UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JORGE LYRA VIDEIRA

FATORES DE INFLUÊNCIA E MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO

GUARATINGUETÁ
2016

JORGE LYRA VIDEIRA

FATORES DE INFLUÊNCIA E MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. José Alexandre Matelli

GUARATINGUETÁ

2016

Videira, Jorge Lyra
V652f Fatores de influência e melhoria da eficiência energética de processos industriais: estudo de casos / Jorge Lyra Videira – Guaratinguetá, 2017.
44 f : il.
Bibliografia: f. 44

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Consumo de energia. 2. Controle de custo. 3. Ar comprimido.
4. Fornos. I. Título

CDU 620.92

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JORGE LYRA VIDEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM NOME DO CURSO"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador/UNESP-FEG

Prof. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
UNESP-FEG

Prof. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG

RESUMO

O presente trabalho consiste em analisar o processo de uma empresa de pintura de objetos metálicos em Jundiaí e propor medidas que aumentem a eficiência energética do processo. Este é dividido em quatro partes principais: pré-tratamento, aplicação de tinta, polimerização da tinta e secagem. O estudo se baseia na aplicação de tinta e em sua polimerização por serem as etapas que consomem mais energia. Dentro destas etapas, os equipamentos/sistemas que o estudo foca são o sistema de ar comprimido e a estufa de polimerização. Essas medidas são: diminuição da temperatura do ar de admissão do compressor para o aumento da eficiência de compressão, reparo dos vazamentos do sistema de distribuição de ar comprimido para a diminuição da potência requerida pelo motor de acionamento, instalação de uma cortina na porta da estufa que impeça a perda de energia por radiação, projeto de um tocador de calor compacto para pré-aquecer o ar que é queimado nos queimadores e construção de uma câmara de isolamento térmico em vota do transportador aéreo que desloca as peças pela fábrica, uma vez que esses precisam ser aquecidos de 25 para 230 ºC toda vez que entram na estufa. A medida que mais economiza energia é a implementação do trocador de calor compacto, com uma economia de cerca de RS1453,00 por mês, considerando que a estufa fica ligada 45 horas por mês. Caso a empresa adote todas as medidas sugeridas, ela economizará cerca de R$1927,64 por mês.

PALAVRAS CHAVE: *Eficiência energética. Redução de custos. Sistema de ar comprimido. Estufa de polimerização.*

ABSTRACT

The present work consists in analyzing the process of a metallic objects painting company in Jundiaí and proposing measures that would increase the energy efficiency of the process. This procedure is divided into four steps: pre-treatment, paint application, paint polymerization and drying. The study is based on the second and third steps due to the bigger amount of energy that it consumes. Within these steps, the equipment/systems that the study focuses on were the compressed air system and a polymerization oven. The proposed measures are: decrease of the compressor intake air temperature to increase compression efficiency, repair leaks from the compressed air distribution system for a decrease in the power required of the drive motor, installation of a curtain at the door oven that would prevent a loss of energy by radiation, design of a compact heat exchanger to preheat the air that is burned on the burners and building a thermal insulation chamber around the air transport that carries the objects in the plant, since it has to be heated from 25 to 230 °C every time they enter the oven. The measures that save more energy, and consequently decrease the process cost, are the compact heat exchanger that saves nearly R$1453,00 per month, considering the oven operates 45 hours per month. If all measures are implemented the cost saving, per month, will be R$1927,64

KEYWORDS: *Energy efficiency Cost reduction. Compressed air system. Polymerization oven.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **7**
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **8**
2.1 AR COMPRIMIDO **8**
2.2 SUBSISTEMAS DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO **9**
2.2.1 Sistema de geração **9**
2.2.2 Sistema de distribuição **9**
2.2.3 Sistema de uso final **9**
2.3 ESTUFA DE POLIMERIZAÇÃO **10**
2.3.1 Polimerização **10**
2.3.2 Definições relacionadas à radiação da estufa **10**
3 MATERIAIS E MÉTODOS **12**
3.1 PRÉ-TRATAMENTO **12**
3.2 APLICAÇÃO DA TINTA **13**
3.3 POLIMERIZAÇÃO DA TINTA **15**
4 MEDIDAS PROPOSTAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO **17**
4.1 MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO **17**
4.1.1 Esfriamento do ar de admissão do compressor **17**
4.1.1.1 Projeto do esfriamento do ar de admissão do compressor **18**
4.1.2 Perdas devido a vazamentos **21**
4.2 MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ESTUFA DE POLIMERIZAÇÃO **23**
4.2.1 Cortina para evitar perdas por radiação na porta da estufa **23**
4.2.1.1 Cálculo da energia salva **24**
4.2.2 Câmara do transportador aéreo **25**
4.2.3 Trocador de calor **33**
5 CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS PROPOSTAS **37**
5.1 DIMINUIÇÃO DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO COMPRESSOR **37**
5.2 REPARAÇÃO DOS VAZAMENTOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO **37**
5.3 INSTALAÇÃO DA CORTINA PARA A EVITAÇÃO DE PERDA DE CALOR DA ESTUFA POR RADIAÇÃO **38**
5.4 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE ISOLAMENTO **38**
5.5 IMPLEMENTAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR COMPACTO **38**
6 VALOR ECONÔMICO ECONOMIZADO COM AS MEDIDAS IMPLEMENTADAS **39**
6.1 DIMINUIÇÃO DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO COMPRESSOR **39**
6.2 REPARAÇÃO DOS VAZAMENTOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO **39**
6.3 INSTALAÇÃO DA CORTINA PARA A EVITAÇÃO DE PERDA DE CALOR DA ESTUFA POR RADIAÇÃO **39**
6.4 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE ISOLAMENTO **40**
6.5 IMPLEMENTAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR COMPACTO **40**
7 TABELA DE VALORES GASTOS E ECONOMIZADOS **41**
8 CONCLUSÃO **43**

REFERÊNCIAS.....44

1 INTRODUÇÃO

No mundo atual o uso de energia, independente de seu tipo, é indispensável para a sociedade. Seu uso é utilizado tanto para o conforto da população quanto em processos industriais. Como esses dois consumidores crescem a cada dia, o uso da energia é, também, crescente. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (2014) aponta, a demanda total de energia pode dobrar até o ano de 2050, no Brasil.

Esse aumento provoca alguns malefícios. Como será necessária a construção de novas usinas geradoras para suprir esta necessidade, os recursos investidos deixarão de ir para outras áreas. Além disso, o aumento dessa demanda prejudicará o ambiente, seja na combustão de combustíveis fosseis, na construção de usinas hidrelétricas ou nos gases liberados em usinas termelétricas.

Uma maneira de minimizar a crescente demanda de energia é investir na eficiência energética. No Brasil, o Ministério de Minas e Energia criou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) para este fim. Medidas já foram tomadas, como o lançamento do selo Procel, por exemplo. Com ele, o consumidor tem fácil acesso às informações relacionadas à eficiência energética de certos eletrodomésticos, o que incentiva as empresas a fabricarem produtos mais eficientes, diminuindo a energia consumida pela população. Além disso, a Procel disponibiliza um site com informações e orientações, tanto para a população quanto as indústrias, economizarem energia elétrica.

Porém, esse investimento não é feito só pelo governo, mas também pelas próprias empresas, pois gastando menos dinheiro na produção, seu produto final, ou serviço, ficam proporcionalmente mais barato, o que contribuir para o lucro da empresa.

O objetivo deste trabalho é, portanto, analisar a influência da implementação de medidas de eficiência energética numa empresa de pintura de objetos metálicos em Jundiaí. O processo desta empresa será inteiramente analisado, serão propostas medidas de melhoria na eficiência energética e no final será calculada a economia de energia com a implementação destas medidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AR COMPRIMIDO

Segundo Novais (1995), o ar comprimido é amplamente empregado na indústria de transformação, sendo considerada a segunda fonte de energía mais utilizada. Além disso, é a energia mais cara e a mais deficientemente tratada.

