

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PERMUTADOR DO TIPO FEIXE DE TUBOS NO PRÉ-AQUECIMENTO DE ÓLEO TÉRMICO

Bruno Sena de Souza¹, Ítalo Matos¹, Maycon Carlete¹, Pedro Junior Zucatelli²

¹Acadêmicos de Engenharia Mecânica - Multivix São Mateus/ES

²Doutor em energia/Docente - Multivix São Mateus/ES

RESUMO

No cenário industrial, a busca por processos com maior eficiência e pela melhoria da gestão dos recursos tem se tornado muito importante para obter vantagens competitivas, menores custos e alta produtividade. A utilização de energias perdidas para o aquecimento de outros sistemas é um forte aliado para aqueles que desejam esse objetivo. Esse trabalho apresenta um sistema de recuperação de calor para pré-aquecimento do óleo térmico, utilizando um permutador que reaproveita a energia, em forma de calor, dos gases de exaustão de uma turbina a gás, utilizada para compressão de gases de uma planta de tratamento de gás. Para que isso seja possível, foram apresentados os principais conceitos referentes à permutadores, através de revisão bibliográfica, para expor o tema e posteriormente avaliar a eficácia desse equipamento no processo de aquecimento do óleo térmico. O projeto foi implantado na UTGC – Unidade de Tratamento de Gás de Cacimbas em Linhares – ES. A metodologia adotada baseia-se nas informações encontradas nos ensinamentos literários e nos dados necessários para os cálculos de rendimento e eficiência térmica, que foram obtidos de forma experimental pelos autores, utilizando instrumentos para coleta das variáveis do sistema e comparados com os dados de projeto inicial, fornecidos por documentos internos da empresa. Os resultados mostram que os rendimentos dos experimentos foram maiores que os fornecidos pelos projetos, devido a operação da turbina no momento da coleta de dados, mas que ambos operavam de forma eficiente, alcançando o resultado necessário esperado pelo equipamento na temperatura final do óleo térmico.

Palavras-chave: permutador; óleo térmico; gases exaustos; transferência de calor; rendimento energético.

ABSTRACT

In the industrial landscape, the pursuit of more efficient processes and improved resource management has become crucial for achieving competitive advantages, lower costs, and high productivity. Utilizing wasted energy to heat other systems is a strong ally for those seeking this goal. This work presents a heat recovery system for preheating thermal oil, using a heat exchanger that reuses the energy, in the form of heat, from the exhaust gases of a gas turbine used for gas compression in a gas treatment plant. To achieve this, the main concepts related to heat exchangers were presented through a literature review, to introduce the topic and subsequently evaluate the effectiveness of this equipment in the thermal oil heating process. The project was implemented at the UTGC – Cacimbas Gas Treatment Unit in Linhares – ES. The methodology adopted is based on information found in literature and on the data necessary for the calculations of yield and thermal efficiency, which were obtained experimentally by the authors, using instruments to collect the system variables and compared with the initial design data, provided by internal company documents. The results show that the yields from the experiments were higher than those provided by the designs, due to the turbine's operation at the time of data collection, but that both operated efficiently, achieving the necessary result expected by the equipment at the final temperature of the thermal oil.

Keywords: heat exchanger; thermal oil; exhaust gases; heat transfer; energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO

O calor e a temperatura estão presentes no cotidiano do ser humano, seja no seu desenvolvimento ou na sua existência propriamente dita. É importante fazer uma distinção entre os dois, já que à primeira impressão é que se trata do mesmo assunto. Os dois são distintos por Bauer, Westfall e Dias (2013), onde o calor é definido com um tipo de energia térmica que está voltada ao movimento cinético de átomos e moléculas de um elemento dentro de um sistema com sua vizinha ou entre dois elementos. Já a temperatura é apresentada como a capacidade que um objeto tem de transferir esse calor ao seu entorno, sendo que a energia, em forma de calor, será sempre transferida do elemento que possuir maior temperatura para o elemento que possui menor temperatura. Logo, o termo frieza é apenas uma expressão que

está relacionada com a ausência de calor em um corpo, sendo essa sentida pela fonte quente que está cedendo calor para a fonte fria.

