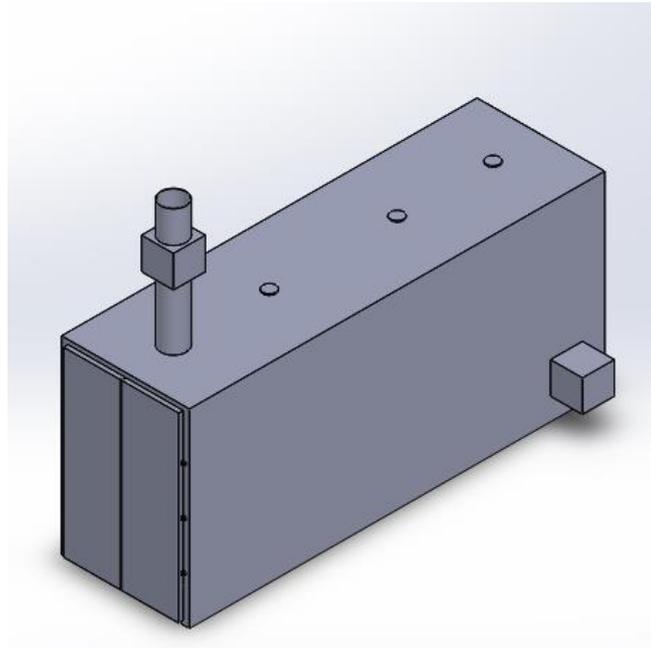
Fonte: Catálogo ventiladores axiais AVR, p. 7

Junto ao Anexo D é possível verificar que o melhor rendimento deste equipamento fica entre 4000 e 5000m³/h com pressão estática entre 5 e 10 mmca. A vazão necessária para o uso é 4970m³/h, igual ao ventilador, para como já citado ter troca de ar em mesma quantidade, a pressão estática dimensionada é 3,55 mmca, ou seja, a escolha deste equipamento faz com que o mesmo trabalhe no melhor rendimento oferecido pelo fornecedor.

5.1.5.1 Sugestão de instalação

Com base no estudo apresentado acima e com os resultados obtidos, é apresentado na Figura 35, uma sugestão de instalação para os equipamentos.

Figura 35: Sugestão de instalação, sistema futuro



Fonte: a autora, 2019

Como apresentado na Figura 33, a estufa atual é composta por quatro chaminés de diâmetro 200mm, os quais sugere-se substituir por um exaustor forçado de 400mm de diâmetro e um ventilador de 400mm, conforme Figura 35.

CONCLUSÃO

Com o presente trabalho foi possível atingir o objetivo de dimensionar um sistema de ventilação, capaz de resfriar as peças e acelerar o processo. Conforme os dados apresentados, em alguns itens, o ganho foi de aproximadamente duas horas de processo, pois o que antes era realizado em duas horas e meia agora é possível realizar em vinte minutos. A área de ventilação e resfriamento é bastante abrangente, precisou-se definir com sabedoria qual linha de dimensionamento utilizar. Foi determinado a opção de um sistema de ventilação por ser de fácil manutenção e apresenta um custo benefício, quando comparado a um sistema de refrigeração que utiliza mais de um componente para realizar a operação, de custo mais elevado e de maior complexidade, claro, que escolhendo um sistema de refrigeração pode-se ter um resultado ainda mais atrativo referente aos tempos de processo.

Fica agora a critério da empresa em instalar este sistema ou modificá-lo, inclusive em questões de modelos.

Foi possível entender como realizar o dimensionamento de um sistema de ventilação, atender aos requisitos, atender aos objetivos e com certeza aumentar a bagagem de conhecimento na área térmica, é muito importante aplicar os conhecimentos obtidos durante a graduação na área prática, os conhecimentos são adquiridos com mais facilidade quando aplicados, e principalmente sabendo que é um projeto que tem grande possibilidade de sair do papel.

REFERÊNCIAS

- BENNETT, C. O.; MYERS, J. E. **Fenômenos de transporte, quantidade de movimento calor e massa**. Rio de Janeiro: Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA, 1978.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E., **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2013.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR Afshin, J., **Transferência de Calor e Massa**. 4. Ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.
- CHIAVERINI, VICENTE. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 1977
- CLEZAR, CARLOS A.; NOGUEIRA ANTONIO C. R., **Ventilação Industrial**. 1.ed. Florianópolis: Editora UFSC, 1999
- COSTA, ÊNNIO C. DA. **Refrigeração**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1994.
- COSTA, ÊNNIO C. DA. **Ventilação**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2005.
- FURTADO, PAULO. **Pintura Anticorrosiva dos Metais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010
- GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- GROOVER, MIKELL P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014
- GIORGETTI, MARCIUS F. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- HENN, ÉRICO A. L., **Máquinas de Fluido**. 3. Ed. Santa Maria: Editora UFSM, 2012.
- MACINTYRE, ARCHIBALD J., **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A, 1990.
- MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI N., **Engenharia de Ventilação Industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1977
- MILLER, REX; MILLER, MARK. **Ar-Condicionado e Refrigeração, 2ª edição**. [Minha Biblioteca]. Retirado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2612-1/>
- NUNES, LAERCE DE PAULA; LOBO, ALFREDO CARLOS O., **Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciencia, 2012
- PENA, Sergio Meirelles. **Sistemas de Ar Condicionado e Refrigeração**. 1. ed. PROCEL 2002

SILVA, JOSÉ DE C. S. **Refrigeração Comercial Climatização Industrial**. 2. ed. São Paulo: Leopardo Editora, 2010.