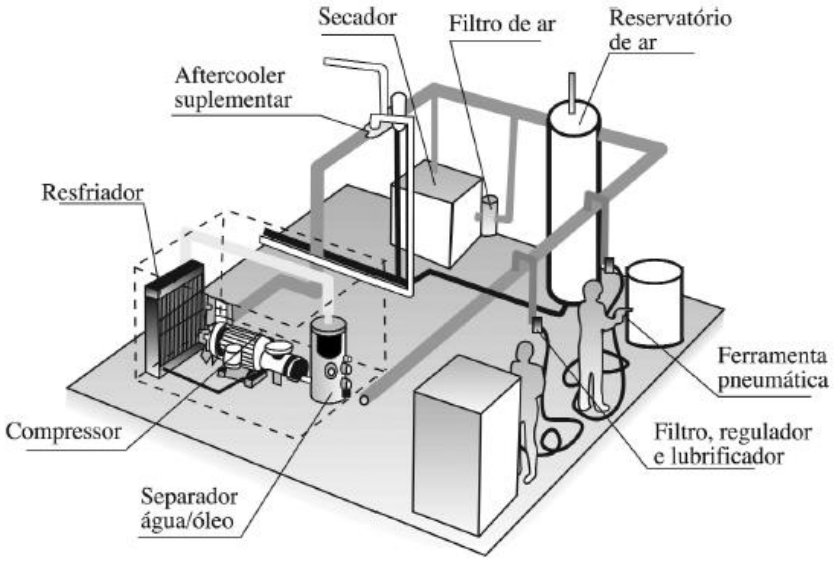
Conforme Novais (1995), o ar a ser comprimido é o próprio ar atmosférico e apresenta grande energia proveniente de um processo termodinâmico que recebe energia mecânica do compressor. Este, por sua vez, consome energia elétrica para ser acionado. Tornar um sistema de ar comprimido mais eficiente seria diminuir o consumo de energia elétrica sem grandes mudanças no processo fabril.

Segundo Atlas Copco (1976) seu uso não pode ser substituido em diversos tipos de aplicações. Sua composição é de 20,95% de oxigênio, 78,09% de nitrogênio e 0,96% de outros gases.

De acordo com a PROCEL/Eletrobés (2005), um sistema de ar comprimido é responsável pela produção do ar comprimido e de sua distribuição, sendo que precisa ser dimensionado de acordo com o que o processo da empresa requer. É composto por principalmente 3 sub-sistemas: sistema de geração, sistema de distribuição e sistema de uso final.

A figura 1 ilustra um sistema de ar comprimido e seus principais componentes

Figura 1 – Sistema de ar comprimido e seus principais componentes



Fonte: PROCEL/Eletrobrás (2005)

2.2 SUBSISTEMAS DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Os itens 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 são descritos pela PROCEL/Eletrobrás (2005). Os equipamentos e os próprios subsistemas descritos podem ser vistos na figura 1.

2.2.1 Sistema de geração

É responsável pela compressão do ar atmosférico. Geralmente é composto por muitos subsistemas e subcomponentes. Estes primeiros são os compressores, motores e acionamentos, controles, equipamentos de tratamento de ar, reservatórios e acessórios. Os motores fornecem energia mecânica para o acionamento dos compressores, que aumentam a pressão do ar. Os controles monitoram a quantidade, pressão e vazão do ar do sistema. Os equipamentos de tratamento removem água líquida e impurezas no ar. Por fim os acessórios mantém o funcionamento do sistema

2.2.2 Sistema de distribuição

É responsável pelo transporte do ar pressurizado do reservatório aos pontos de uso final. Um sistema de ar comprimido pode conter diversos reservatórios caso haja processos que necessitam de diferentes pressões. As linhas de distribuição contêm válvulas de isolamento, reguladores de pressão, indicadores de pressão, etc. Este sistema necessita um balanceamento da pressão do ar, boa drenagem do condensado e perfeita estanqueidade.

2.2.3 Sistema de uso final

É composto pelos aparelhos que aplicarão o ar comprimido no processo. O ar comprimido tem amplo uso no setor industrial como: acionamento de ferramentas pneumáticas, transporte, jateamento, operações de inspeção e teste, etc.

2.3 ESTUFA DE POLIMERIZAÇÃO

2.3.1 Polimerização

Segundo a própria empresa analisada a polimerização da tinta é o ato de aquecê-la. Este aquecimento tem por finalidade, inicialmente, promover a fusão do pó possibilitando o alastramento, para posterior polimerização. Forma-se assim uma película uniforme e completamente aderida ao substrato.

2.3.2 Definições relacionadas à radiação da estufa:

As definições: “a”, “b”, “d”, “e” e “f” foram baseadas no livro de Incropera et al. (2015).

a) Corpo negro:

Um corpo negro segue 3 características:

- “Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independente do seu comprimento de onda e de sua direção”.
- “Para uma dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro”.
- “Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso”.

b) Emissividade:

“Razão entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura”

c) Absortividade:

"Fração da radiação incidente absorvida pela matéria"

d) Refletividade:

"Fração da radiação incidente refletida pela matéria"

e) Transmissividade:

"Fração da radiação incidente transmitida pela matéria"

f) Ângulo sólido:

"Região compreendida por um elemento de área sobre a superfície de uma esfera em relação ao centro da esfera"

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A empresa analisada realiza pinturas eletrostáticas em objetos metálicos.

A pintura eletrostática é uma das formas de pintura mais resistente e que apresenta melhores resultados de acabamento e uniformidade. Essa forma de pintura utiliza de sistemas que, por meio de cargas elétricas, estimulam a disposição da tinta em pó na superfície a ser pintada. A cura da camada de tinta aderida é obtida pelo processo de polimerização, formando um filme rígido obtido em estufa convectiva, com temperatura variando entre 150º e 250º C. Um ótimo exemplo de utilização de eletrostática à pó é para pintura de molas automotivas, que mesmo flexionadas não apresentam qualquer problema no acabamento ou na aparência.

Usualmente esse tipo de pintura é aplicada em superfícies metálicas, mas pode ser utilizada em qualquer material carregado eletricamente. A tinta utilizada é em pó e se subdivide em três tipos:

Poliéster: Com ótima aderência é utilizada principalmente para resistir a ambientes externos por um longo período sem amarelar ou perder seu brilho.

Epóxi: Com grande resistência à corrosão.

Hibrido: Combinação das duas anteriores.

As linhas de pintura eletrostática automáticas, ideais para pinturas em larga escala, se baseiam na aplicação por pistolas automáticas que ionizam a tinta com cargas opostas, enquanto um transportador se encarrega de movê-las para a estufa, tornando o processo rápido e eficiente.

O processo é simples e contem 4 partes principais: pré-tratamento, aplicação de tinta, polimerização da tinta e a secagem

3.1 PRÉ-TRATAMENTO

O pré-tratamento da superfície é importante, pois nenhum sistema de pintura dará o desempenho esperado quando aplicado sobre uma superfície despreparada.

A pintura sobre superfícies com ferrugem, graxa, e outras contaminações não significa apenas tempo de produção perdido, mas também desperdício de tinta e gás, o que representa custos desnecessários.

Sem uma boa preparação da superfície antes da pintura, a aderência da tinta será mínima ou nenhuma.

Resíduos de óleos, detergente, sabões, poeiras e defeitos físicos na superfície influem na má aderência da pintura.

Resíduos de sais solúveis, como os sais comuns de sulfatos ou cloretos, influem drasticamente na durabilidade da pintura, ocasionando empolamento e ferrugem abaixo da película de tinta.

Em resumo, a pintura aplicada sobre uma superfície mal preparada não terá sólidos alicerces para a aderência perfeita. O pré-tratamento consiste em três etapas: limpeza com jateamento abrasivo e processos de fosfatização 3 em 1. Como essas etapas não consomem muita energia elas não serão levadas em consideração neste trabalho.

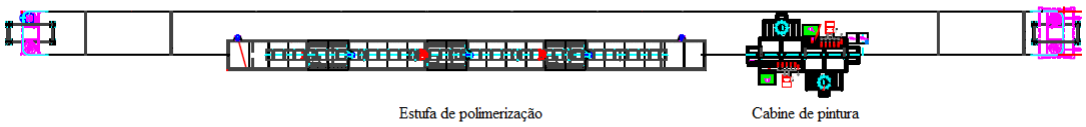
3.2 APLICAÇÃO DA TINTA

O segundo processo consiste em inserir o objeto, preso na gancheira, na câmara de pintura.

O transportador aéreo tem comprimento de 200 metros. Ele leva as peças para a cabine de pintura, depois para a estufa de polimerização e finalmente são retiradas e postas em um local para o esfriamento até a temperatura ambiente. Sua velocidade é de 2,7 m/min.