Como abordado anteriormente, o uso do calor e suas propriedades de transferência são de suma importância para a vida. Sua utilização vai desde processos domésticos com o aquecimento de alimentos no fogão, retirada de calor na utilização de um refrigerador até processos industriais, onde, diversos ramos utilizam fluidos térmicos para a efetividade de seus processos, seja na área do gás, do petróleo, indústrias alimentícias, usinas termelétricas, refinarias, fábricas de produtos químicos entre outros.

Cada processo tem sua particularidade em que precisa ser utilizado fluidos aquecidos para inserir ou retirar calor do sistema. Para tal finalidade, se dispõe de um equipamento para transferência de calor chamado permutador apresentado por Bergman e Lavine (2019, p.418):

O processo de troca de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida ocorre em muitas aplicações de engenharia. O equipamento usado para implementar essa troca é conhecido por trocador de calor, e suas aplicações específicas podem ser encontradas no aquecimento de ambientes, em sistemas de ar-condicionado, na produção de potência, na recuperação de calor em processos e no processamento químico.

Os permutadores de calor ainda podem ser utilizados em sistemas de recuperação de calor, utilizando a energia perdida de processos de queimas de combustíveis para pré-aquecer outro sistema (Bergman; Lavine, 2019).

Processos eficientes são aqueles em que se produz mais com as menores perdas, aprimorando assim seus custos e ao mesmo tempo tornando o processo o mais ecologicamente correto possível. Isso não é tarefa fácil, pois muitas variáveis estão ligadas a processos de combustão alimentados por combustíveis fósseis. Dentre essas variáveis, uma tem um grande destaque: a perda de energia na forma de calor que não é aproveitada pelo processo desejado. Sistemas de melhorias para o reaproveitamento de energias térmicas devem ser estudados e aprimorados nas indústrias, obtendo cada vez mais rendimentos melhores, acarretando assim em um menor custo operacional e menor degradação ambiental (Barros Junior, 2001).

Para Daitx (2010) reduzir os custos é um desafio de toda companhia e representa um dos recursos de gerenciamento mais aplicados nos momentos com maior variação no mercado. As organizações, devem lidar com as oscilações do

mercado, as crises e utilizar metodologias em processos apropriados para o gerenciamento de custos.

De acordo com Costa (2012) devido a essa tendência, as companhias têm a incumbência de investir em serviços, novos produtos e principalmente em novas estratégias que assegurem o atendimento do mercado. Para que isso ocorra são imprescindíveis novos investimentos, às vezes pequeno ou às vezes alto, porém fundamentais ao novo padrão empresarial.

A importância desse trabalho é mostrar como é eficaz o reaproveitamento de energias perdidas de processos a combustão, visto que, esse aproveitamento pode ser utilizado em outros processos, além de diminuir a emissão de poluentes na atmosfera, algo que vem sendo muito debatido na atualidade.

A implementação de um sistema de recuperação de calor para o pré-aquecimento do óleo térmico gera a economia de dinheiro e produto, pois os fornos aquecedores devem queimar menos gás combustível para alcançar a temperatura de processo desejada, gases esses que também são produtos dos processos de separação da unidade, que sendo utilizados para alimentar os fornos aquecedores, deixam de ser comercializados. Com a utilização desse sistema regenerativo, tem-se a diminuição de consumo e emissão de poluentes provenientes da queima do combustível.

Esse trabalho tem embasamento teórico para compreensão do que é um sistema de recuperação de calor e os equipamentos envolvidos. Com isso, foi apresentado a importância desse sistema para a recuperação de energias perdidas do processo de compressão de gases, bem como a avaliação do seu desempenho através de métodos experimentais. O equipamento estudado foi implantado em uma unidade de tratamento de gás localizado na região de Linhares no estado do Espírito Santo, sendo esse dimensionado para atender internamente os processos da planta e suas individualidades.