SOLER E PALAU. **Catálogos Técnicos de ventilação e exaustão**. Disponível em: <<http://www.solerpalau.com.br/>>. Acesso em: 11 out. 2019

STOECKER W. F.; JABARDO J. M. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2002

APÊNDICE A

Peça	Qnt. de peças por ciclo	Temperatura ambiente				Umidade (%)	Temp. entrada a estufa (°C)	Hora saída da estufa	Temp. Estufa (°C)	Temp. 01 peça (°C)	Temp. 01 peça (K)	Hora	Temp. 02 peça (°C)	Hora	Temp. 03 peça (°C)	Temp. 03 peça (K)	Hora	Temp. 04 peça (°C)	Temp. 04 peça (K)	Área (m ²)
		In (°C)	In (K)	Out (°C)	Out (K)															
Peça 01	768	25,7	298,7	26,5	299,5	57	20,6	10:30	100	80,6	353,6	11:04	42,2	11:15	38,5	311,5	11:35	34,4	307,4	0,140
Peça 02	768	15,8	288,8	16,2	289,2	50	17,2	11:00	100	72,4	345,4	11:20	47,5	11:40	32,5	305,5	-	-	-	0,140
Peça 03	72	18,5	291,5	19,2	292,2	56	19,5	11:00	100	61,2	334,2	11:10	54,1	11:38	36,6	309,6	-	-	-	0,413
Peça 04	126	35,1	308,1	33,9	306,9	34	33,5	16:10	100	68,4	341,4	16:30	52,8	17:00	39,2	312,2	-	-	-	0,281
Peça 05	512	12,8	285,8	13,4	286,4	64	14	08:20	100	60,4	333,4	08:40	39,1	09:05	27,1	300,1	-	-	-	0,082
Peça 06	192	35,1	308,1	33,9	306,9	34	33,5	16:10	100	59,7	332,7	16:30	50,9	17:00	38,8	311,8	-	-	-	0,149
Peça 07	192	12,8	285,8	13,8	286,8	64	13,8	09:15	100	68,6	341,6	09:55	28,3	10:30	20,4	293,4	-	-	-	0,141
Peça 08	192	18,5	291,5	19,2	292,2	56	19,5	11:00	100	51,1	324,1	11:10	39,8	11:38	25	298	-	-	-	0,141
Peça 09	192	35,6	308,6	35,1	308,1	34	35,3	15:20	100	50,2	323,2	15:45	44,6	16:30	33,2	306,2	-	-	-	0,141
Peça 10	126	15,7	288,7	16,8	289,8	61	14,7	09:28	100	60,4	333,4	10:00	42,2	10:20	34,3	307,3	10:44	28,4	301,4	0,215
Peça 11	126	19,4	292,4	19,8	292,8	51	19,6	10:55	100	84,5	357,5	11:15	54,9	11:45	38,9	311,9	-	-	-	0,215
Peça 12	192	12,8	285,8	13,8	286,8	64	13,8	09:15	100	70,8	343,8	09:55	31,5	10:30	25	298	-	-	-	0,144
Peça 13	192	18,5	291,5	19,2	292,2	56	19,5	11:00	100	59	332	11:10	51,7	11:38	36,7	309,7	-	-	-	0,144
Peça 14	192	15,8	288,8	16,2	289,2	50	17,2	11:00	100	67	340	11:20	47,5	11:40	33,8	306,8	-	-	-	0,144
Peça 15	126	18,5	291,5	19,2	292,2	56	19,5	11:00	100	59,2	332,2	11:10	55	11:38	40,6	313,6	-	-	-	0,236
Peça 16	126	15,8	288,8	16,2	289,2	50	17,2	11:00	100	61,7	334,7	11:20	54,2	11:40	44,5	317,5	-	-	-	0,236
Peça 17	78	15,7	288,7	16,8	289,8	61	14,7	09:28	100	63,3	336,3	10:00	36,6	10:20	25,3	298,3	-	-	-	0,205
Peça 18	96	25,7	298,7	26,5	299,5	57	20,6	10:30	100	66	339	11:04	48,9	11:15	44,6	317,6	11:35	39,1	312,1	0,268
Peça 19	96	35,1	308,1	33,9	306,9	34	33,5	16:10	100	64,2	337,2	16:30	54,3	17:00	42,1	315,1	-	-	-	0,268
Peça 20	96	28,1	301,1	29,1	302,1	46	29,7	10:50	100	68,8	341,8	11:12	46,8	11:30	39,4	312,4	11:50	36,7	309,7	0,312
Peça 21	96	15,8	288,8	16,2	289,2	50	17,2	11:00	100	68,3	341,3	11:20	42,8	11:40	34,2	307,2	-	-	-	0,312
Peça 22	132	19,4	292,4	19,8	292,8	51	19,6	10:55	100	76,8	349,8	11:15	42,7	11:45	29,5	302,5	-	-	-	0,127
Peça 23	130	20,2	293,2	20,8	293,8	76	21,7	10:30	100	84,5	357,5	10:55	42,5	11:45	30,5	303,5	12:45	27,5	300,5	0,184
Peça 24	130	24,6	297,6	25,5	298,5	58	26,5	09:30	100	85,5	358,5	10:02	39,1	10:50	31,1	304,1	-	-	-	0,184
Peça 25	130	26,9	299,9	23,7	296,7	35	23	16:00	100	82,4	355,4	16:41	31	17:30	23,9	296,9	-	-	-	0,184
Peça 26	1032	24,6	297,6	25,5	298,5	58	26,5	09:30	100	81,3	354,3	10:02	40,5	10:50	30,6	303,6	-	-	-	0,063
Peça 27	1032	24,6	297,6	25,5	298,5	58	26,5	09:30	100	87,5	360,5	10:02	41,2	10:50	31,3	304,3	-	-	-	0,054
Peça 28	1032	24,6	297,6	25,5	298,5	58	26,5	09:30	100	77,8	350,8	10:02	38,4	10:50	30,2	303,2	-	-	-	0,011