A figura 2 mostra o esquema do processo global:

Figura 2 – Lay-out da empresa de pintura eletrostática.



Fonte: Jundiaí Pintura Eletrostática (2016)

As gancheiras são os suportes que ligam os trolleys aos objetos, o trolley, por sua vez, é um outro tipo de suporte que conecta a gancheira ao transportador aéreo. A gancheira é uma haste de metal que é acoplada e desacoplada do trolley junto com a peça que será pintada. Nas figuras 3 e 4 são mostradas, respectivamente, as fotos do transportador aéreo e do trolley acoplado na corrente, respectivamente.

Figura 3 – Transportador aéreo

Fonte: Jundiaí Pintura Eletrostática (2016)

Figura 4 – Trolley acoplado na corrente

Fonte: Jundiaí Pintura Eletrostática (2016)

Os trolleys são eletrizados para que o objeto fique carregado eletricamente, o que é indispensável para que a tinta permaneça aderida na superfície até sua polimerização. O valor da tensão varia de 20 a 90 kV.

A cabine de pintura é uma câmara onde estão localizadas pistolas automáticas que disparam a tinta em pó no objeto a ser pintado. Para uma boa qualidade da pintura a tinta é jogada junto com ar comprimido a uma pressão de 6 kgf/cm².

Na cabine de aplicação, a recuperação do excesso de pó não atraído pelo substrato, é feita através de um sistema de exaustão que aspira as partículas de pó, coletando-as em filtros. Um sistema de recuperação eficiente deve recuperar de 95 a 99% da tinta aspirada, barateando os custos da pintura. Devido à essa alta eficiência, um melhoramento do processo de recuperação de tinta foi descartado.

Além disso, o ar comprimido desempenha outra função nesta câmara: o tanque onde é armazenado a tinta precisa estar fluidizado, utilizando para isso o ar comprimido continuamente.

A figura 5 mostra a foto da cabine de pintura:

Figura 5 – Cabine de pintura

Fonte: Jundiaí Pintura Eletrostática (2016)

3.3 POLIMERIZAÇÃO DA TINTA

Logo em seguida os objetos são continuamente transportados para a estufa de polimerização. Esta é uma câmara onde o GLP é queimado para gerar o calor que será fornecido às peças para que se derreta a tinta aplicada na câmara anterior.

Para se determinar a temperatura na estufa de polimerização foram levadas em consideração os pontos de fusão das duas tintas usadas no processo. A tinta epóxi necessita uma temperatura de 180 ºC enquanto a de poliéster 210 ºC. Além disso foi considerada uma "folga" de cerca de 10% para se assegurar uma boa qualidade na peça final. Assim, foi adotada uma temperatura de 230 ºC na estufa e uma permanência média de 10 minutos.

Foram instalados 3 queimadores tipo monobloco com uma capacidade de 300.000 kcal/h por queimador. Estes estão localizados no topo da estufa

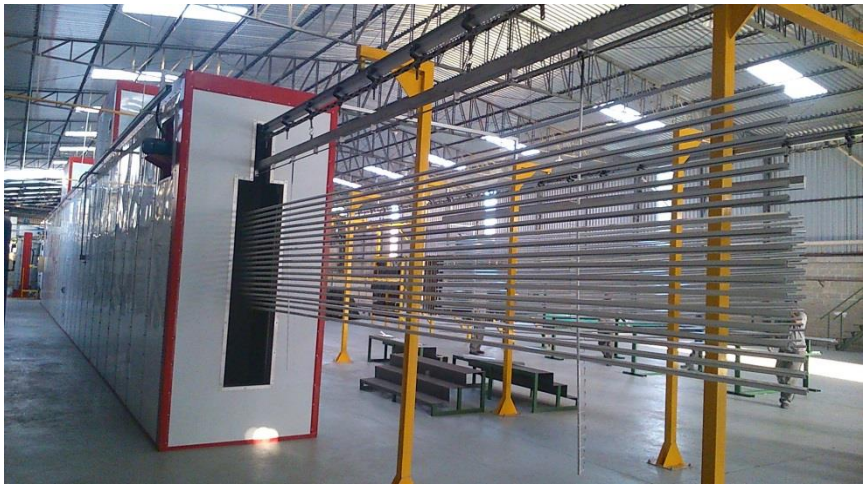
Foram inseridos 3 ventiladores de recirculação para que se aumentasse a troca de calor por convecção durante o processo. Esses são do tipo plug-fan, que consegue fornecer maior volume de ar com a menor potência instalada. A velocidade média do ar é de 0,65 m/s.

Dois motores ligados a compressores são acoplados no forno para que criam uma cortina de ar nas portas de entrada e saída, impedindo que o ar quente saia da câmara. As paredes do forno são isoladas com lã de rocha, cumprindo bem o papel de

isolante térmico.

A figura 6 mostra peças se movendo junto ao transportador aéreo entrando na estufa de polimerização:

Figura 6 – Estufa de polimerização em funcionamento



Fonte: Jundiaí Pintura Eletrostática (2016).

Após o derretimento da tinta os materiais são reservados num local para que ocorra a solidificação.

A estufa de polimerização possui três câmaras de combustão em cima dela para fornecer a energia requerida no processo. A localização destes poderia ser embaixo da estufa para se aproveitar o fluxo ascendente natural do calor, porém, como dentro da estufa é estabelecido um regime de convecção forçada, a localização dos queimadores não se tornaria relevante. Este regime foi adotado, pois não apenas fornece uma maior taxa de transferência de calor, mas também um maior controle sobre o processo, possibilitando uma uniformidade da velocidade e da temperatura das peças. Esse fluxo ascendente do escoamento é obtido com os insufladores distribuídos internamente por toda a extensão da estufa.

Para monitorar o processo foram instalados controladores/indicadores eletrônicos de temperatura e um painel elétrico de alimentação e controle dos ventiladores de recirculação, cortinas de ar e sistema de aquecimento.

Paralelamente a este processo, há também um local destinado a pintar peças de menor tamanho que exijam um acabamento especial. Porém como essa demanda é muito menor, esta etapa será desconsiderada neste estudo.

4 MEDIDAS PROPOSTAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO

O estudo de eficiência energética geralmente abrangem os gastos com fornos, iluminação, climatização, compressores, motores, entre outros. Porém, como nesta empresa os gastos com ar comprimido e com o gás natural são significantemente maiores que todo o resto somado, vamos dirigir toda a atenção para estes dois itens.

4.1 MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

4.1.1 Resfriamento do ar de admissão do compressor

Segundo o manual da PROCEL/Eletrobés (2005), quanto maior for a temperatura do ar aspirado, menos eficiente vai ser o processo de compressão. Isso ocorre, pois o compressor trabalha à uma potência e admissão volumétrica de ar constantes e como o ar frio é mais denso, isso significa que quanto mais baixa a temperatura do ar aspirado maior será a massa de ar admitida. Assim, o compressor gera uma maior massa de ar comprimido exigindo a mesma potência do motor de acionamento.

A principal maneira de não deixar que o ar aspirado esteja numa temperatura excessivamente alta é colocar a tomada de ar do compressor fora do local onde o sistema de geração esta inserido, pois a sala do compressor geralmente apresenta uma temperatura maior que a temperatura ambiente, devido ao ar utilizado no resfriamento do compressor ser descartado na própria sala do compressor. Assim, é indicado que a tomada de ar seja preferencialmente em local aberto e sem fontes de poluição próximas, o que pode diminuir a vida útil dos filtros.

Caso não seja possível alterar o layout da fabrica de modo que o sistema de geração fique no ambiente externo, recomenda-se a construção de um duto que conecte o local de tomada de ar do compressor ao meio externo. Esse duto precisa ter a menor quantidade de curvas possível para se evitar a perda de carga do escoamento. Segundo a Procel “Para cada 25 mbar de queda de pressão na aspiração, o rendimento global do compressor é reduzido em 2%”. Além disso, o duto deve ser isolado termicamente, pois

como o objetivo de sua construção é entregar um ar mais frio ao compressor, quanto menos o ar se aquecer durante o percurso percorrido dentro do duto melhor.

A PROCEL/Eletrobés (2005) disponibilizou uma tabela (Tabela 1) que correlaciona a temperatura do ar aspirado com o percentual de energia que será economizado ou desperdiçado caso haja uma mudança nesta temperatura.