O objetivo geral desse trabalho foi verificar se o novo permutador instalado é satisfatório na troca térmica, concedendo ao fluido o aquecimento mínimo necessário do óleo, para que o mesmo chegue com uma temperatura maior ao forno, gastando menos energia térmica para aquecê-lo e conseqüentemente economizando a queima de gás.

E como objetivos específicos esse trabalho se propõe: Avaliar o rendimento teórico do projeto; verificar o coeficiente global de transferência de calor entre os

fluidos; avaliar a temperatura final do óleo aquecido; avaliar o rendimento do permutador em operação em todos os experimentos; avaliar se o rendimento experimental satisfaz as necessidades do projeto; avaliar entre o projeto teórico e experimental qual possui melhor rendimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FLUIDOS TÉRMICOS PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Se enquadram nesse grupo fluidos que possuem características físicas capazes de realizar a transferência energética necessária para aquecer ou resfriar sistemas térmicos, sendo considerado meio condutor de energia térmica da fonte geradora, sendo um aquecedor, caldeira etc. para um determinado ponto que realizará o consumo dessa energia. Desta forma, pode-se reconhecer que o fluido térmico mais conhecido é a água, seja na fase líquida ou vapor. Talvez a utilização industrial mais conhecida desse fluido é na utilização do vapor de água para acionamento de máquinas térmicas, como por exemplo, a turbina a vapor, que aproveita a energia térmica do vapor gerado por uma caldeira para realizar trabalho mecânico e posteriormente utilizar esse trabalho para outras finalidades, como a geração de energia elétrica, acionamento de turbo máquinas (Moran et al., 2018).

Alguns fatores são importantes na escolha do fluido a ser utilizado, dentre eles: estabilidade térmica, calor específico, condutividade térmica, baixa viscosidade e alta vida útil. Logo, entende-se que a temperatura do processo é muito importante, pois um fluido que não possua as características necessárias pode sofrer alterações físicas indesejáveis, como a mudança de fase, a qual implicaria no processo de transferência de calor. Por isso, a tecnologia de sistemas aquecidos por fluidos orgânicos, como o óleo, em sua fase líquida é a mais comum em sistemas industriais. Isso pode ser observado na passagem a seguir de Kolosque (2015, p.1):

O uso do aquecimento de fluido térmico orgânico é vantajoso, pois representa baixo investimento e rápido retorno. Ele possui amplas aplicações em sistemas de aquecimento em uma faixa de temperaturas que oscila de 0°C a 400°C, o que evita, nesta banda, as desvantagens resultantes do uso da água quente e do vapor saturado. Porém, são em temperaturas acima de 180°C que se encontram as maiores aplicações.

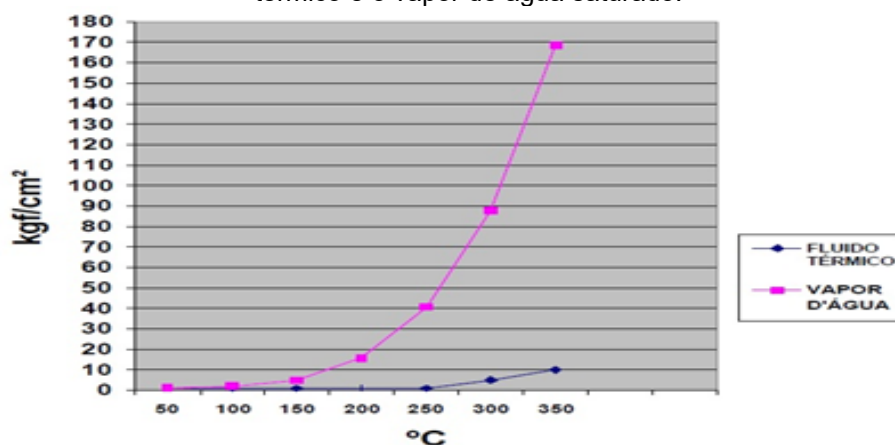
Observa-se ainda que os sistemas que utilizam fluidos orgânicos conseguem ter um controle mais preciso relacionado a temperatura, evitando superaquecimento não desejado para o sistema. Outro ponto chave é o menor custo de manutenção se comparado com sistemas de vaporização de água (Barros Júnior, 2001).

