UNICESUMAR - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR

MARCOS JOSÉ PELEGRINI

MARINGÁ – PR
2019

Marcos José Pelegrini

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, sob a orientação do Prof. Me. Deyvid Oliveira dos Anjos.

MARINGÁ – PR

2019

CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO / REGULAMENTO DE TCC
ANEXO II - ATA DE AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 16 dia(s) do mês de outubro de 20 19, às 14:53 horas, nas dependências do polo de Guarapuava - PR do Centro Universitário de Maringá, o acadêmico do Curso de Engenharia de Produção Marcos José Pelegrini apresentou os resultados de seu Trabalho de Conclusão de Curso, na forma de artigo científico e apresentação oral, à Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Orientador Acadêmico (Presidente): Deyvid Oliveira dos Anjos

Membro 1: Jader Géa Garcia

Membro 2: Luis Fernando Calcidari Ferrarezi

Título do Artigo: Eficiência energética em Sistemas de Vapor

Após a análise do Artigo, da Apresentação Oral do Acadêmico e da Arguição, a Banca Examinadora atribuiu a seguinte nota: 10

Em função das notas recebidas o acadêmico foi considerado:

(X) Aprovado - Corrigir o artigo e entregar ao orientador em 10 (dez) dias.
( ) Reprovado - Repetir o trabalho.

Nada mais havendo a constar, a sessão foi encerrada às 15:33 horas e esta ATA assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Presidente: Deyvid Oliveira dos Anjos

Membro 1: Jader géa Garcia

Membro 2: LF Ferrarezi

Maringá - PR, 16 de outubro de 20 19.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR

Marcos José Pelegrini

RESUMO

Este estudo objetivou compreender os conceitos da eficiência energética e transferência de calor em sistemas de vapor na indústria e apresentar o método de recuperação de calor de resíduos, que permite o aumento da eficiência energética. O presente trabalho visa demonstrar as formas de tornar os sistemas de vapor mais eficientes em toda a indústria, as formulas dentro dos sistemas de vapor e cálculos nas transferências de calor. Alguns dos passos galgados para chegar lá foram definir os conceitos de eficiência energética, analisar os fatores que impactam a eficiência energética em sistemas de vapor, bem como, compreender as metodologias de transferência de calor em equipamentos. Para tanto, foi utilizado como método para coleta de dados a pesquisa bibliográfica, através de estudos levantados sob a ótica da eficiência energética, na visão de diversos autores. A partir da análise de dados foi possível perceber a importância do sistema de vapor e como esse processo impacta na eficiência energética do sistema, tornando-se indispensável no fornecimento da energia necessária para o aquecimento do processo, controle de pressão, acionamentos mecânicos, separação de componentes e produção de água quente para reações de processo. Enfim, por meio de todo o estudo realizado e dos dados analisados foi possível confirmar que a eficiência energética, que consiste em usar de modo eficiente a energia, faz com que a manufatura atinja melhores resultados e auxilia na manutenção da vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave: Sistema de Vapor. Energia. Eficiência Energética.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de eficiência energética consiste na minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil. Toda forma de energia pode ocasionar perdas, seja térmica, mecânica ou elétrica. De acordo com a EPE (2018), eficiência significa fazer mais com menos, mantendo o conforto e a qualidade. Assim sendo, a integração energética é um método de otimização que diminui os custos de produção/operação, pois busca um melhor aproveitamento dos recursos energéticos presentes no processo, quando se discute energia, eficiência energética significa gerar a mesma quantidade de energia com menos recursos ou obter o mesmo serviço com menos energia. A integração energética de processos foi reconhecida pelas indústrias na década de 80, devido a uma preocupação em melhorar os processos de produção, tornando-os mais competitivos. Nos anos 90, essa aplicação se expandiu, com o conhecimento dos conceitos de integração de processos e integração energética, associada ao conceito de ponto de estrangulamento, o qual fornece informações sobre o processo como um todo, permitindo assim, a análise das potencialidades de integração, a partir da plotagem de curvas compostas (RELVAS et al., 2000). Esse conceito também é chamado de estrangulamento térmico ou pinch e utiliza duas áreas de estudo: modelos matemáticos de programação e conceitos termodinâmicos aliados às regras heurístico-evolutivas. Com esse método é possível obter uma melhor eficiência energética para processos industriais, minimizando desperdício de energia e permitindo ganhos econômicos (GUNDERSEN e NAESS, 1987; NETO, 2005).

Os sistemas de vapor são responsáveis por boa parte da energia total usada em aplicações industriais para a saída do produto. Estes sistemas podem ser indispensáveis no fornecimento da energia necessária para o aquecimento do processo, controle de pressão, acionamentos mecânicos, separação de componentes e produção de água quente para reações de processo.