Tabela 1: Variação do consumo com a temperatura de aspiração

TEMPERATURA DO AR DE ASPIRAÇÃO	POTÊNCIA ECONOMIZADA OU INCREMENTADA
(°C)	Temperatura de referência 21°C
-1,0	7,5 % (economizado)
4,0	5,7 % (economizado)
10,0	3,8 % (economizado)
16,0	1,9 % (economizado)
21,0	0,0
27,0	1,9 % (incrementado)
32,0	3,8 % (incrementado)
38,0	5,7 % (incrementado)
43,0	7,6 % (incrementado)
49,0	9,5 % (incrementado)

Fonte: PROCEL/Eletrobés (2005)

4.1.1.1 Projeto do esfriamento do ar de admissão do compressor

Na empresa analisada a sala do compressor localiza-se num recinto de aproximadamente 15 m³ e com uma abertura no teto de 1 m³. Como o compressor é de grande porte essas dimensões não proporcionam uma temperatura adequada para a tomada de ar.

Devido a dificuldade de transportar o sistema de geração para um local externo e pela ausência de fontes de poluição próximas, optar-se-á pela construção do duto. Então será calculado o acréscimo de temperatura durante o percurso do escoamento e a perda de carga deste para se analisar a viabilidade da construção do duto. Para isso foram coletados alguns dados na fábrica:

- A área da entrada de ar do compressor é de 0,33 m²
- A distancia da tomada de ar do compressor até o ambiente externo é 1,43 m.

- A temperatura na sala do compressor é de 30 ºC
- A temperatura do ambiente externo é de 21,4 ºC (temperatura média anual de Jundiaí segundo o Climate-data-org)

Para calcular o acréscimo de temperatura durante o percurso de ar no duto, primeiro vamos calcular o coeficiente convectivo externo ao tubo. E para calcula-lo devemos calcular o número de Rayleigh pela equação 1:

$$Ra = \frac{g\beta\rho^2 c\theta D^3}{\mu k} \tag{1}$$

Onde:

$\rho = Densidade\ do\ ar\ à\ temperatura\ ambiente = 1{,}16\frac{kg}{m^3}$

$c = Calor\ específico\ do\ ar\ à\ temperatura\ ambiente = 1007\frac{J}{kg.K}$

$\theta = Diferença\ entre\ a\ temperatura\ de\ entrada\ e\ de\ saída\ do\ tubo = 8{,}8\ K$

$D = Diâmetro\ interno\ do\ tubo = 0{,}7\ m$

$k = Condutividade\ térmica\ do\ ar\ 0{,}0263\frac{W}{m.K}$

$g = Gravidade = \frac{10m}{s^2}$

$\beta = Coeficiente\ de\ expansão\ térmica = 0{,}0033\frac{1}{K}$

$\mu = Viscosidade = 22{,}5.10^{-6}\frac{W}{m.K}$

Aplicando a equação, obtém-se que o valor de Ra é: 4,4.109

Para calcular o valor do coeficiente convectivo pode-se usar, segundo Incropera et al. (2015), a correlação de Morgan, equação 2.

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{C(Ra^n)k}}{D} \tag{2}$$

Onde os valores de C e n são tabelados e valem, respectivamente, 0,125 e 0,333 para a situação presente.

Aplicando a fórmula obtém-se que o coeficiente convectivo vale 7,7 W/m²K

Para calcular o calor ganho pelo ar usamos a equação 3:

$$Q = h.A.\Delta T \qquad (3)$$

Onde

$h = Coeficiente\ de\ convecção = 7{,}7\frac{W}{m^2K}$

$A = Área\ do\ duto\ em\ contato\ com\ o\ ambiente\ externo = 3{,}14\ m^2$

$\Delta T = Diferença\ de\ temperatura\ entre\ o\ meio\ externo\ e\ a\ parede\ do\ duto = 8{,}8\ K$

$Q = 212{,}7\ W$

A temperatura da parede do tubo foi admitida igual a temperatura do ar externo para assumir o pior caso em que há a máxima transferência de calor para dentro do duto.

Sabemos que o compressor é alimentado com uma vazão de 0,1 m³/s, então podemos calcular o acréscimo de temperatura com a equação 4:

$$Q = \frac{v}{\rho}.c.\Delta T \qquad (4)$$

Onde:

$v = Vazão\ volumétrica\ de\ ar\ dentro\ do\ tubo = 0{,}1\frac{m^3}{s}$

$\rho = Densidade\ do\ ar\ à\ temperatura\ ambiente = 1{,}16\frac{kg}{m^3}$

$c = Calor\ específico\ do\ ar\ à\ temperatura\ ambiente = 1007\frac{J}{kg.K}$

$\Delta T = Diferença\ entre\ a\ temperatura\ de\ entrada\ e\ de\ saída\ do\ tubo$

Aplicando esta equação obtém-se que o acréscimo de temperatura será de 2,4 ºC

Como este acréscimo não pode ser desprezado, deve-se isolar o duto com lã de rocha. Como a resistência térmica oferecida por esse isolamento é muito alta, podemos considerar que o acréscimo de temperatura do ar durante o percurso é desprezível.

A vazão da tomada de ar é de 0,1 m³/s e a área do tubo vale 0,32 m² o que proporciona uma velocidade de escoamento de 0,3125 m/s. Como a velocidade é muito baixa, além do fato do tubo ter apenas 1,4 m de extensão, pode-se desconsiderar a perda de carga do escoamento.

Como não foi possível medir a temperatura da sala do compressor durante sua operação, devido à falta de clientes na época, a temperatura foi estimada em torno de 30 ºC pelos operários da fábrica. Como a temperatura média de Jundiaí é de 21,4 ºC podemos estimar, com o auxílio da tabela 1, que a potência salva será de 3,1 % da total, contribuindo para uma economia de, também, 3,1% do gasto total com o sistema de ar comprimido da empresa.

4.1.2 Perdas devido a vazamentos

Segundo o material da PROCEL/Eletrobés (2005), os vazamentos representam de 10 a 40% da demanda máxima de um sistema de ar comprimido. Esta variação se da pelo modo como é feita a manutenção do sistema. O desgaste é inevitável, mas uma correta manutenção pode prolongar a vida útil dos encanamentos, instrumentos e soldas do sistema. Também é normal encontrar vazamentos nos acoplamentos de dutos com outros tubos ou com instrumentos, para isso deve-se cuidar dos engates e da vedação dos flanges e roscas.

As desvantagens ao sistema que os vazamentos causam são:

- Variação da pressão oferecida ao sistema, o que pode acarretar no mau funcionamento de certos equipamentos.
- Aumento do trabalho exigido pelo compressor, já que os vazamentos consomem ar, implicando num maior gasto com energia elétrica.
- Diminuição da vida útil do sistema de geração de ar comprimido por causa da maior exigência deste para suprir o ar descartado

Um teste pode ser feito dentro da empresa para quantificar a quantidade de ar que está vazando durante o funcionamento do sistema de ar comprimido, porém este teste deve satisfazer certos pré-requisitos.

- O sistema de ar comprimido deve estar ligado, porém o sistema de uso final não deve estar operando.
- Os manômetros instalados na rede devem estar funcionando perfeitamente.
- São necessários dois cronômetros para a realização do teste.
- Devem ser usados os mesmos valores de pressão e vazão que são utilizados em operações normais.

Procedimento:

- Ligar o sistema de ar comprimido
- Ligar o primeiro cronômetro assim que a pressão atinja o valor de desarme do compressor.
- Quando o compressor for religado para suprir a pressão no reservatório, acionar o segundo cronômetro.
- Desligar o segundo cronômetro assim que o compressor parar de funcionar
- Repetir o procedimento 5 vezes para se uma melhor precisão do procedimento
- Desligar o primeiro cronômetro quando o teste acabar

O tempo registrado no primeiro cronômetro será chamado de T1, enquanto o do segundo, T2.

Neste procedimento o compressor é religado para suprir o ar que vaza por todo o sistema de ar comprimido. Assim, todo o volume que o compressor gera a partir do momento em que é desligado pela primeira vez até o momento que acaba o teste representa o volume de ar que é desperdiçado nos vazamentos, podendo ser calculado da equação 5:

$$Qvaz.T1 = Qcomp.T2 \quad (5)$$

Sendo

$Qvaz = Vazão\ de\ ar\ que\ escapa\ do\ sistema\ de\ ar\ comprimido$

$Qcomp = Vazão\ nominal\ do\ compressor$

O teste foi realizado e obtiveram-se os valores de 16 min e 39 s para T1 e 2 min e 48 s para T2. O valor de Qcomp é de 4,5 m³/min.