O mesmo sistema pode funcionar adicionando calor ou retirando, conforme necessidade do equipamento. Comparado com um sistema de geração de vapor, tem-se como grande vantagem o trabalho a altas temperaturas e baixas pressões, além de não ocorrer corrosão por oxidação, não sendo necessário um sistema para tratamento de água e consumo inexistente do mesmo, diminuindo custos operacionais, uma vez que não há a necessidade de reposição do fluido por ser um sistema fechado.

Além disso, a utilização de óleos combustíveis apresenta um controle mais exato de sua temperatura, podendo controlar o ponto de trabalho com mais exatidão, o que evita superaquecimentos indesejados em pontos localizados (Barros Júnior, 2001).

A Figura 1 mostra a relação pressão x temperatura dos dois fluidos, conforme ocorre variação de temperatura de processo.

Figura 1 - Comparação das pressões de trabalho para as diversas temperaturas, entre o fluido térmico e o vapor de água saturado.



Fonte: Barros (2001).

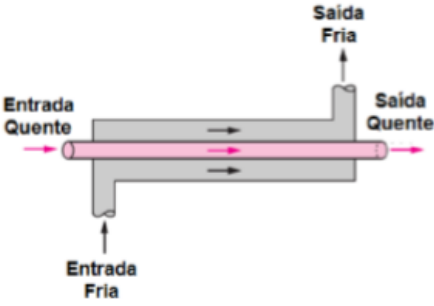
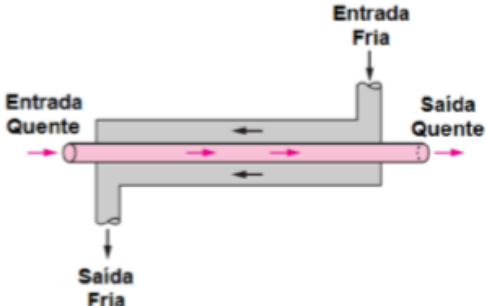
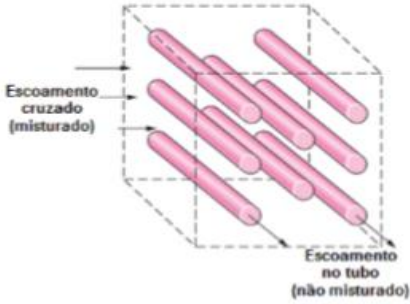
Pela Figura 1, pode-se verificar que fluido de vapor de água apresenta pressões de trabalhos muito superior ao do óleo em temperatura elevada. Devido a esse acontecimento, a utilização de vapor de água obrigaria que o sistema fosse mais reforçado, o que o tornaria mais caro (Barros Júnior, 2001).

2.2 PERMUTADORES DE CALOR

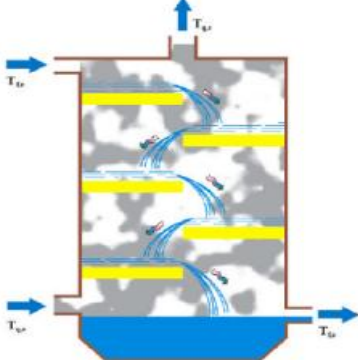
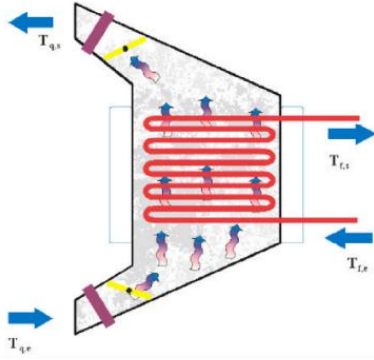
Os permutadores de calor são classificados e distinguidos pela classificação do fluxo do fluido transportado, pelo tipo de contato que ocorre a transferência de calor e pela sua construção.