Como os custos de energia continuam a subir, as plantas industriais precisam de meios efetivos para reduzir a quantidade de energia consumida pelos seus sistemas de vapor. Otimização da energética dos sistemas de vapor significa reduzir o uso de energia e os custos, mantendo ou aumentando a produtividade.

Assim, os sistemas de vapor que são responsáveis por boa parte da energia total usada em aplicações industriais para a saída do produto, são indispensáveis no fornecimento da

energia necessária para o aquecimento do processo, controle de pressão, acionamentos mecânicos, separação de componentes e produção de água quente para reações de processo e podem incluir componentes de geração, distribuição, uso final e recuperação.

Dentro das fábricas existe perdas imensuráveis devido a tubulações mal dimensionadas e perdas de vapor por purgadores em redes de vapor mal dimensionados ou com passagem de vapor e condensado, isso, impacta diretamente no custo final da geração de energia térmica, com a otimização redimensionamento de tubos de transporte de vapor e reengenharia de purgadores instalados em redes de vapor, existe uma estanqueidade na perda direta de vapor "energia" baixando o custo do vapor e aumentando o desempenho do sistema energético como um todo. Combustíveis fósseis como gás, carvão e petróleo são os mais utilizados na geração de energia industrial do mundo, o uso excessivo desses recursos está diretamente relacionado às emissões de dióxido de carbono (CO2).

O consumo de energia nos sectores industrial e comercial representa quase 40% das emissões globais de gases com efeito de estufa, em particular CO2 e a eficiência térmica das centrais de produção de energia é de aproximadamente 30,12% em todo o mundo e em termos da segunda lei da termodinâmica, o componente predominante, atingindo 80% na razão de irreversibilidade do componente na usina (BUJAK, 2008).

Desta forma, é fundamental a avaliação da eficiência desses sistemas, ou seja, a quantidade de calor que está sendo absorvida pelo vapor gerado na quantidade líquida de calor fornecida à caldeira, além de identificar métodos que aumentem essa eficiência. Tal fato justifica o presente trabalho, que pode contribuir para um melhor entendimento sobre os sistemas de vapor e auxiliar com o aumento de sua eficiência e tem como objetivo apresentar os conceitos da eficiência energética e transferência de calor em sistemas de vapor de uma indústria, além de pesquisar acerca de métodos para aumento da eficiência energética.

2 CONCEITOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O conceito de eficiência energética é a minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil. Toda forma de energia pode ocasionar perdas, seja térmica, mecânica ou elétrica. Desde 2016, o País vem registrando, anualmente, um aumento gradual do consumo de energia e a previsão é só aumentar a cada ano. Em 2002 as perdas de energia

atingiram algo em torno de 10% da energia gerada (SOLA; KOVALESKI, 2004).

Figura 1*:* Previsão de Consumo de Energia

Fonte: Panorama Comerc (2018)

Para Hordeski (2005) o termo eficiência é a capacidade de equipamentos que operam em ciclos ou processos produzirem os resultados esperados. Quando aplicado à questão energética de uma indústria, o termo eficiência está associado à análise do consumo de energia da fábrica como um todo, com objetivo da redução de custo e maior economia da mesma, aliada a novas tecnologias, materiais e equipamentos e o uso dos recursos naturais com alternativas ecológicas, sem perda de conforto e qualidade do ambiente que se analisa (REKIOUA, 2018).

A partir desta conceituação, a eficiência está associada à quantidade efetiva de energia utilizada e não à quantidade mínima teoricamente necessária para realizar um serviço, conceito que se aproximaria do potencial de eficiência. A aplicação de eficiência energética pode ocorrer em todos os setores, buscando melhorias no desempenho energético de sistemas de condicionamento ambiental, equipamentos elétricos, iluminação, entre outros (ABREU et al., 2014).

2.1 ENERGIA EM SISTEMAS DE VAPOR

A história do vapor como transformação de energia remonta ao primeiro século, mas o moderno motor a vapor comercialmente bem-sucedido, que se acredita ter começado no final do século 17 e início do século 18. O vapor pode ser usado para gerar eletricidade, limpeza e esterilização e é um bom transportador de energia térmica em forma de gás. Para sua formação a água tratada é aquecida pela combustão de um determinado combustível em uma caldeira até sua temperatura de saturação e forma vapor. Também pode ser aquecido além da pressão de saturação para formar vapor superaquecido (YAZAWA; KOH; SHAKOURI, 2013).

O vapor superaquecido é um vapor com alta energia latente. O calor latente é a energia absorvida ou liberada por uma massa de material quando está se transformando de uma fase para outra. Principalmente e geralmente esta energia térmica latente é transformada em outra forma de energia para a aplicação desejada. Normalmente, os processos são realizados quando o vapor a temperaturas e pressões mais elevadas sofre uma pressão e/ou temperatura mais baixas(SALEHI; SAFARZADEH; KAZEMI, 2019).