Assim, aplicando a equação 5 obtemos que o valor da vazão de ar que escapa do sistema de ar comprimido é de 0,757 m³/min, o que representa 16,82% da vazão total.

4.2 MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ESTUFA DE POLIMERIZAÇÃO

4.2.1 Cortina para evitar perdas por radiação na porta da estufa

A estufa é provida de materiais isolantes nas paredes e cortinas de ar nas portas para que se evite perda de calor por condução, porém não possui nenhum artifício para se evitar a perda de calor por radiação pelas portas de entrada e saída da câmara.

Uma forma de evitar esta perda de calor é colocar cortinas em ambas as portas da estufa para que o calor irradiado pela estufa volte para dentro dela ao invés de ser desperdiçada no ambiente. Para se determinar o material da cortina, algumas características devem ser consideradas para que ela cumpra um bom papel de isolante:

- Não pode possuir transmissividade, pois se tiver, uma fração da radiação incidida na cortina continuará sendo desperdiçada.
- Deve possuir baixa absortividade, pois é desejado que a radiação volte para dentro da estufa, e não fique contida em forma de calor na cortina.
- Alta emissividade no lado de dentro e baixa emissividade no lado de fora, pois como a cortina possuirá uma temperatura alta ela emitirá radiação. Assim, é esperado que ela emita o máximo de radiação possível para dentro e o mínimo possível para fora

- Alta refletividade, pois quanto maior a radiação refletida, maior será a radiação que permanecerá dentro da câmara

4.2.1.1 Cálculo da radiação que atravessa a porta

Para se calcular o fluxo de calor que deixa a estufa de polimerização através das portas é necessário que se considere a estufa como um corpo negro. O requisito para considerá-la com tal é ser uma cavidade isotérmica com um orifício pequeno.

Como a estufa possui indicadores de temperatura para manter o processo a 230 ºC podemos considerá-la como uma cavidade isotérmica. Para se calcular a proporção em área do orifício é necessário calcular o ângulo sólido das portas em relação ao centro da estufa. O ângulo sólido pode ser calculado seguindo a equação 6:

$$\omega = \frac{A}{r^2} \tag{6}$$

Sendo:

$\omega = \text{Ângulo sólido}$

$A = \text{Área da porta} = 1{,}415\ m^2$

$r = \text{Distncia da porta em relação ao centro} = 17{,}5\ m$

Inserindo os dados na equação 6 obtemos que o valor do ângulo sólido é 0,0046, o que equivale a 0,074% de um hemisfério.

Assim, podemos considerar a estufa como um corpo negro.

Segundo a lei de Stefan-Boltzmann, o poder emissivo total pode ser representado pela equação 7:

$$Ecn = \sigma T^4 \tag{7}$$

Sendo:

$E = \text{Pode emissivo total}$

$$\sigma = Constante\ de\ Stefan - Boltzmann = 5{,}67.10^{8}\frac{W}{m^{2}K^{4}}$$

$$T = Temperatura\ do\ corpo\ negro = 503\ K$$

Usando a equação 7 obtemos que o valor do poder emissivo total vale 3629,6 W/m²

Apesar de a estufa ter duas portas, a cortina poderá ser colocada apenas na porta de saída pelo fato de ela poder retirar a camada de pó do objeto a ser pintado ao encostar nele. Supondo que toda a energia radiada volte para dentro da câmara podemos obter a energia salva multiplicando o poder emissivo total pela área da porta. Desse modo, obtemos que a energia salva será 5135,8 W.

Porém a emissividade hemisférica total da cortina não vale 1. E como não foi encontrado um gráfico da emissividade espectral do material da cortina será adotado uma emissividade hemisférica espectral de 0,5, que é um valor baixo para se estimar a radiação emitida pela cortina. Assim, a radiação que voltará para dentro da estufa e consequentemente a energia salva com essa medida será 2567,9 W. Esse valor baixo da emissividade hemisférica total será adotado para que se tenha certeza que pelo menos esse valor de 2567,9 W será economizado.

4.2.2 Câmara do transportador aéreo

Durante o processo de aquecimento dos objetos na estufa de polimerização o conjunto do trolley e a corrente em que esta acoplado também aquecem. Após saírem desta câmara, permanecem no ambiente por cerca de 30 min até que entrem na estufa novamente. Esse percurso faz com que esse conjunto tenha sua temperatura diminuída até a temperatura de 50 ºC quando entra na estufa novamente, fazendo com que energia seja gasta para elevar de volta o conjunto até a temperatura de 230 ºC.

Como o trolley deve ser eletrizado para que a tinta fique aderida na peça, ele é feito de aço, que possuí uma alta condutividade térmica. Assim, uma alternativa para resolver este problema é construir uma câmara com isolamento térmico ao redor do conjunto. Desse modo a temperatura do trolley ao chegar na estufa de polimerização será maior, exigindo menos energia para elevar a temperatura do conjunto até 230 ºC.

Uma câmara de 70 m será projetada. Desse modo o conjunto, após sair desta câmara, ficará exposto ao ar por uma distância de cerca de 10 m para que os operários

possam acoplar os objetos que serão pintados aos trolleys, mais 8 m que corresponde ao comprimento da câmara de pintura, totalizando 18 m. O diâmetro interno da câmara será de 20 cm para comportar a corrente e o trolley.

Primeiramente o comprimento do transportador aéreo será dividido pelo número de trolleys e será calculado quantas dessas unidades são necessárias para aquecer todo o volume de ar da câmara, supondo que esta seja adiabática.

$$Peso\ de\ uma\ unidade = \frac{592\ kg}{138\ unidades} = 4{,}29\frac{kg}{unidade}$$

A energia necessária para aumentar a temperatura do ar dentro da câmara da temperatura ambiente (25 ºC) para 230 ºC pode ser calculada pela equação 8:

$$Q = mc\Delta T = \rho V c\Delta T \qquad (8)$$

Onde:

$Q = Energia\ necessária$

$V = Volume\ interno\ da\ câmara = 2\pi RL = 44\ m^3$

$\rho = Densidade\ do\ ar = 1{,}17\frac{kg}{m^3}$

$c = Calor\ específico\ do\ ar = 1007\frac{J}{kg.K}$

$\Delta T = Variação\ de\ temperatura\ = 230 - 25 = 205\ K$

Assim, obtém-se:

$Q =$ 1,06 MJ

A energia fornecida por uma unidade quando esta esfria de uma temperatura de 230 ºC para a temperatura ambiente também pode ser calculada pela equação 8

Onde:

$Q = Energia\ fornecida$

$m = Massa\ de\ cada\ unidade = 4{,}29\ kg$

$c = Calor\ específico\ do\ aço = 434\ \frac{J}{kg.K}$

$\Delta T = Variação\ de\ temperatura\ = 230 - 25 = 205\ K$

$$Q = 0{,}38\ MJ$$

Pode-se notar que apenas 3 unidades já são suficientes para aquecer todo o ar da câmara. Porém, a câmara não é adiabática, o que fará com que haja um fluxo de calor saindo da câmara, fazendo com que a temperatura do ar dentro dela diminua. Para se evitar isso, será dimensionada uma camada de isolante térmico que minimize esta variação de temperatura.

Para se calcular o calor perdido no interior da câmara será assumido que no início dela a temperatura do ar será de 230 ºC. Além disso, o cálculo levará em conta que a temperatura do ar no final da câmara seja próxima a 230 ºC. Assim, como não haverá mudança de temperatura do ar podemos afirmar que a temperatura dos trolley e a corrente também não será alterada, uma vez que sem gradiente de temperatura não há transferência de calor. Também será assumido que a temperatura exterior da câmara, que estará em contato com o ar externo, será de 40 ºC para evitar possíveis acidentes envolvendo os operários. Por último a temperatura do ar em volta da câmara será adotada 25 ºC.