Os fluxos podem ser classificados como paralelos, para fluidos que se movem em mesmo sentido, tendo o mesmo destino inicial e final, contracorrente para fluidos que circulam em sentidos opostos, entrando e saindo por extremidades opostas, e correntes cruzadas para fluxos perpendiculares entre si, ocorrendo entre eles mistura ou não (Bohorquez, 2014).

As Figuras 2.1 a 2.3 demonstram a classificação do fluxo dos fluidos nos permutadores.

Figura 2.1 – Fluxo paralelo.	Figura 2.2 – Fluxo contracorrente.
	
Fonte: Bohorquez, 2014.	Fonte: Bohorquez, 2014.
Figura 2.3 – Fluxo cruzado.	
	
Fonte: Bohorquez, 2014.	

Quanto ao tipo de contato, pode-se classificar como contato direto (Figura 3.1), onde ocorre mistura de massa dos fluidos através do contato entre si, ou indireto (Figura 3.2), onde os fluidos são separados entre si por paredes sólidas, não ocorrendo assim o contato direto entre os fluidos envolvidos, sendo esse talvez o modelo mais comum e utilizado em aplicações indústrias (Bohorquez, 2014).

Figura 3.1 – Contato direto.	Figura 3.2 – Contato indireto.
	
Fonte: Bohorquez, 2014.	Fonte: Bohorquez, 2014.

Referente ao tipo de construção, pode-se separar o mesmo em três grandes grupos de permutadores, sendo esses: Duplo tubo, casco e tubo e placas (Araújo, 2002).

De forma simplificada, os permutadores duplos tubos são compostos por duplos tubos em seu interior, separando os fluidos de trabalho entre tubos concêntricos. Um fluido escoava através do tubo menor, enquanto o outro escoava através do espaço formado entre o tubo menor e o tubo maior. Esse tipo de permutador permite ainda o arranjo de dois tipos de escoamentos já definidos anteriormente: escoamento paralelo e contracorrente (Araújo, 2002).

Os autores Bergman e Lavine (2019) diferenciam o permutador de configuração tubular com o permutador casco e tubo. Esse, por sua vez, se dispõe de diversos tubos que estão dispostos dentro de uma carcaça, de forma a fazer a transferência de calor entre um fluido que escoava dentro dos tubos com outro fluido escoando entre o espaço vazio da carcaça com os tubos.

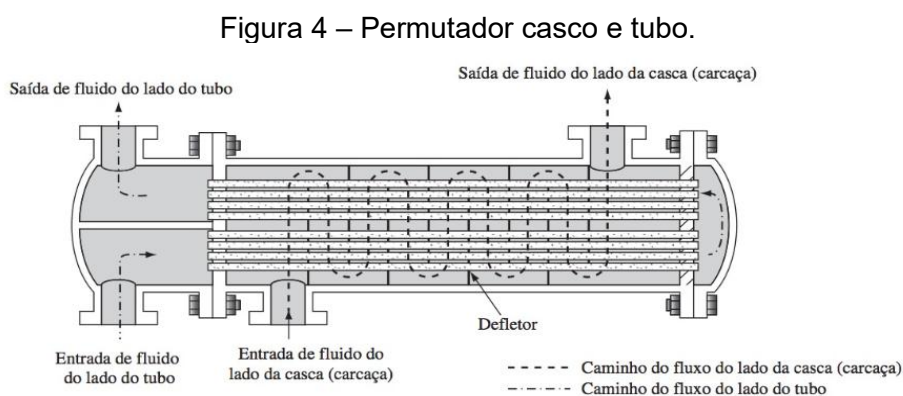
2.2.1 PERMUTADOR TIPO CASCO E TUBO

Talvez esse seja o tipo mais utilizado em processamentos industriais e químicos, pela sua construção e pelo seu rendimento na transferência de calor. Nesse equipamento sua construção é descrita da seguinte maneira: Um fluido é forçado ao escoamento longitudinal e internamente em diversos tubos dispostos ao longo do permutador, em quantidades aos quais dependem do projeto, de maneira a causar um fluxo de entrada e saída nos bocais de sucção e recalque do permutador.