APÊNDICE B

Peca	Espessura (m)	T1-T2	Δt T1-T2	T2-T3	Δt T2-T3	T3-T4	Δt T4-T3	ΔT TOTAL Pegas	ΔT TOTAL Ar	Δt (h) TOTAL	Δt (s) TOTAL	ΔT/Δs TOTAL	K	K*ΔT TOTAL processo	Q atual (W)	Q atual (W) ciclo	φ atual (W/s)	φ atual (W/s) ciclo	
Peca 01	0,0335	38,4	00:34	3,7	00:11	4,1	00:20	46,2	74,3	01:05	3900	0,0118	38	245,7840	188762,1120	7336,8358	5634689,9104	1,8812	1444,7923
Peca 02	0,0335	24,9	00:20	15	00:20	-	-	39,9	84,2	00:40	2400	0,0166	38	212,2680	163021,8240	6336,3582	4866623,1045	2,6401	2027,6346
Peca 03	0,065	7,1	00:10	17,5	00:28	-	-	24,6	81,5	00:38	2280	0,0108	38	385,8545	27781,5239	5936,2230	427408,0595	2,6036	187,4597
Peca 04	0,0165	15,6	00:20	13,6	00:30	-	-	29,2	64,9	00:50	3000	0,0097	38	312,2415	39342,4228	18923,7243	2384389,2629	6,3079	794,7964
Peca 05	0,03987	21,3	00:20	12	00:25	-	-	33,3	87,2	00:45	2700	0,0123	38	103,4448	52963,7401	2594,5524	1328410,8390	0,9609	492,0040
Peca 06	0,02859	8,8	00:20	12,1	00:30	-	-	20,9	64,9	00:50	3000	0,0070	38	118,0696	22669,3541	4129,7500	792911,9993	1,3766	264,3040
Peca 07	0,02059	40,3	00:40	7,9	00:35	-	-	48,2	87,2	01:15	4500	0,0107	38	259,1363	49754,1744	12585,5427	2416424,2046	2,7968	536,9832
Peca 08	0,02059	11,3	00:10	14,8	00:28	-	-	26,1	81,5	00:38	2280	0,0114	38	140,3207	26941,5757	6814,9931	1308478,6668	2,9890	573,8942
Peca 09	0,02059	5,6	00:25	11,4	00:45	-	-	17	64,4	01:10	4200	0,0040	38	91,3966	17548,1528	4438,8844	852265,7983	1,0569	202,9204
Peca 10	0,106	18,2	00:32	7,9	00:20	5,9	00:24	32	84,3	01:16	4560	0,0070	38	261,5726	32958,1421	2467,6656	310925,8686	0,5412	68,1855
Peca 11	0,106	29,6	00:20	16	00:30	-	-	45,6	80,6	00:50	3000	0,0152	38	372,7409	46965,3525	3516,4235	443069,3628	1,1721	147,6898
Peca 12	0,02	39,3	00:40	6,5	00:35	-	-	45,8	87,2	01:15	4500	0,0102	38	250,9849	48189,0997	12549,2447	2409454,9826	2,7887	535,4344
Peca 13	0,02	7,3	00:10	15	00:28	-	-	22,3	81,5	00:38	2280	0,0098	38	122,2044	23463,2516	6110,2218	1173162,5788	2,6799	514,5450
Peca 14	0,02	19,5	00:20	13,7	00:20	-	-	33,2	84,2	00:40	2400	0,0138	38	181,9366	34931,8364	9096,8324	1746591,8214	3,7903	727,7466
Peca 15	0,114	4,2	00:10	14,4	00:28	-	-	18,6	81,5	00:38	2280	0,0082	38	166,8113	21018,2188	1463,2567	184370,3402	0,6418	80,8642
Peca 16	0,114	7,5	00:20	9,7	00:20	-	-	17,2	84,2	00:40	2400	0,0072	38	154,2556	19436,2023	1353,1191	170493,0027	0,5638	71,0388
Peca 17	0,064	26,7	00:32	11,3	00:20	-	-	38	84,3	00:52	3120	0,0122	38	295,4073	23041,7657	4615,7383	360027,5896	1,4794	115,3935
Peca 18	0,06357	17,1	00:34	4,3	00:11	5,5	00:20	26,9	74,3	01:05	3900	0,0069	38	274,2923	26332,0601	4314,8072	414221,4895	1,1064	106,2106
Peca 19	0,06357	9,9	00:20	12,2	00:30	-	-	22,1	64,9	00:50	3000	0,0074	38	225,3479	21633,4025	3544,8788	340308,3612	1,1816	113,4361
Peca 20	0,048	22	00:22	7,4	00:18	2,7	00:20	32,1	71,9	01:00	3600	0,0089	38	381,1844	36593,6979	7941,3407	762368,7058	2,2059	211,7691
Peca 21	0,048	25,5	00:20	8,6	00:20	-	-	34,1	84,2	00:40	2400	0,0142	38	404,9342	38873,6791	8436,1283	809868,3137	3,5151	337,4451
Peca 22	0,044	34,1	00:20	13,2	00:30	-	-	47,3	80,6	00:50	3000	0,0158	38	227,8443	30075,4454	5178,2792	683352,8506	1,7261	227,8443
Peca 23	0,01	42	00:25	12	00:50	3	01:00	57	79,8	02:15	8100	0,0070	38	398,9045	51857,5907	39890,4544	5185759,0680	4,9247	640,2172
Peca 24	0,01	46,4	00:32	8	00:48	-	-	54,4	75,4	01:20	4800	0,0113	38	380,7089	49492,1567	38070,8898	4949215,6720	7,9314	1031,0866
Peca 25	0,01	51,4	00:41	7,1	00:49	-	-	58,5	73,1	01:30	5400	0,0108	38	409,4020	53222,2641	40940,2032	5322226,4119	7,5815	985,5975
Peca 26	0,01963	40,8	00:32	9,9	00:48	-	-	50,7	75,4	01:20	4800	0,0106	38	121,0059	124878,0814	6164,3348	6361593,5491	1,2842	1325,3320
Peca 27	0,01963	46,3	00:32	9,9	00:48	-	-	56,2	75,4	01:20	4800	0,0117	38	115,1003	118783,5071	5863,4894	6051121,0964	1,2216	1260,6502
Peca 28	0,0145	39,4	00:32	8,2	00:48	-	-	47,6	75,4	01:20	4800	0,0099	38	20,7596	21423,9047	1431,6964	1477510,6706	0,2983	307,8147