Para calcular a energia perdida pelo ar dentro da câmara dentro do percurso primeiro será encontrado o coeficiente convectivo na parte exterior da câmara pela correlação de Morgan, como indica Incropera et al. (2015). Mas antes será calculado o número de Rayleigh pela equação 9, usando a temperatura de filme (305,5 K) para coletar as propriedades do ar, que será considerado como um gás ideal:

$$Ra = \frac{g\beta\rho^2 c\theta D^3}{\mu k} \tag{9}$$

Onde:

$$g = Gravidade = 9{,}8\frac{m}{s^2}$$

$$\beta = Coeficiente\ de\ expansão\ volumétrica\ térmica = 0{,}0033\ K^{-1}$$

$$c = Calor\ específico\ do\ ar = 1007\ \frac{J}{kg.K}$$

$$\theta = Variação\ de\ temperatura\ = 15\ K$$

$$\mu = Viscosidade\ dinâmica\ do\ ar\ = 1{,}84.10^{-5}\ N.\frac{s}{m^2}$$

$$k = Condutividade\ térmica = \frac{26{,}5.10^{-3}\mathbf{W}}{\mathbf{m.K}}$$

$$Ra = Número\ de\ Rayleigh = 1{,}08.10^7$$

Agora, usando a correlação de Morgan, podemos obter o coeficiente convectivo pela equação 10:

$$NuD = CRa^n = \frac{hD}{k} \qquad (10)$$

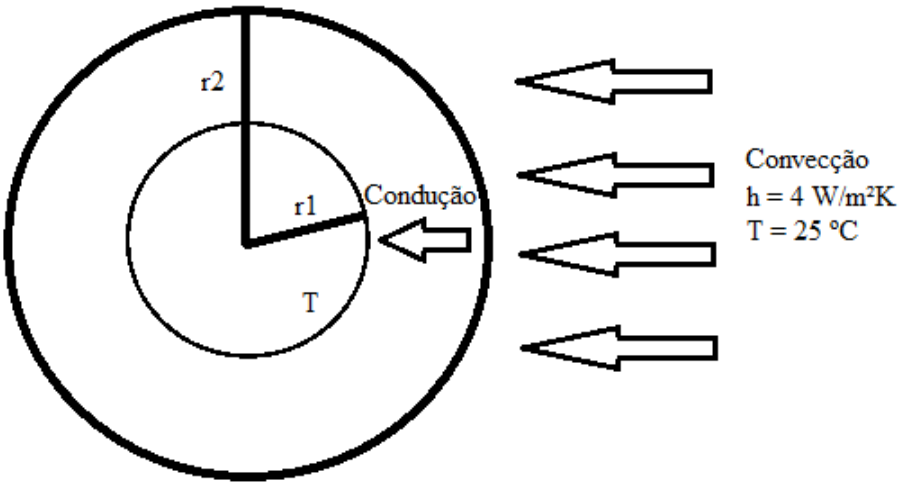
Sendo os valores de C e n tabelados conforme o valor do número Rayleigh. Inserindo os valores de 0,125 e 0,333 para esses valores, respectivamente, obtemos que o valor do coeficiente convectivo vale 4 W/m²K.

O material do isolante será lã de rocha, com as mesmas especificações que são usadas para o isolamento da estufa de polimerização: 10 cm de espessura e condutividade térmica de 0,063 W/mK.

A resistência de convecção interna não será levada em consideração pois não foi possível calcular o coeficiente convectivo natural no interior da câmara. Para calcularmos o ganho de calor na tubulação serão adotados alguns valores de temperatura para a parede interna e o coeficiente global levará em conta apenas as resistência de condução do isolante e de convecção natural externa.

A figura 7 ilustra como será a câmara e os mecanismos de transferência de calor existentes.

Figura 7 – Câmara de isolamento e mecanismos de transferência de calor



Fonte: autoria própria (2016)

Para calcular o coeficiente global de transferência usaremos a fórmula para o caso de troca de calor considerando as resistências térmicas da parede do isolamento e da convecção externa

$$U = \frac{1}{\frac{\ln r2}{r1} \cdot \frac{r1}{k} + \frac{r1}{r2.h}} \tag{12}$$

Sendo:

$r1 = 0{,}1\ m$

$r2 = 0{,}2\ m$

$k = 0{,}063 \frac{W}{mK}$

$h = 4 \frac{W}{m^2K}$

Assim, obtemos que o valor do coeficiente global de transferência vale:

$$U = \frac{1}{1{,}09 + 0{,}125} = 0{,}82 \frac{W}{m^2K}$$

O calor ganho pela câmara, conforme a temperatura da parede interna adotada pode ser calculado pela equação 3, e o decréscimo de temperatura do ar durante o trajeto pela câmara, pela equação 8. Os valores obtidos estão listados na tabela 2:

Tabela 2: Valores da parede interna, calor perdido pela câmara e o decréscimo de temperatura do ar no final da câmara

Temperatura da parede interna (ºC)	Calor dissipado pela câmara (W)	Decréscimo de temperatura do ar (ºC)
229	7360,32	4,71
228	7324,24	4,68
227	7288,16	4,66
226	7252,08	4,64
225	7216	4,62
224	7179,92	4,59
223	7143,84	4,57
222	7107,76	4,55
221	7071,68	4,52
220	7035,6	4,5

Como se pode notar, a temperatura da parede interna não influencia de forma considerável no calor recebido pelo ar interno e nem na sua temperatura. Então, o problema de não se saber a temperatura desta não influenciará no resultado final.

A temperatura da parede interna no começo da câmara foi adotada 230 ºC, pois ela recebe parte dos gases que escapam da estufa de polimerização e recebe a energia dos trolleys e da corrente. Mas mesmo que o calor recebido pela câmara em toda sua extensão não seja alto, não se pode afirmar que a temperatura da parede interna permaneça em 230 ºC.

Como se quer calcular a temperatura do ar no final do trajeto da câmara, a temperatura da parede interna será adotada 229 ºC, pois está é a temperatura que faz a câmara dissipar maior calor possível em seu trajeto, uma vez que o calor perdido varia proporcionalmente ao gradiente de temperatura. Desse modo, pode-se afirmar que o maior valor possível de calor trocado será de 7360,32 W. Consequentemente a maior variação de temperatura possível do ar é 4,7 ºC. Portanto, concluímos que a temperatura dos trolley e da corrente no final da câmara será de em torno de 225 ºC.

Caso deseje-se colocar uma camada de lã de rocha com metade da espessura para baratear o custo, repetindo-se todo este processo obtém-se que a temperatura dos

trolleys e da corrente no final da câmara será 223 ºC. E se não houver nenhum isolamento, a temperatura do conjunto no final da câmara será 207 ºC.

Agora, deve-se calcular o decréscimo de temperatura durante o percurso em que os trolleys e a corrente ficarão expostos ao ar. Para isso, precisa-se calcular o coeficiente global de transferência de calor sem a câmara de isolamento. Coeficiente este que contém a perda de calor por convecção e radiação do conjunto dos trolleys e a corrente.

Como a perda de calor dos trolleys e da corrente se dão num processo de transferência de calor em regime transiente, precisa-se saber se o método da capacitância global pode ser usado para os cálculos e para isso deve-se verificar se o número de Biot, por meio da equação 13, é menor que 0,1, como sugere Incropera et al. (2015).

$$Bi = \frac{hLc}{k} < 0{,}1 \tag{13}$$

Sendo

$$h = Coeficiente\ de\ convecção$$

$$k = Condutividade\ térmica = \frac{60{,}5\ \mathbf{W}}{\mathbf{m.K}}$$

$$Lc = Comprimento\ característico = \frac{V}{A}$$

A área de uma unidade, lembrando que uma unidade consiste na linha inteira dividida pelo número de trolleys, é 0,16 m². O volume pode ser calculado como uma razão do peso pela densidade, na equação 14.

$$V = \frac{P}{\rho} = \frac{592}{7854.138} = 0{,}00055\ m^3 \tag{14}$$

Assim, obtemos que o comprimento característico vale 0,0034 m.

Para que o número de Biot seja menor que 0,1 o coeficiente convectivo tem que ser menor que 1780 W/m²K. Como o meio em que está o conjunto é quiescente, podemos considerar o método da capacitância global para estimar o coeficiente global

de transferência do conjunto. Para isso a equação 15 será usada, como indica Incropera et al. (2015):

$$\frac{T - T\infty}{Ti - T\infty} = \exp\left[-\frac{UAt}{\rho V}\right] \tag{15}$$

Sendo

$T = Temperatura\ final = 40\ ºC$

$T\infty = Temperatura\ do\ ar = 25\ ºC$

$Ti = Temperatura\ inicial = 230\ ºC$

$U = Coeficiente\ global\ de\ transferência$

$\rho = Densidade\ do\ ar\ = 7854 \frac{kg}{m^3}$

$A = Área\ de\ uma\ unidade = 0{,}16 m^2$

$V = Volume\ de\ uma\ unidade = 0{,}00055\ m^3$

$t = Tempo\ de\ exposição = \frac{75m}{0{,}045 \frac{m}{s}} = 1666{,}7s$

Aplicando a fórmula obtemos que o coeficiente global de transferência vale 0,047 W/m²K.