Outro fluido é forçado ao escoamento no sentido transversal aos tubos internos do permutador e não no sentido longitudinal, pois é possível alcançar um coeficiente de transferência de calor melhor quando o fluido é escoado em tal sentido, aumentando o poder da convecção forçada.

Para se permitir esse tipo de escoamento cruzado, são dispostos defletores, também conhecido como chicanas, ao longo dos tubos para realizarem a divisão e não permitirem um fluxo no sentido longitudinal do equipamento, além de servirem como suporte aos tubos e evitarem assim vibrações indesejadas (Araújo, 2002).

A Figura 4 apresenta o modelo construtivo de um permutador casco e tubo com defletores e um passe no casco e dois passes no tubo.



O coeficiente de transferência de calor depende não só do espaçamento dos tubos, da velocidade de escoamento do fluido e das propriedades do fluido, mas depende também do espaço e do formato dos defletores.

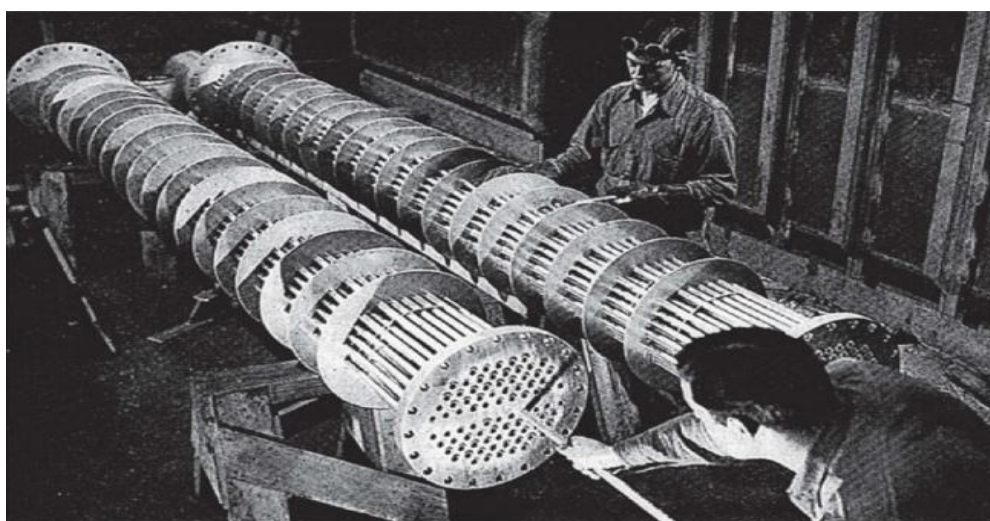
Outra coisa a ser considerada são as perdas de cargas que ocorrem com os vazamentos entre os furos dos defletores para a passagem dos tubos, e entre o

encontro dos defletores com a parte interna da carcaça do permutador, demonstrado na Figura 5. Por ser muito complexo dimensionar essa perda, utiliza-se a aproximação dos resultados encontrados multiplicados por 0,6 em consideração dos vazamentos e desvios encontrados (Kreith; Manglik; Bohn, 2014).

Outro ponto a ser observado é o tipo de fluido que será utilizado e o tamanho que o equipamento ocupará, bem como seu peso final após a construção, pois como fluidos gasosos possuem um poder de convecção inferior quando comparados a fluidos líquidos, é necessário aumentar de forma significativa a área de contato de transferência térmica, o que pode resultar em um equipamento que não seja viável financeiramente ou que não se enquadre no projeto inicial (Kreith; Manglik; Bohn, 2014).

A Figura 5 demonstra a parte interna de um permutador, composto pelo conjunto de tubos e defletores.