Um sistema regular de purgador com programa de verificação regular e manutenção de acompanhamento também é capaz de economizar energia de até 10% e o período de retorno é de até 6 meses (SMITH et al., 2003). Embora o período de retorno seja muito curto, isso não é implementado em todos os sistemas de vapor porque alguns gerentes de usinas de vapor orçam separadamente seus custos de manutenção e energia. Estima-se que o uso de monitoramento automático economize 5% a mais além do que a manutenção do purgador de vapor, com um retorno de 1 ano (GATES; LESKIW, 2010).

Nesse sistema, condensado é o nome dado ao líquido quando o vapor perde sua energia latente de calor. O condensado é formado à medida que o vapor se condensa na

temperatura de mudança de fase da pressão de trabalho correspondente do processo, portanto a temperatura do condensado é a mesma que a temperatura do vapor. O condensado resultante está na temperatura do vapor e ainda contém uma quantidade considerável de energia. Por exemplo, se vapor é usado a 690 kPa, então o condensado contém cerca de 25% do calor usado para produzir vapor e será perdido se o condensado não for retornado ao sistema. Portanto, retornar o condensado para o tanque de água de alimentação da caldeira resultará em uma economia significativa de energia do combustível (KIM; JEONG, 2019).

Desde então, o condensado é a água destilada ideal para uso como água de alimentação da caldeira. Portanto, a recuperação de condensado tem muitos benefícios porque é ambientalmente amigável e rentável, ajudando a reduzir o consumo de água, o custo do tratamento de efluentes e a redução de consumo. Se o condensado não for recuperado, quantidades significativas de energia (o calor sensível), produtos de tratamento químico e água são desperdiçados, levando a maiores custos relacionados a gerenciamento de combustível, água e resíduos (CHEN et al., 2019).

Ainda no sistema de vapor, os purgadores de vapor são usados em sistemas de vapor para remover gases condensados e não condensáveis. Existem muitos tipos de purgadores de vapor. A sua operação é importante porque se eles não funcionem corretamente e permitirem que o vapor vivo passe do lado do vapor para o lado do condensado, resulta em óbvia perda de energia. Além disso, se as armadilhas forem incapazes de remover o ar no momento do arranque ou se não conseguirem remover a condensação a uma taxa suficiente, a capacidade reduzida resultante e períodos mais longos para aquecer também resultarão em desperdício de energia. O golpe de aríete pode eventualmente resultar em danos às válvulas e outros componentes nos sistemas de vapor, acarretando vazamentos de vapor (AL HADABI et al., 2016)

2.2 PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é a parte da termodinâmica que estuda a transmissão de energia térmica de um sistema para sua vizinhança ou entre partes de um sistema, segundo Moran (2013), transferência de calor é energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. É uma área relevante em múltiplos problemas de engenharia que transcendem o âmbito da engenharia mecânica, abrangendo também as áreas das engenharias química, nuclear, metalúrgica, elétrica, civil, aeroespacial, ambiente e bioengenharia (BOLES, 2007). Sempre que houver uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorrerá necessariamente transferência de calor.

Os tipos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação. Quando existe uma gradiente de temperatura em um meio, que pode ser um sólido ou um fluido utiliza-se o termo condução para se referir à transferência de calor que irá ocorrer através desse meio. Em contraste, o termo convecção se refere à transferência de calor que irá ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento, quando estes se encontram em temperaturas diferentes. O terceiro modo de transferência de calor é conhecido por radiação térmica, através de ondas eletromagnéticas (INCROPERA, 2011).

De acordo com Moran (2013), o termo condução é utilizado para se referir à transferência de calor que irá ocorrer através de um meio material. O mecanismo físico da condução envolve os conceitos de atividade atômica e molecular, que sustenta a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia de uma substância devido às interações que existem entre as partículas.

Determinada experimentalmente pelo matemático francês Jean-Baptiste Fourier (1768-1830), a lei da condução térmica, conhecida como lei de Fourier, estabelece que a taxa de transferência de calor por condução q, de uma placa plana, seja diretamente proporcional à

diferença de temperatura das extremidades da placa, sendo T1 a temperatura da extremidade 1 da placa e T2 a temperatura da extremidade 2 de uma placa, a área da seção transversal A e a constante de condutividade térmica k da mesma. E inversamente proporcional largura L da placa plana. A expressão analítica dessa lei é demonstrada pela equação 1.

$$q = \frac{kA}{L}\,(T_1 - T_2) \tag{1}$$

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. A convecção é forçada, quando o escoamento é causado por meios externos, como, por exemplo, um ventilador, uma bomba, ou até mesmo os ventos atmosféricos. Ao contrário, na convecção natural, o escoamento é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir das diferenças de massa específica causadas por variações de temperatura no fluido (MORAN, 2013).