O tempo em que o conjunto do trolley e da corrente fica exposto ao ar quando sai da câmara até que entre novamente na estufa de polimerização pode ser calculada como a razão entre a distância e a velocidade, na equação 16:

$$t = \frac{18m}{\frac{0{,}045m}{s}} = 400\ s \tag{16}$$

Utilizando novamente a equação 14, com os novos valores, temos:

$$\frac{T - 25}{225 - 25} = \exp\left[-\frac{0{,}047.0{,}16.400}{7854.0{,}0005}\right]$$

$T = 124{,}7\ ºC$

A energia economizada por unidade é a equivalente a aquecer o conjunto dos trolleys e a corrente de 40 ºC para 124 ºC, pode-se utilizar a equação 8 para calcular essa energia.

0,465 117 109,6

$$q = 4{,}29 * 434 * 84 = 156{,}4\ kJ$$

Como o percurso do transportador aéreo é de 200 metros e a velocidade do transportador é de 0,045 m/s o tempo para uma unidade dar uma volta é de 74 minutos. Portanto, como são 138 unidades, a quantidade destas que entram no forno por segundo são de 0,031 unidades/s. Finalmente, como a energia economizada por unidade é de 156,4 kJ conclui-se que a energia salva vale 4,86 kW

Utilizando os mesmos cálculos, pode-se calcular a energia economizada com um isolamento de metade de espessura e sem isolamento algum. Estes valores são, respectivamente 4,45 kW e 4,02 kW

4.2.3 Trocador de calor

Uma forma eficiente de se economizar energia quando se trata de estufas é reaproveitar os gases de exaustão do queimador, que no caso é descartado, para pré-aquecer os gases que serão queimados nele. No presente processo o ar atmosférico que será utilizado na combustão se encontra em torno de 25 ºC, já o produto da equação química de combustão se encontra a 230 ºC. Assim, se for possível utilizar os gases de exaustão para aumentar a temperatura do ar atmosférico envolvido na combustão, a elevação da temperatura necessária será menor, utilizando menos combustível para se atingir a temperatura final.

Mas primeiro, deve-se calcular a vazão de entrada total que será queimada.

Para se calcular a vazão de entrada nos queimadores temos que efetuar o balanceamento da reação de queima do GLP.

- As seguintes considerações foram feitas para o balanceamento:
- O consumo de GLP na empresa é de 3000 kg por mês
- A estufa fica ligada 45 h por mês

- A composição do GLP é de 60% de butano e 40% de propano
- Apesar do nitrogênio não participar da reação ele será levado em consideração na equação por fazer parte do ar atmosférico que é utilizado na combustão
- O ar atmosférico é composto por uma proporção de 1 mol de oxigênio para 3,76 mols de nitrogênio
- A massa molar do propano e do butano são, respectivamente 44 g/mol e 58 g/mol

Pelos dados obtidos obtém-se que a vazão molar de butano e propano são, respectivamente: 0,65 e 0,33 mols por segundo. Assim, pode-se escrever:

$$0{,}65C_4H_{10} + 0{,}33C_3H_8 + aO_2 + 3{,}76*aN_2 > bCO_2 + cH_2O + 3{,}76*aN_2$$

Balanceando a equação de combustão temos:

$$0{,}65C_4H_{10} + 0{,}33C_3H_8 + 5{,}88O_2 + 22{,}09N_2 > 3{,}59CO_2 + 4{,}57H_2O + 22{,}09N_2$$

Pela equação resulta-se que a quantidade de mols de gás no reagente é de 27,97, enquanto no produto é de 30,25.

Com os valores das vazões molares dos gases que entraram e saem do trocador de calor é possível calcular os produtos das vazões mássicas com os calores específicos de cada um dos gases envolvidos. Esses dados são usados para calcular a efetividade do trocador de calor:

Os valores

$$Cmín = Menor\ produto\ da\ vazão\ mássica\ com\ o\ calor\ específico\ entre\ os\ gases =$$

$$Cmín = (5{,}88 * 32 * 972 + 22{,}1 * 28 * 1056).10^{-3} = 836{,}34\ \frac{W}{K}$$

$$Cmáx = Maior\ produto\ da\ vazão\ mássica\ com\ o\ calor\ específico\ entre\ os\ gases$$

$$Cmáx = (3{,}59 * 44 * 851 * +4{,}57 * 18 * 2060 + 22{,}1 * 28 * 1041).10^{-3} = 948\ \frac{W}{K}$$

Também precisa-se do valor da relação desses valores para o cálculo da efetividade

$$Cr = \frac{368{,}7}{662} = 0{,}88$$

Segundo Incropera, os trocadores de calor do tipo compacto são mais indicados para trocas envolvendo fluídos no estado gasoso. Isso se deve pois como a troca entre gases apresenta um coeficiente global de troca de calor baixo, as superfícies do trocador, que variam em torno de 700 m²/m³, compensam este fato.

Segundo Çengel (2012), o valor do coeficiente global de transferência de calor em trocadores de calor envolvendo gases varia entre 10 e 40 W/(m²K).

Adotando um valor médio de 25 W/(m²/K) para o valor do coeficiente global de troca e 700 m²como a área do trocador obtém-se, pela equação 17:

$$Ntu = \frac{UA}{Cmin} = \frac{25 * 700}{836{,}34} = 20{,}92 \qquad (17)$$

Utilizando a equação 18 para o cálculo de efetividade de trocadores térmicos do tipo escoamento cruzado (passe único) com dois fluídos não misturados, segundo Incropera et al. (2015):

$$\epsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{Cr}\right)(NTU)^{0,22}\{\exp[-Cr(NTU)^{0,78}] - 1\}\right] \qquad (18)$$

$$\epsilon = 0{,}891$$

Com os valores de ϵ , Cmín e ΔT pode-se calcular, de acordo com Incropera et al. (2015), o valor do calor trocado através da equação 19:

$$q = \epsilon Cmin \Delta T \qquad (19)$$

Assim, obtém-se que o valor de calor trocado é 152,76 kW, o que contribuí para que o ar pré-aqueça 161,14 ºC.

Porém, este valor é obtido apenas se a vazão de combustível ainda for 3000 kg/mês. O que não faz com que a energia seja economizada, apenas mais energia será produzida com o mesmo custo.

Caso se diminua esta vazão para 85% do valor atual, os valores de Cmín, Cmáx, NTU, ϵ , e o calor trocado são:

$$Cmín = 710{,}89\,\frac{W}{K}$$

$$Cmáx = 805{,}8\,\frac{W}{K}$$

$$NTU = 24{,}61$$

$$\epsilon = 0{,}9$$

$$q = 131159W$$

Sem o trocador de calor, a energia fornecida, apenas pela queima do GLP era:

$$q = 0{,}0185\left[\frac{kg}{s}\right]48{,}13[MJ]$$

$$q = 0{,}8913\ MW$$

Com o trocador de calor, o calor oferecido passa a ser:

$$q = 0{,}0157\left[\frac{kg}{s}\right]48{,}13[MJ] + 0{,}1312$$

$$q = 0{,}888\ MW$$

Como os dois valores do calor produzido é a mesma, conclui-se que a segunda opção é a que tem menos custo para empresa, já que economiza 15% do GLP utilizado.

5 CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS PROPOSTAS

Para o cálculo do custo será levando em consideração apenas os custos das matérias primas e equipamentos necessárias para a implementação das medidas. A mão de obra será desconsiderada aqui, uma vez que os próprios operários da empresa podem realizar estas tarefas.

5.1 DIMINUIÇÃO DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO COMPRESSOR

Esta medida demanda uma chapa para a construção do duto onde passará o ar do ambiente externo que será usado no compressor. Além disso, também foi considerado uma camada de lã de rocha para o isolamento térmico.

As dimensões do tubo são 1,4 m de extensão e perímetro de 2,2 m. Segundo MONTES, A. da Atlanta Ferro e Solda (2017) uma chapa 2 m² com meia polegada de espessura pode ser obtida por R$5,50 reais.