APÊNDICE C

Peça	Kftundo	α	Calor convecção (q)	q (Total processo)	N° de Nusselt	Prandtl	Re	v (m ² /s)	Rar (μ /kg.K)	P (Pa)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/(m.s))	A (m)	C (m)	L (m)	V (m ³)	Diâmetro equivalente	v (m/s)
Peça 01	0,0255	0,0072	0,0550	42,2397	0,00001	0,7	0,0018	0,0000156	287	101300	1,1817	1,8398E-05	3	6,5	2	39	2,4	8,2916E-07
Peça 02	0,2476	0,0582	0,4610	354,0720	0,00007	0,7	0,0110	0,0000146	287	101300	1,2222	1,7819E-05	3	6,5	2	39	2,4	4,7834E-06
Peça 03	0,0251	0,0048	0,0851	6,1266	0,00001	0,7	0,0030	0,0000149	287	101300	1,2108	1,7981E-05	3	6,5	2	39	2,4	6,8458E-07
Peça 04	0,0263	0,0077	0,0719	9,0591	0,00000	0,7	0,0010	0,0000165	287	101300	1,1456	1,8914E-05	3	6,5	2	39	2,4	1,0364E-06
Peça 05	0,2476	0,0577	0,2247	115,0335	0,00009	0,7	0,0126	0,0000143	287	101300	1,2350	1,7636E-05	3	6,5	2	39	2,4	4,5247E-06
Peça 06	0,0263	0,0074	0,0272	5,2199	0,00001	0,7	0,0016	0,0000165	287	101300	1,1456	1,8914E-05	3	6,5	2	39	2,4	9,2853E-07
Peça 07	0,2476	0,0713	0,5628	108,0626	0,00004	0,7	0,0074	0,0000143	287	101300	1,2350	1,7636E-05	3	6,5	2	39	2,4	5,1640E-06
Peça 08	0,0251	0,0067	0,0309	5,9413	0,00000	0,7	0,0012	0,0000149	287	101300	1,2108	1,7981E-05	3	6,5	2	39	2,4	8,6154E-07
Peça 09	0,0263	0,0102	0,0210	4,0407	0,00000	0,7	0,0012	0,0000166	287	101300	1,1438	1,8941E-05	3	6,5	2	39	2,4	9,9454E-07
Peça 10	0,2476	0,0591	0,5681	71,5828	0,00023	0,7	0,0276	0,0000146	287	101300	1,2226	1,7813E-05	3	6,5	2	39	2,4	3,7965E-06
Peça 11	0,0251	0,0059	0,0822	10,3571	0,00002	0,7	0,0044	0,0000149	287	101300	1,2071	1,8034E-05	3	6,5	2	39	2,4	6,2455E-07
Peça 12	0,2476	0,0652	0,5451	104,6633	0,00004	0,7	0,0073	0,0000143	287	101300	1,2350	1,7636E-05	3	6,5	2	39	2,4	5,1941E-06
Peça 13	0,0251	0,0046	0,0269	5,1743	0,00000	0,7	0,0012	0,0000149	287	101300	1,2108	1,7981E-05	3	6,5	2	39	2,4	8,6656E-07
Peça 14	0,2476	0,0535	0,3952	75,8695	0,00004	0,7	0,0073	0,0000146	287	101300	1,2222	1,7819E-05	3	6,5	2	39	2,4	5,3032E-06
Peça 15	0,0251	0,0038	0,0368	4,6351	0,00003	0,7	0,0047	0,0000149	287	101300	1,2108	1,7981E-05	3	6,5	2	39	2,4	6,1182E-07
Peça 16	0,2476	0,0309	0,3350	42,2141	0,00025	0,7	0,0293	0,0000146	287	101300	1,2222	1,7819E-05	3	6,5	2	39	2,4	3,7443E-06
Peça 17	0,2476	0,0659	0,6416	50,0451	0,00014	0,7	0,0184	0,0000146	287	101300	1,2226	1,7813E-05	3	6,5	2	39	2,4	4,1996E-06
Peça 18	0,0255	0,0057	0,0614	5,8924	0,00001	0,7	0,0030	0,0000156	287	101300	1,1817	1,8398E-05	3	6,5	2	39	2,4	7,2945E-07
Peça 19	0,0263	0,0066	0,0519	4,9814	0,00001	0,7	0,0030	0,0000165	287	101300	1,1456	1,8914E-05	3	6,5	2	39	2,4	7,9139E-07
Peça 20	0,0259	0,0068	0,0865	8,3074	0,00001	0,7	0,0024	0,0000158	287	101300	1,1722	1,8533E-05	3	6,5	2	39	2,4	7,9258E-07
Peça 21	0,2476	0,0536	0,8795	84,4309	0,00010	0,7	0,0147	0,0000146	287	101300	1,2222	1,7819E-05	3	6,5	2	39	2,4	4,4514E-06
Peça 22	0,0251	0,0069	0,0502	6,6324	0,00001	0,7	0,0022	0,0000149	287	101300	1,2071	1,8034E-05	3	6,5	2	39	2,4	7,4463E-07
Peça 23	0,0251	0,0074	0,0880	11,4360	0,00000	0,7	0,0007	0,0000150	287	101300	1,2038	1,8081E-05	3	6,5	2	39	2,4	1,0068E-06
Peça 24	0,0255	0,0076	0,0852	11,0750	0,00000	0,7	0,0007	0,0000155	287	101300	1,1860	1,8336E-05	3	6,5	2	39	2,4	1,0485E-06
Peça 25	0,0255	0,0090	0,0916	11,9096	0,00000	0,7	0,0007	0,0000157	287	101300	1,1769	1,8466E-05	3	6,5	2	39	2,4	1,0641E-06
Peça 26	0,0255	0,0076	0,0271	27,9442	0,00000	0,7	0,0012	0,0000155	287	101300	1,1860	1,8336E-05	3	6,5	2	39	2,4	9,1618E-07
Peça 27	0,0255	0,0076	0,0258	26,5804	0,00000	0,7	0,0012	0,0000155	287	101300	1,1860	1,8336E-05	3	6,5	2	39	2,4	9,1618E-07
Peça 28	0,0255	0,0076	0,0046	4,7941	0,00000	0,7	0,0009	0,0000155	287	101300	1,1860	1,8336E-05	3	6,5	2	39	2,4	9,7340E-07