Moran (2013) descreve que Isaac Newton (1643-1727), físico e matemático, formulou a lei do resfriamento de Newton, que recebeu seu nome, e ela rege a taxa de transferência de calor por convecção, expressa pela equação 2. A mesma diz que a taxa de transferência de calor por convecção é diretamente proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície de um corpo e do fluido analisado, Ts e T∞, respectivamente, a constante h que é denominada coeficiente de transferência de calor por convecção e a área As da superfície de troca de calor.

$$q = hA_s\,(T_s - T_\infty) \tag{2}$$

O processo de transmissão de calor por radiação térmica ocorre através de ondas eletromagnéticas, a transferência por radiação ocorre com mais eficiência no vácuo. Radiação é a energia térmica emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura (MORAN, 2013). Ainda segundo Moran (2013) a radiação também pode incidir sobre uma superfície. A radiação pode ser oriunda de uma fonte especial, como o Sol, ou de outras superfícies às quais a superfície de interesse esteja exposta. Não importando qual é a fonte, a taxa na qual todas

essas radiações incidem sobre uma unidade de área da superfície é chamada de irradiação. Uma parte ou toda a irradiação pode ser absorvida pela superfície, aumentando assim a energia interna do material.

Caso as superfícies do tubo estejam com incrustações devido a impureza dos fluidos, deve-se levar em consideração também as resistências das incrustações, tanto no lado interno quanto no externo do tubo. Segundo Moran (2013), a resistência térmica condutiva Rp em uma parede cilíndrica (parede do tubo) pode ser escrita matematicamente pela expressão 3. Onde, ri é o raio interno do tubo, re é o raio externo do tubo, L é o comprimento do tubo e k é a condutividade térmica.

$$R_p = \frac{\ln(\frac{r_e}{r_i})}{2\pi L k} \tag{3}$$

2.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O balanço de energia em uma situação onde os fluidos envolvidos no trocador de calor não passam por mudanças de fases, e sendo a troca térmica entre o trocador e a vizinhança desprezível, tem um sistema em regime estacionário e que existam calores específicos constantes, tem-se a função 4 e 5 para a taxa de transferência de calor para os fluidos: quente e frio (MORAN, 2013).

$$Q_q = \dot{m}_q c_{p,q}(T_{q,e} - T_{q,s}) \tag{4}$$

$$Q_f = \dot{m}_f c_{p,f}(T_{f,s} - T_{f,e}) \tag{5}$$

Onde: Qq= transferência de calor do fluido quente (W); Qf= transferência de calor do fluido frio (W); ṁq= vazão mássica do fluido quente (kg/s); ṁf= vazão mássica do fluido frio (kg/s); cp,q= calor específico à pressão constante do fluido quente (J/kg.K); cp,f = calor específico à pressão constante do fluido frio (J/kg.K); Tq,e e Tq,s(ºC)= respectivamente, ás temperaturas de entrada e saída, relativas ao fluido quente; Tf,e e Tf,s= às temperaturas de

entrada e saída, relativas ao fluido frio (ºC).

A vazão mássica, ṁ, é definida como a quantidade em massa de um fluido que escoa através de certa seção em um intervalo de tempo considerado. A unidade do sistema internacional de medida de vazão mássica é o kg/s. Que pode ser calculada pela expressão 6, onde a vazão mássica é proporcional a densidade do fluido ρ e a vazão volumétrica Q, que é definida como a quantidade em volume que escoa através de certa seção em um intervalo de tempo (MORAN, 2013).

$$\dot{m} = \rho . Q \tag{6}$$

Através da análise de Rubbo (2014), para trocadores de calor tem-se que a taxa de transferência de calor q, também chamada de taxa de transferência de calor real, pode ser escrita pela a equação 7, onde U é coeficiente global de transferência de calor global em W/m2.K, A é a área em m2 da superfície de troca térmica e ΔTml é a diferença de temperatura média logarítmica (DTML) em K.

$$q = U . A . \Delta T_{ml} \tag{7}$$

Para o caso de permutadores de calor com o arranjo de casco e tubo, que possui várias passagens do fluido, a derivação matemática de uma equação para a diferença média se torna mais complexa. O procedimento normal é modificar a diferença de temperatura média logarítmica (DTML) por meio do fator de correção F, equação 8, publicado em forma de gráfico pela norma Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), uma associação comercial reconhecida dos principais fabricantes de cascos e tubos. (STEWART & LEWIS, 2013).

$$\Delta Tml = F . \Delta T_{ml,CF} \tag{8}$$

Segundo Moran (2013), a taxa de transferência de calor por convecção para trocador de calor casco tubo pode ser reescrita, pela expressão 9, com a diferença de temperaturas média logarítmica (DTML) corrigida por meio do fator de correção F, e considerando a área

A = N.π.D.L, onde N é o número de tubos, L o tamanho do tubo, D é o diâmetro interno do tubo.

$$q = U.(N.\pi.D.L).F.\Delta T_{ml,CF} \quad (9)$$

2.3.1 Transferência de calor nas aletas

Mattjie (2013) afirma que, uma aleta pode ser definida como uma superfície que se estende a partir de um determinado objeto, aumentando a área de transferência de calor e, com isso aumenta a taxa de transmissão de calor. É um método de aumento da eficiência da troca de calor tanto na coleta como na dissipação de energia, é aplicado na engenharia em transformadores, motores de combustão interna, compressores, motores elétricos e trocadores de calor.