Uma camada de lã de rocha com 10 cm é suficiente para esta medida. Conforme VIEIRA, J. N. da empresa Isopur (2017), uma camada com esta espessura e com dimensões de 1,4 m de comprimento por 2,5 m de largura pode ser obtida por cerca de R$220,00.

Assim, o custo total desta medida é de R$225,50

5.2 REPARAÇÃO DOS VAZAMENTOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

O custo dessa medida pode variar conforme o estado das tubulações do sistema de distribuição de ar comprimido, pois caso haja tubulações com muita corrosão ou válvulas e outros aparelhos danificados, estas peças tem de ser trocadas. Como na empresa analisada a tubulação e estes equipamentos estão em um bom estado, os vazamentos devem ser causados pela má instalação de válvulas e pequenos furos no sistema de distribuição de ar comprimido. Assim, uma inspeção deve ser feita, os equipamentos devem ser remontados e furos vedados, tarefas que não exigem um investimento muito alto.

A localização dos vazamentos pode ser feita, segundo PROCEL/Eletrobás (2005), borrifando sabão na tubulação e esperar a formação de bolhas.

O custo desta medida é, portanto, desprezível comparado ao dinheiro economizado por mês com esta medida.

5.3 INSTALAÇÃO DA CORTINA PARA A EVITAÇÃO DE PERDA DE CALOR DA ESTUFA POR RADIAÇÃO

Esta media envolve uma cortina de 1,415 m² para impedir a perda de energia do fogão por radiação. Segundo BARBARO B. da empresa Refratil, uma cortina como essa pode ser obtida por cerca de R$110,00. Esse, portanto é o custo de investimento desta medida.

5.4 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE ISOLAMENTO

A câmara de isolamento consistirá num duto de raio de 10 cm e um isolamento de mais 10cm. A extensão da câmara será de 70m. Como os materiais necessário para a implementação desta medida são os mesmo que os do item 5.1, os mesmos fornecedores serão consultados para estimar este custo de implementação.

A área do tubo de aço é de 44 m², portanto o custo deste será de, aproximadamente, R$120,00.

O custo do isolamento será calculado como uma camada de 10 cm de espessura de lã de rocha e com a mesma área do tubo. Portanto o preço estimado será de R$2765,72

Portanto o investimento para esta medida será de R$2885,71

Porém, como também foi calculado a economia de energia com uma camada com metade de espessura de isolante e sem isolante algum, deve-se calcular o investimento para esses dois casos.

Desse modo, utilizando as mesmas empresas consultadas obtemos que os preço dessas duas alternativas são, respectivamente R$1963,81 e R$120,00

5.5 IMPLEMENTAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR COMPACTO

Pelo preço de trocadores de calor em sites como mercado livre pode-se estimar que o preço de um trocador de calor compacto com 700 m² de área de troca custa em torno de R$4000,00. Este, portanto, é o custo do investimento desta medida.

6 VALOR ECONÔMICO ECONOMIZADO COM AS MEDIDAS IMPLEMENTADAS

6.1 DIMINUIÇÃO DA TEMPERATURA DE ENTRADA DO COMPRESSOR

Foi calculado que a energia economizada será de 3,1 % do gasto total com o sistema de ar comprimido da empresa. Como o gasto mensal com essa área é de R$1500,0 essa medida representará uma economia de R$46,50 por mês

6.2 REPARAÇÃO DOS VAZAMENTOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

A vazão do ar comprimido que escapa pelo sistema de distribuição representa 16,82% da vazão total do compressor. Caso consiga reparar todas as fontes de escape o dinheiro economizado por mês vale R$252,30

6.3 INSTALAÇÃO DA CORTINA PARA A EVITAÇÃO DE PERDA DE CALOR DA ESTUFA POR RADIAÇÃO

Supondo que toda energia que antes era desperdiçada no ambiente pela radiação da estufa através das portas volte para dentro dela a energia salva será de 2567,9 W.

Por mês a empresa deixa a estufa ligada cerca de 45 horas por mês. Assim o dinheiro economizado pode ser calculado pela equação 20:

$$Preço[R\$] = \frac{P\left[\frac{J}{s}\right] t[s] C\left[\frac{R\$}{kg}\right]}{Q\left[\frac{J}{kg}\right]} \tag{20}$$

Sendo

$$P = Energia\ economizada = 2567{,}9\frac{J}{s}$$

$$t = Tempo\ que\ a\ estufa\ fica\ ligada\ por\ mês = 162000\ s$$

$$Q = Pode\ calorífico\ do\ GLP = 48130000\frac{J}{kg}$$

$C = preço\ do\ GLP\ por\ quilograma$ =R$3,23/kg

Assim, obtém-se que o custo salvo será de R$27,92 por mês

6.4 CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE ISOLAMENTO

Como a energia economizada calculada, para cada um dos casos, é de 4,86 kW, 4,45 kW e 4,02 kW, pode-se calcular, usando o mesmo raciocínio do item anterior, que o custo economizado será de R$52,83, R$48,37 e R$43,70 por mês

6.5 IMPLEMENTAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR COMPACTO

Como o valor de GLP economizado por mês foi de 15%, o custo mensal dessa medida será R$1453,50.

7 TABELA DE VALORES GASTOS E ECONOMIZADOS

Num estudo de eficiência energética, a quantidade de energia economizada não é o único fator que deve ser levado em consideração para que a medida seja aplicada. O tempo de retorno é o outro fator que deve-se contar pois se o retorno financeiro for muito longo o investimento não vale a pena.

No quadro 1 estão expostos, para cada medida proposta neste trabalho, o investimento necessário, o valore economizado e a quantidade de meses para que o retorno do investimento seja coberto para que se possa analisar a viabilidade da implementação da medida

Quadro 1: Preços envolvidos das medidas sugeridas e tempo de retorno financeiro do investimento

	Investimento	Valor economizado por mês	Meses para o retorno financeiro
Diminuição da temperatura de entrada do compressor	R$225,50	R$46,50	5
Reparação dos vazamentos do sistema de distribuição de ar comprimido	Desprezível	R$252,30	0
Instalação da cortina para a evitação de perda de calor da estufa por radiação	R$110,00	R$27,92	4
Construção da câmara de isolamento: Sem isolamento	R$120,00	R$43,70	3

Construção da câmara de isolamento: 5 cm de isolamento	R$1963,81	R$48,37	41
Construção da câmara de isolamento: 10 cm de isolamento	R$2885,71	R$52,83	54
Implementação do trocador de calor compacto	R$4000,00	R$1453,50	3

8 CONCLUSÃO

Pelos valores calculados a medida que causou maior redução no custo com energia foi o trocador de calor compacto, que sozinho diminuirá o custo de energia da empresa em cerca de 11,5%.

Todas as medidas tiveram um retorno financeiro viável, menos a medida da construção da câmara de isolamento com a lã de rocha como isolante. Mas como a esta medida sem o isolamento teve uma redução do valor economizado de apenas 17% e uma redução do custo de implantação de 96% esta ainda é uma medida viável de ser implantada.

Caso todas as medidas forem implementadas o custo mensal salvo será de R$1823,00. Isso equivale a 16,3% dos gastos mensais com o sistema de ar comprimido e a estufa de polimerização juntos.

Ao decorrer de um ano a economia será de R$21.876,00

REFÊRENCIA

ATLAS COPCO. **Manual de ar comprimido.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1967.

ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J., **Transferência de calor e massa , uma abordagem prática.** 4.ed. Ed traduzida 2012.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Energia 2050.**– Rio de Janeiro: Empresa de pesquisa energética 2014. (Série: estudos da demanda de energia)

INCROPERA, F. P., BERMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 7. ed. Ed traduzida. Rio de Janeiro: edi,2015

JUNDIAÍ PINTURAS ELETROSTÁTICAS LTDA **Características técnicas da pintura eletrostática a pó e suas vantagens** 2016

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. PROCEL: **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Brasília: MME, 2005

NOVAIS, José. **Ar comprimido Industrial:** produção, tratamento e distribuição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1995.

MONTES, A. **Isopur.** Disponível em: <http://isopur.com.br/>. Acesso em: 5 Fev. 2017

VIEIRA, J. N. **Atlanta Ferro e Solda.** Disponível em: <http://www.atlantaferroeaco.com.br/>, Acesso em 5 de Fevereiro de 2017