APÊNDICE D

Peça	Área (m ²)	Peso (Kg)	Espessura (m)	ΔT TOTAL Peças	ΔT TOTAL Ar	Δt ideal processo (min)	Δt (s) TOTAL	ΔT/Δt TOTAL	K	K*A*ΔT	K*A*ΔT Total processo	Q Futuro (W)	Q Futuro (W) ciclo	φ Futuro (W/s)	φ Futuro (W/s) ciclo
Peça 01	0,140	2,7	0,034	55,6	75	00:20	1200	0,0463	38	43523,6800	33426186,2400	1299,2143	997796,6042	1,0827	831,4972
Peça 02	0,140	2,7	0,034	47,4	75	00:20	1200	0,0395	38	30980,6400	23793131,5200	924,7952	710242,7319	0,7707	591,8689
Peça 03	0,413	24,2	0,065	36,2	75	00:20	1200	0,0302	38	26824,2000	1931342,4000	412,6800	29712,9600	0,3439	24,7608
Peça 04	0,281	9,3	0,017	43,4	75	00:20	1200	0,0362	38	55248,2000	6961273,2000	3348,3758	421895,3455	2,7903	351,5795
Peça 05	0,082	3,4	0,040	35,4	75	00:20	1200	0,0295	38	18832,8000	9642393,6000	472,3552	241845,8390	0,3936	201,5382
Peça 06	0,149	8	0,029	34,7	75	00:20	1200	0,0289	38	44173,1000	8481235,2000	1545,0542	296650,4092	1,2875	247,2087
Peça 07	0,141	6,5	0,021	43,6	75	00:20	1200	0,0363	38	22863,8400	4389857,2800	1110,4342	213203,3647	0,9254	177,6695
Peça 08	0,141	6,5	0,021	26,1	75	00:20	1200	0,0218	38	19340,1000	3713299,2000	939,2958	180344,7887	0,7827	150,2873
Peça 09	0,141	6,5	0,021	25,2	75	00:20	1200	0,0210	38	33803,2800	6490229,7600	1641,7329	315212,7130	1,3681	262,6773
Peça 10	0,215	13,3	0,106	35,4	75	00:20	1200	0,0295	38	19774,4400	2491579,4400	186,5513	23505,4664	0,1555	19,5879
Peça 11	0,215	13,3	0,106	59,5	75	00:20	1200	0,0496	38	44315,6000	5583765,6000	418,0717	52677,0340	0,3484	43,8975
Peça 12	0,144	9,1	0,020	45,8	75	00:20	1200	0,0382	38	24017,5200	4611363,8400	1200,8760	230568,1920	1,0007	192,1402
Peça 13	0,144	9,1	0,020	34	75	00:20	1200	0,0283	38	25194,0000	4837248,0000	1259,7000	241862,4000	1,0498	201,5520
Peça 14	0,144	9,1	0,020	42	75	00:20	1200	0,0350	38	27451,2000	5270630,4000	1372,5600	263531,5200	1,1438	219,6096
Peça 15	0,236	15,8	0,114	34,2	75	00:20	1200	0,0285	38	25342,2000	3193117,2000	222,3000	28009,8000	0,1853	23,3415
Peça 16	0,236	15,8	0,114	36,7	75	00:20	1200	0,0306	38	23987,1200	3022377,1200	210,4133	26512,0800	0,1753	22,0934
Peça 17	0,205	7	0,064	38,3	75	00:20	1200	0,0319	38	21394,3800	1668761,6400	334,2872	26074,4006	0,2786	21,7287
Peça 18	0,268	14,2	0,064	41	75	00:20	1200	0,0342	38	32094,8000	3081100,8000	504,8734	48467,8433	0,4207	40,3899
Peça 19	0,268	14,2	0,064	39,2	75	00:20	1200	0,0327	38	49901,6000	4790553,6000	784,9866	75358,7164	0,6542	62,7989
Peça 20	0,312	13	0,048	43,8	75	00:20	1200	0,0365	38	49432,6800	4745537,2800	1029,8475	98865,3600	0,8582	82,3878
Peça 21	0,312	13	0,048	43,3	75	00:20	1200	0,0361	38	28300,8800	2716884,4800	589,6017	56601,7600	0,4913	47,1681
Peça 22	0,127	5,182	0,044	51,8	75	00:20	1200	0,0432	38	38580,6400	5092644,4800	876,8327	115741,9200	0,7307	96,4516
Peça 23	0,184	4,527	0,010	59,5	75	00:20	1200	0,0496	38	49063,7000	2943822,0000	4906,3700	294382,2000	4,0886	245,3185
Peça 24	0,184	4,527	0,010	60,5	75	00:20	1200	0,0504	38	60923,5000	3655410,0000	6092,3500	365541,0000	5,0770	304,6175
Peça 25	0,184	4,527	0,010	57,4	75	00:20	1200	0,0478	38	50167,6000	3010056,0000	5016,7600	301005,6000	4,1806	250,8380
Peça 26	0,063	1,528	0,020	56,3	75	00:20	1200	0,0469	38	56694,1000	58508311,2000	2888,1355	2980555,8431	2,4068	2483,7965
Peça 27	0,054	1,34	0,020	62,5	75	00:20	1200	0,0521	38	62937,5000	64951500,0000	3206,1895	3308787,5700	2,6718	2757,3230
Peça 28	0,011	0,28	0,015	52,8	75	00:20	1200	0,0440	38	53169,6000	54871027,2000	3666,8690	3784208,7724	3,0557	3153,5073