Como Moran (2013) descrimina em seus estudos, é desejável aumentar a taxa de transferência de calor de uma superfície sólida para um fluido adjacente, pois os equipamentos das indústrias precisam ter mais eficiência e uma opção é o uso de aletas para aumentar a taxa de transmissão de calor. Isso ocorre devido à ampliação da área de superfície transversal com o emprego das aletas que se estendem em direção ao fluido adjacente através da qual ocorre a convecção.

A taxa de transferência calor da aleta qf pode ser calculada pela fórmula 10. Onde: Ac é a área da seção transversal da aleta; θ_b é a diferença de temperatura na base da aleta; h é a constante de proporcionalidade (W/m².K); P é o perímetro da seção transversal da aleta e k é a condutividade térmica.

$$\mathrm{qf} = \sqrt{(h.\mathrm{P.k.Ac.\theta b})} \quad (10)$$

Ribeiro (2007) descreve em seu trabalho que, para aumentar a taxa de transferência de calor de um trocador de calor de aletas planas, otimiza-se a distância entre as aletas

efetuando-se o cálculo das camadas limites hidrodinâmica e térmica. Com isso, é possível obter uma distância entre aletas que possibilite a formação de uma camada limite turbulenta, na maior parte do comprimento da aleta otimizando assim a taxa de transferência de calor.

2.4 EFICIÊNCIA

O conceito de eficiência é usado em muitas áreas, particularmente em engenharia, para avaliar o desempenho de componentes e sistemas reais. A eficiência é uma comparação entre os melhores desempenhos real e ideal e é tipicamente definida como sendo menor ou igual a 1. O comportamento ideal é geralmente conhecido da modelagem e as limitações ditadas pelas leis físicas, particularmente a segunda lei da termodinâmica. Conhecendo o desempenho ideal, o desempenho real pode ser determinado se forem conhecidas expressões para a eficiência em função das características do sistema e das condições de operação. A eficiência fornece uma medida clara e intuitiva do desempenho de um sistema, mostrando o quanto um sistema real se aproxima do melhor possível e se outras melhorias são viáveis e justificáveis.

Conforme Incropera (2011), a efetividade de um trocador de calor é definida como a razão entre a troca térmica real e a troca térmica máxima possível que poderia ser obtido em um trocador teórico de área infinita, de acordo com a equação 11. Por definição, a efetividade, que é adimensional, está no intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max.}} \tag{11}$$

O método da efetividade é utilizado quando apenas as temperaturas de entrada são conhecidas e tem a vantagem de apresentar diversas informações a respeito do desempenho do trocador de calor. Ainda, pode-se calcular a taxa de transferência de calor só conhecendo a temperatura de entrada do fluido quente e frio, a efetividade e a taxa de capacidade calorífica (PERUSSI, 2010).

Segundo Oliveira (2010), para se definir a efetividade de um trocador de calor, é necessário determinar a taxa de transferência de calor máxima possível qmáx, em um trocador. Tem-se que Cf é a taxa de capacidade calorífica do fluido frio e Cq é a taxa de capacidade calorífica do fluido quente, onde a capacidade calorífica é o produto da vazão mássica com o calor especifico (C = ṁ.cp). O valor da taxa de capacidade calorífica mínima Cmín é dado pelo menor valor entre Cf e Cq. Utilizando esse valor de Cmín, tem-se a equação 12 que representa a taxa de transferência de calor máxima possível qmáx, onde Tq,e e Tf,e, são as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, respectivamente.

$$q_{máx} = C_{mín}(T_{q,e} - T_{f,e}) \quad (12)$$

Segundo Incropera (2011), o número de unidades de transferência (NUT) é um parâmetro adimensional muito utilizado na análise de trocadores de calor, sendo definido pela fórmula 13. Onde U é o coeficiente global de transferência de calor, As é a área de troca térmica do trocador de calor e Cmin é a menor capacidade térmica entre dois fluidos.

$$NUT = \frac{U.A_s}{C_{min.}} \quad (13)$$

Na relação entre a efetividade e o Número de Unidades de Transferência (NUT) para o trocador de calor casco tubo com dois passes no casco e fluxo de contracorrente dos fluidos, os valores da efetividade para o eixo das ordenadas e o Número de unidades de transferência no eixo das abscissas, e as curvas do gráfico é definido a relação dos valores da capacidade calorífica mínima pelos valores capacidade calorífica máxima (OLIVEIRA, 2010).