APÊNDICE E

Peça	Kfluído	α	Calor convecção (q)	q (Total processo)	Nº de Nusselt	Prandtl	Re	v (Ar inicial) (m ² /s)	v (Ar final) (m ² /s)	Rar (μ /kg.K)	P (Pa)	ρ (Ar inicial) (kg/m ³)	ρ Ar final (kg/m ³)	μ (Ar inicial) (kg/m.s)	μ (Ar final) (kg/m.s)
Peça 01	0,0255	0,0086	1,4364	36,9165	0,00111	0,7	0,0969	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 02	0,2476	0,0691	9,8286	155,2916	0,01063	0,7	0,5925	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 03	0,0251	0,0071	0,7715	14,2734	0,00187	0,7	0,1475	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 04	0,0263	0,0114	1,4848	52,1161	0,00044	0,7	0,0467	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 05	0,2476	0,0614	6,5185	83,4373	0,01380	0,7	0,7302	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 06	0,0263	0,0123	1,2849	45,0983	0,00083	0,7	0,0772	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 07	0,2476	0,0645	8,4351	107,9691	0,00760	0,7	0,4529	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 08	0,0251	0,0067	0,5253	9,7185	0,00056	0,7	0,0562	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 09	0,0263	0,0151	1,1418	40,6469	0,00070	0,7	0,0669	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 10	0,2476	0,0654	6,9414	108,9806	0,03721	0,7	1,6145	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 11	0,0251	0,0077	1,3672	26,5228	0,00327	0,7	0,2308	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 12	0,2476	0,0652	8,9548	114,6208	0,00746	0,7	0,4462	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 13	0,0251	0,0070	0,7176	13,2752	0,00057	0,7	0,0570	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 14	0,2476	0,0677	8,5306	134,7834	0,00622	0,7	0,3857	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 15	0,0251	0,0070	0,7225	13,3658	0,00325	0,7	0,2296	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 16	0,2476	0,0660	7,2656	114,7961	0,03453	0,7	1,5208	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 17	0,2476	0,0664	7,6303	119,7956	0,02283	0,7	1,0921	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 18	0,0255	0,0087	1,0641	27,3468	0,00211	0,7	0,1624	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 19	0,0263	0,0118	1,3861	48,6537	0,00177	0,7	0,1410	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 20	0,0259	0,0093	1,2199	34,2787	0,00118	0,7	0,1024	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 21	0,2476	0,0681	8,8423	139,7089	0,01500	0,7	0,7804	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 22	0,0251	0,0076	1,1752	22,7989	0,00134	0,7	0,1130	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 23	0,0251	0,0078	1,3842	27,9602	0,00028	0,7	0,0325	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 24	0,0255	0,0084	1,5332	37,7172	0,00025	0,7	0,0297	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 25	0,0255	0,0088	1,5144	40,7374	0,00030	0,7	0,0343	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 26	0,0255	0,0084	1,4261	35,0816	0,00049	0,7	0,0509	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 27	0,0255	0,0084	1,5842	38,9722	0,00049	0,7	0,0509	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05
Peça 28	0,0255	0,0084	1,3368	32,8853	0,00036	0,7	0,0399	0,000023	0,0000155	287	101300	0,9463	1,1844	2,1764E-05	1,8359E-05

APÊNDICE F

Peça	A (m)	C (m)	L (m)	V (m³)	Diâmetro equivalente	V (Ar inicial) (m/s)	V (Ar final) (m/s)	k (Ar)	m (kg) (Ar inicial)	% (m inicial/m final)	t (s)	m (kg) (Ar final)	m total (kg)	N (trocas/h)
Peça 01	3	6,5	2	39	2,4	6,6540E-08	4,4842E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 02	3	6,5	2	39	2,4	4,0677E-07	2,7413E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 03	3	6,5	2	39	2,4	5,2206E-08	3,5182E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 04	3	6,5	2	39	2,4	6,5046E-08	4,3835E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 05	3	6,5	2	39	2,4	4,2121E-07	2,8386E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 06	3	6,5	2	39	2,4	6,2080E-08	4,1837E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 07	3	6,5	2	39	2,4	5,0590E-07	3,4093E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 08	3	6,5	2	39	2,4	6,2760E-08	4,2295E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 09	3	6,5	2	39	2,4	7,4714E-08	5,0351E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 10	3	6,5	2	39	2,4	3,5031E-07	2,3608E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 11	3	6,5	2	39	2,4	5,0071E-08	3,3744E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 12	3	6,5	2	39	2,4	5,1316E-07	3,4583E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 13	3	6,5	2	39	2,4	6,5568E-08	4,4187E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 14	3	6,5	2	39	2,4	4,4358E-07	2,9893E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 15	3	6,5	2	39	2,4	4,6328E-08	3,1221E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 16	3	6,5	2	39	2,4	3,0683E-07	2,0677E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 17	3	6,5	2	39	2,4	3,9246E-07	2,6448E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 18	3	6,5	2	39	2,4	5,8752E-08	3,9593E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 19	3	6,5	2	39	2,4	5,0997E-08	3,4368E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 20	3	6,5	2	39	2,4	4,9072E-08	3,3070E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 21	3	6,5	2	39	2,4	3,7394E-07	2,5200E-07	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 22	3	6,5	2	39	2,4	5,9094E-08	3,9824E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 23	3	6,5	2	39	2,4	7,4745E-08	5,0372E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 24	3	6,5	2	39	2,4	6,8217E-08	4,5973E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 25	3	6,5	2	39	2,4	7,8903E-08	5,3174E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 26	3	6,5	2	39	2,4	5,9586E-08	4,0155E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 27	3	6,5	2	39	2,4	5,9619E-08	4,0178E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30
Peça 28	3	6,5	2	39	2,4	6,3283E-08	4,2647E-08	0,03	0,0243	0,053%	0,63	46,19297	461,9297	30