Na abordagem NTU, a eficiência do trocador de calor é definida pela equação 14, onde o termo no denominador é o calor máximo absoluto que pode ser transferido de um fluido em T1 para outro fluido em t1. Essa quantidade máxima de transferência de calor só pode ocorrer em um trocador de calor cuja área se aproxima do infinito. Expressões e gráficos estão disponíveis para determinar a eficácia de diferentes trocadores de calor, e são tipicamente uma função de duas variáveis Cr e NTU. O método NTU é usado principalmente

em situações em que o tamanho do permutador de calor e as temperaturas de entrada são conhecidas e a taxa de transferência de calor e as temperaturas de saída do fluido são procuradas como problema de classificação, embora problemas de dimensionamento também possam ser resolvidos com este método.

$$\varepsilon = \frac{q}{C_{min.}.(T1 - t1)} \tag{14}$$

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida com a finalidade de proporcionar mais informações sobre o assunto investigado, possibilitando sua definição e seu delineamento, fixação dos objetivos e a formulação das hipóteses ou descobrir um novo tipo de enfoque para o assunto, percebe-se então, que ela é classificada como pesquisa exploratória.

Como instrumento para coleta de dados, primeiramente, a procura pelo material foi realizada, com margem de publicação em 10 anos, devido a representar um período de materiais novos e atualizados. Os termos pesquisados foram Eficiência energética e Sistemas de Vapor. Posteriormente, buscaram-se conceitos sobre Transferência de Calor e Termodinâmica, em autores referenciais no desenvolvimento do tema. Finalmente, a pesquisa ocorreu entre janeiro e março de 2019, os textos e materiais encontrados foram entendidos, resumidos e citados indiretamente na fundamentação teórica deste artigo.

Esta pesquisa trabalhou com a compreensão dos conceitos da eficiência energética e transferência de calor em sistemas de vapor de uma indústria, onde, estabeleceram-se tópicos (recorte espacial, temporal e a abordagem) e, após definir o que seria abordado em cada capítulo e quais dados seriam analisados, iniciou-se a pesquisa bibliográfica e montagem do trabalho. Com a apresentação dos conceitos, buscou-se aprofundar em um método para

aumentar a eficiência de um sistema de vapor, a recuperação de calor de resíduos. Tais resultados foram elaborados a partir de uma revisão bibliográfica que priorizou estudos mais recentes com publicações internacionalmente reconhecidas.

4 INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por definição, a otimização energética consiste na relação entre a quantidade de energia disponível para uma atividade e aquela utilizada, visando à minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil. Vale destacar, por exemplo, que a eficiência está diretamente ligada com a sustentabilidade, onde se faz mais com o mínimo possível. A recuperação energética do processo é capaz de proporcionar uma grande economia de energia, trazendo benefícios econômicos para a indústria, conclui-se que a implementação da integração energética, como meio de otimização do processo é bastante eficaz e, mesmo que seja a longo prazo, o investimento nessa melhoria no processo de produção, pode trazer grandes lucros financeiros, assim como, a contribuição com a preservação do meio ambiente.

Godoi e Júnior (2009) dissertam que, a eficiência energética abrange o conjunto de ações de racionalização, que levam à redução do consumo de energia, sem perda na quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos, ou no conforto disponibilizado pelos sistemas energéticos utilizados. A FUPAI (2005) esclarece que, a condução é o modo de transferência de calor em que a troca de energia acontece em um meio sólido ou um fluído em repouso, pela troca de energia cinética ao nível dos elétrons e moléculas. Deste modo, "cada vez mais se torna evidente que usar bem energia e reduzir desperdícios, além de ser possível, é uma postura inteligente, racional, com vantagens econômicas, sociais e ambientais em vários níveis" (FUPAI, 2005, p.15).

Apesar dos significativos benefícios ambientais e energéticos da recuperação de calor

residual, sua execução ainda depende principalmente da economia e dos riscos técnicos percebidos. De fato, o DOE (2008) sugere que é improvável que a maioria das instalações de produção industrial invista em projetos de recuperação de calor residual que tenham um período de retorno de investimento de mais de três anos.

As medidas de eficiência energéticas para as caldeiras incluem, principalmente, as listadas a seguir:

- **Melhor controle de processo**: os monitores de gases de combustão são usados para manter a temperatura ótima da chama e monitorar o CO, o oxigênio e a fumaça. Esta medida pode ser muito cara para pequenas caldeiras.
- **Redução das quantidades de gás de combustão e do excesso de ar**: muitas vezes, o excesso de gás de combustão resulta de vazamentos na caldeira e na chaminé, reduzindo o calor transferido para o vapor e aumentando as exigências de bombeamento.
- **Melhor isolamento:** Como resultado da menor capacidade de calor da fibra cerâmica, a temperatura de saída é mais vulnerável às flutuações de temperatura nos elementos de aquecimento (CAFFAL, 1995).
- **Funcionamento contínuo das caldeiras**: na ausência de um bom sistema de manutenção, os queimadores e sistemas de retorno de condensado podem se desgastar ou ficar fora de ajuste. Esses fatores podem acabar custando um sistema de vapor de até 20-30% da eficiência inicial em 2-3 anos (OIT, 1998).
- **Recuperar o vapor da purga**: Este vapor é de baixo grau, mas pode ser usado para aquecimento de ambientes e pré-aquecimento de água de alimentação. Assumimos que essa medida pode economizar 1,3% do uso de combustível de caldeira para todas as pequenas caldeiras, com um retorno de 2,7 anos (IAC, 1999).