APÊNDICE G

Peça	Δt troca (s)	trocas ciclo	ṁ (kg/s)	V _m (m/s)	V _v (m ³ /s)	cp (J/k.°C)	qT (W)	V _i (m ³ /h)	P _v (Pa)	P _v (mmca)	P _e (Pa)	P _e (mmca)	P _t (Pa)	P _t (mmca)	Pot. Cal (W)
Peça 01	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	21,5526	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 02	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	18,3739	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 03	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	14,0324	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 04	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	16,8234	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 05	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	13,7223	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 06	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	13,4510	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 07	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	16,9009	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 08	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	10,1173	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 09	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	9,7684	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 10	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	13,7223	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 11	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	23,0643	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 12	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	17,7537	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 13	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	13,1796	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 14	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	16,2807	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 15	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	13,2572	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 16	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	14,2262	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 17	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	14,8465	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 18	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	15,8931	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 19	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	15,1953	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 20	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	16,9785	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 21	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	16,7846	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 22	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	20,0795	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 23	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	23,0643	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 24	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	23,4520	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 25	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	22,2503	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 26	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	21,8239	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 27	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	24,2273	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549
Peça 28	0,00833	10	0,3849	0,0862	0,3250	1,007	20,4672	310,3613	0,0044	0,0004	34,8579	3,5569	34,8623	3,5574	8379,7549

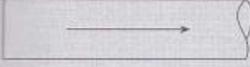
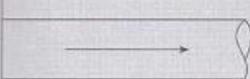
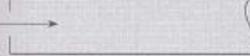
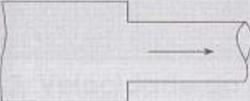
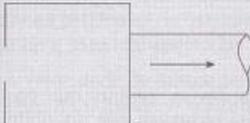
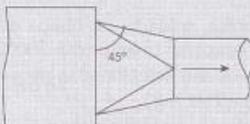
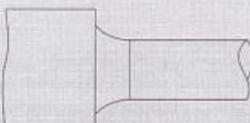
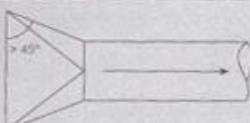
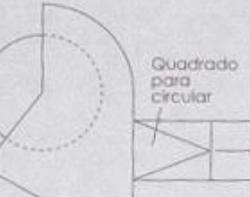
ANEXO A

TABLE A7.1

Ideal Gas Properties of Air, Standard Entropy at 0.1-MPa (1-Bar) Pressure

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s_T^0 (kJ/kg-K)	T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s_T^0 (kJ/kg-K)
200	142.77	200.17	6.46260	1100	845.45	1161.18	8.24449
220	157.07	220.22	6.55812	1150	889.21	1219.30	8.29616
240	171.38	240.27	6.64535	1200	933.37	1277.81	8.34596
260	185.70	260.32	6.72562	1250	977.89	1336.68	8.39402
280	200.02	280.39	6.79998	1300	1022.75	1395.89	8.44046
290	207.19	290.43	6.83521	1350	1067.94	1455.43	8.48539
298.15	213.04	298.62	6.86305	1400	1113.43	1515.27	8.52891
300	214.36	300.47	6.86926	1450	1159.20	1575.40	8.57111
320	228.73	320.58	6.93413	1500	1205.25	1635.80	8.61208
340	243.11	340.70	6.99515	1550	1251.55	1696.45	8.65185
360	257.53	360.86	7.05276	1600	1298.08	1757.33	8.69051
380	271.99	381.06	7.10735	1650	1344.83	1818.44	8.72811
400	286.49	401.30	7.15926	1700	1391.80	1879.76	8.76472
420	301.04	421.59	7.20875	1750	1438.97	1941.28	8.80039
440	315.64	441.93	7.25607	1800	1486.33	2002.99	8.83516
460	330.31	462.34	7.30142	1850	1533.87	2064.88	8.86908
480	345.04	482.81	7.34499	1900	1581.59	2126.95	8.90219
500	359.84	503.36	7.38692	1950	1629.47	2189.19	8.93452
520	374.73	523.98	7.42736	2000	1677.52	2251.58	8.96611
540	389.69	544.69	7.46642	2050	1725.71	2314.13	8.99699
560	404.74	565.47	7.50422	2100	1774.06	2376.82	9.02721
580	419.87	586.35	7.54084	2150	1822.54	2439.66	9.05678
600	435.10	607.32	7.57638	2200	1871.16	2502.63	9.08573
620	450.42	628.38	7.61090	2250	1919.91	2565.73	9.11409
640	465.83	649.53	7.64448	2300	1968.79	2628.96	9.14189
660	481.34	670.78	7.67717	2350	2017.79	2692.31	9.16913
680	496.94	692.12	7.70903	2400	2066.91	2755.78	9.19586
700	512.64	713.56	7.74010	2450	2116.14	2819.37	9.22208
720	528.44	735.10	7.77044	2500	2165.48	2883.06	9.24781
740	544.33	756.73	7.80008	2550	2214.93	2946.86	9.27308
760	560.32	778.46	7.82905	2600	2264.48	3010.76	9.29790
780	576.40	800.28	7.85740	2650	2314.13	3074.77	9.32228
800	592.58	822.20	7.88514	2700	2363.88	3138.87	9.34625
850	633.42	877.40	7.95207	2750	2413.73	3203.06	9.36980
900	674.82	933.15	8.01581	2800	2463.66	3267.35	9.39297
950	716.76	989.44	8.07667	2850	2513.69	3331.73	9.41576
1000	759.19	1046.22	8.13493	2900	2563.80	3396.19	9.43818
1050	802.10	1103.48	8.19081	2950	2613.99	3460.73	9.46025
1100	845.45	1161.18	8.24449	3000	2664.27	3525.36	9.48198

ANEXO B

Tipo de captor	Descrição	λ	μ
	Extremidade plana de duto	0,93	0,72
	Extremidade de duto flangeada	0,49	0,82
	Boca bem arredondada	0,04	0,98
	Orifício de cantos vivos	1,78	0,60
	Captor direto no duto	0,50	0,82
	Orifício mais duto flangeado ($C_{orifício} = C_{duto}$)	2,30	0,55
	Captor ligado ao duto por peça cônica: circular retangular	0,15 0,25	0,93 0,89
	Captor ligado ao duto por peça arredondada	0,06-0,10	0,97
	Captor cônico: circular retangular	0,15 0,25	0,93 0,89
	Câmara de gravidade	1,5	0,63
	Captor padrão de esmeril Ver também a Fig. 4.6	0,65	0,78

ANEXO C

Condutividade														
	1 peça	768 peças	1 peça	768 peças		1 peça	768 peças	1 peça	768 peças		1 peça	768 peças	1 peça	768 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 01	7336,8	5634689,91	1299,2	997796,604	Peça 02	6336,4	4866323,1	924,8	710242,732	Peça 03	5936,2	427408,059	412,88	29712,96
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	1.8812	1444,79228	1,0827	831,49717		2.6401	2027,63463	0,7707	591,868943		2.6036	187,459675	0,3499	24,7608
	1 peça	512 peças	1 peça	512 peças		1 peça	192 peças	1 peça	192 peças		1 peça	192 peças	1 peça	192 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 05	2594,6	1328410,84	472,36	241845,839	Peça 06	4129,7	792911,999	1545,1	296650,409	Peça 07	12586	2416424,2	1110,4	213203,365
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	0,9609	492,004014	0,3936	201,538199		1,3766	264,304	1,2875	247,208674		2,7968	536,983157	0,9254	177,669471
	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças		1 peça	126 peças	1 peça	126 peças		1 peça	126 peças	1 peça	126 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 09	4438,9	852265,798	1641,7	315212,713	Peça 10	2467,7	310925,869	186,55	23505,4664	Peça 11	3516,4	443069,363	418,07	52677,034
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	1,0569	202,920428	1,3681	262,67261		0,5412	68,1854975	0,1555	19,5878887		1,1721	147,689788	0,3484	43,8975283
	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças		1 peça	192 peças	1 peça	192 peças		1 peça	126 peças	1 peça	126 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 13	6110,2	1173162,58	1259,7	241862,4	Peça 14	9096,8	1746591,82	1372,6	263531,52	Peça 15	1463,3	184370,34	222,3	28009,8
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	2,6799	514,544991	1,0498	201,552		3,7903	727,746592	1,1438	219,6096		0,6418	80,8641843	0,1853	23,3415
	1 peça	78 peças	1 peça	78 peças		1 peça	96 peças	1 peça	96 peças		1 peça	96 peças	1 peça	96 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 17	4615,7	360027,59	334,29	26074,4006	Peça 18	4314,8	414221,489	504,87	48467,8433	Peça 19	3544,9	340308,361	784,99	75358,7164
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	1,4794	115,393458	0,2786	21,728672		1,1064	106,210638	0,4207	40,3896694		1,1816	113,43612	0,6542	62,7989303
	1 peça	96 peças	1 peça	96 peças		1 peça	132 peças	1 peça	132 peças		1 peça	130 peças	1 peça	130 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 21	8436,1	809868,314	589,6	56601,76	Peça 22	5178,3	683532,851	876,83	115741,92	Peça 23	39890	5185759,07	4906,4	294382,2
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	3,5151	337,445131	0,4913	47,1681333		1,7261	227,844284	0,7307	96,4516		4,9247	640,217169	4,0886	245,3185
	1 peça	130 peças	1 peça	130 peças		1 peça	1032 peças	1 peça	1032 peças		1 peça	1032 peças	1 peça	1032 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 25	40940	5322226,41	5016,8	301005,6	Peça 26	6164,3	6361593,55	2888,1	2990555,84	Peça 27	5863,5	6051121,1	3206,2	3308787,57
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	7,5815	985,597484	4,1806	250,838		1,2842	1325,33199	2,4068	2483,79654		1,2216	1260,65023	2,6718	2757,32298
	1 peça	126 peças	1 peça	126 peças		1 peça	126 peças	1 peça	126 peças		1 peça	126 peças	1 peça	126 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
Peça 04	18924	2384389,26	3348,4	421895,345	Peça 08	6815	1308478,67	399,3	180344,789	Peça 12	12549	2409454,98	1200,9	230568,192
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	6,3079	794,796421	2,7903	351,579455		2,989	573,894152	0,7827	150,287324		2,7887	535,434441	1,0007	192,14016
	1 peça	192 peças	1 peça	192 peças		1 peça	192 peças	1 peça	192 peças		1 peça	192 peças	1 peça	192 peças
	Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro		Q atual	Q atual (W)	Q	Q Futuro
	1431,7	1477510,67	3666,9	3784208,77		1431,7	1477510,67	3666,9	3784208,77		1431,7	1477510,67	3666,9	3784208,77
	φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro		φ atual	φ atual	φ	φ Futuro
	0,2983	307,814723	3,0557	3153,50731		0,2983	307,814723	3,0557	3153,50731		0,2983	307,814723	3,0557	3153,50731

ANEXO D