Seguindo essa premissa, uma série de tecnologias para recuperar energia de gases, líquidos e até fluxos de resíduos sólidos já são utilizadas em grandes indústrias. Em geral, existem quatro tipos principais de tecnologias que são utilizadas durante a recuperação de calor residual: (1) uso direto, (2) trocadores de calor, (3) bombas de calor e (4) recompressão de vapor. As duas primeiras tecnologias envolvem a utilização do calor residual “como está” ou, por outras palavras, a qualidade do calor residual já é adequada para utilização, enquanto

as outras duas tecnologias envolvem a melhoria do calor residual ou o aumento do nível de energia de um determinado fluxo de resíduos pode se tornar mais útil. Os trocadores de calor e as bombas de calor têm a mais ampla gama de aplicabilidade, independentemente do tipo de indústria, enquanto a recompressão de vapor tende a ser limitada a usinas maiores e sistemas de processos complexos (CHOWDHURY, 2017).

Como as bombas de calor, a recompressão de vapor é usada durante os casos em que o calor residual é inutilizável em sua temperatura atual e precisa ser transformado em um estado utilizável. Ao contrário das bombas de calor, no entanto é utilizada apenas para casos muito específicos: onde o fluxo de calor residual está na forma de vapores de baixa temperatura. A recompressão de vapor pode ser obtida mecanicamente ou termicamente, cada um com seu próprio conjunto de vantagens e desvantagens (LIU et al., 2014).

5 CONCLUSÃO

As indústrias brasileiras estão passando por um momento de desafio frente ao cenário de crise em que todos se encontram e compreender conceitos de eficiência energética passa a ser essencial para sobrevivência delas. O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise dos sistemas de vapor industrial, e seus componentes de geração, distribuição, uso final e recuperação dentro das fabricas, uma reflexão acerca dos conceitos de eficiência energética e dificuldades que impactam a eficiência energética em sistemas de vapor.

De um modo geral, este trabalho serviu como base para o entendimento dos conceitos de eficiência energética em sistemas de vapor, no decorrer da pesquisa foram delineadas dificuldades e vantagens do programa. A qualidade do vapor é importante porque este tem um efeito direto sobre a quantidade total de energia transferível contida. Sendo assim, se tem um processo mais eficiente, com menor custo e principalmente com menor índice de manutenção

corretiva ao se adotar processos de eficiência.

Há considerável oportunidade para melhoria da eficiência energética em sistemas de vapor industriais. As economias representam aproximadamente 19% do uso final de energia e 7% do consumo total de energia final da indústria, representando uma redução substancial nas emissões de dióxido de carbono. Assim, dada à importância do tema, visto que com a elevação dos preços da energia, o consumo racional é essencial para a economia e para o meio ambiente, propõe-se o desenvolvimento de um estudo de caso em uma indústria, buscando o levantamento de dados para avaliação da metodologia indicada neste trabalho, por meio de estudos e avaliações energéticas, otimizando todo o sistema de geração e distribuição do vapor e, consequentemente, melhorando a sustentabilidade da instalação e reduzindo os custos energéticos.

Embora o progresso na área de eficiência energética seja frequentemente considerado muito difícil, demorado e caro, em muitos casos, o oposto é verdadeiro. Muitas vezes, as economias disponíveis para os fabricantes de projetos de eficiência energética, como a recuperação de calor residual, superam em muito os custos incorridos na implementação do projeto, como pode ser visto nos estudos de caso descritos anteriormente. Enfim, conclui-se que o trabalho conseguiu atingir o objetivo que se propôs de realizar uma revisão bibliográfica para entendimento dos conceitos de eficiência energética de sistemas de vapor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C. S. DE et al. Fatores determinantes para o avanço da Energia Eólica no Estado do Ceará frente aos desafios das mudanças climáticas. **REAd. Revista Eletrônica de Administração (Porto Alegre)**, v. 20, n. 2, p. 274–304, ago. 2014.

BELUSSI, L.; DANZA, L.; SALAMONE, F.; MERONI, I.; GALLI, S. **Integrated smart system for energy audit**: Methodology and application. Energy Procedia 140. 231-239. 2017;

BOLES, Michael. **Termodinâmica**, 5ª ed., McGraw –Hill Brasil, ano: 2007;

BUJAK, J. **Energy savings and heat efficiency in the paper industry**: a case study of a corrugated board machine. Energy Combustion 11. 2008.

CAFFAL, C. **Energy Management in Industry**. CADDET, Sittard, The Netherlands. 1995;

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196p. ilust.

CHEN, R. et al. Experimental study of the steam condensate dripping behavior on the containment dome. **Nuclear Engineering and Design**, v. 346, p. 131–139, 1 maio 2019.

CHOWDHURY, J. I. **Modelling and Control of Waste Heat Recovery System.** Thesis for: PhD in Mechanical Engineering, Advisor: Bao Kha Nguyen, David Thornhill. 2017.

GATES, I. D.; LESKIW, C. Impact of steam trap control on performance of steam-assisted gravity drainage. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 75, n. 1–2, p. 215–222, 2010.

GUNDERSEN, T., NAESS, L. **The syntesis of cost optimal heat exchanger networks: an industrail review of state of the art.** Computers & Chemical Engineering,Great Britain, v. 12, n. 6, p. 503- 530, 1987.

GODOI, José M. A.; JUNIOR, Silvio O. **Gestão da eficiência energética.** In: II International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2009.

INCROPERA, F. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2011. 644 p

Industrial Assessment Center (IAC, 1999). **Industrial Assessment Center Database**. Disponível em: <http://oipeawww.rutgers.edu/site_docs/dbase.html>. Acesso em: 18 de Agosto de 2019.

KIM, K.; JEONG, J. H. Steam condensate behavior and heat transfer performance on chromium-ion-implanted metal surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 136, p. 681–691, 1 jun. 2019.

LIU, L.; ZHANG, J. J.; LIU, Y.; ZHANG, S. F. **Application of mechanical vapor recompression technology in evaporation.** Editorial Office of Chemical Engineering

(China). 2014.

MATTJIE, C. A. **Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira,** Faculdade Horizontina, Horizontina. 2013.

MORAN, M. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**, Rio de Janeiro: LTC, 2013. 604 p.

NETO, J. N. S. **Metodologia para aplicação de integração energética numa planta industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal da Bahia. 88p. Salvador, Bahia. 2005

OLIVEIRA, G. A. **Dimensionamento de um trocador de calor casco e tubos, Departamento de Engenharia Mecânica**, Universidade Federal de Urbelândia, Urbelândia, 2010.
Office of Industrial Technologies (OIT, 1998). **Steam Challenge**. Disponível em: <http://www.oit.doe.gov/steam/>. Acesso em: 20 de Agosto de 2019.

Panorama Comerc Informações sobre Energia. Disponível em: <http://panorama.comerc.com.br/2016/08/consumo-de-energia-deve-crescer-3-mais-do-que-o-esperado/>. Acesso em: 10 set. 2018.

PERUSSI, R. **Análise do desempenho de trocador de calor de fluxo cruzado por simulação númerica,** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

REKIOUA, D. **Energy Management for PV Installations**. [s.l.] Elsevier Inc., 2018. v.1

RELVAS, S., FERNANDES, M. C., MATOS, H. A., NUNES, C. P. **Integração de Processos: Uma metodologia de optimização energética e ambiental.** Polarpress, Lda. 1 ed. 129p. Setubal, Portugal. 2000.

RIBEIRO, L. N. **Otimização de trocadores de calor compactos de aletas planas através da análise da camada limite**, 2007, 97 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade de Taubaté, São Paulo. 2007.

RUBBO, P. N. **Determinação do coeficiente global de transferência de calor de um condensador do tipo casco e tubo de um chiller por adsorção de amônia em NaBr**, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá. 2014

SALEHI, A.; SAFARZADEH, O.; KAZEMI, M. H. Fractional order PID control of steam generator water level for nuclear steam supply systems. **Nuclear Engineering and Design**, v. 342, p. 45–59, 1 fev. 2019.

SMITH, R. et al. Steam Traps. **Industrial Machinery Repair**, p. 432–440, 1 jan. 2003.

SOLA, A. VA. H.; KOVALESKI, J. L. **Eficiência energética nas indústrias : Cenários & oportunidades**. XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção. **Anais**...2004Disponível em: <http://pg.utfpr.edu.br/dirppg/ppgep/ebook/2004/81.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018.

STEWART, Maurice; ORAN, Lewis T. **Heat Exchanger Equipment Field Manual, Common Operating Problems**. Waltham, USA : Gulf Professional Publishing, 2013.

United States Department of Energy (DOE, 2008). **Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry**. Industrial Technologies Program, 2008.

YAZAWA, K.; KOH, Y. R.; SHAKOURI, A. **Optimization of thermoelectric topping combined steam turbine cycles for energy economy.** Applied Energy, v. 109, p. 1–9, 1 set. 2013.