Figura 5 – Feixe de tubo do trocador de calor com defletores.



Fonte: Kreith, 2014.

Na Figura 5 é possível observar que os defletores assumem um papel importante no processo de direcionamento e controle do fluxo do fluido na carcaça. Além disso, as chicanas, juntamente com as chapas de tubo na extremidade, permitem o alojamento de vários tubos em seu interior, que é chamado de feixe de tubos, mantendo os tubos na posição correta de projeto e diminuindo ao máximo o vazamento entre os tubos e os furos de fixação nas chicanas e chapas de tubo (Janna, 2016).

2.3 BALANÇO ENERGÉTICO

Para a realização do cálculo do balanço energético, é necessário utilizar propriedades dos fluidos com base nas temperaturas de entrada e saída, nas capacidades térmicas e nos valores das vazões mássicas, adotando que não haja mudança de fases e que a capacidade térmica seja constante ao longo da troca térmica (Coelho, 2016).

Tendo isso em vista, aplica-se a primeira lei da termodinâmica para o cálculo do fluxo de calor termodinâmico, representados pelas Equações 1 e 2, para o cálculo do fluxo de calor do fluido quente e frio respectivamente.

	$Qq = \dot{m}q \cdot Cpq \cdot (Tq,ent - Tq,sai)$	(1)
	$Qf = \dot{m}f \cdot Cpf \cdot (Tf,ent - Tf,sai)$	(2)

Em que:

\dot{m} - Vazão mássica do fluido (kg/s)

Cp - Capacidade térmica do fluido

T - Temperatura

Os subscritos q e f significam as fontes quentes e frias respectivamente e os subscritos *ent* e *sai* significam entrada e saída respectivamente.

2.4 FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DA MÉDIA LOGARÍTMICA (LMTD)

As temperaturas dos fluidos não são constantes ao longo de toda área de troca térmica do permutador, fazendo assim com que a razão do fluxo de calor varie ao longo do percurso do fluido no permutador. Isso ocorre devido a variação pontual das temperaturas quentes e frias nas seções de encontro (Çengel; Ghajar, 2012).

Para calcular a taxa de transferência de calor, é necessário encontrar a média logarítmica da diferença de temperaturas (LMTD) dos fluidos que percorrem o permutador. Há diferença entre o método para encontrar o LMTD, conforme o arranjo estrutural do equipamento (Souza, 2013). Para permutadores de arranjo contracorrente, o LMTD é dado por:

$LMTD = \frac{(T_{q,ent} - T_{f,sai})(T_{q,sai} - T_{f,ent})}{\ln[(T_{q,ent} - T_{f,sai}) / (T_{q,sai} - T_{f,ent})]}$	(3)
--	-----

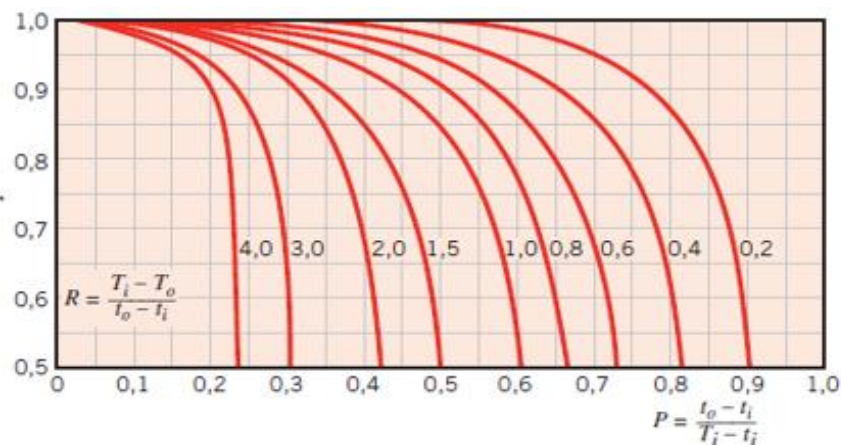
O uso do LMTD padrão é restrito a utilização de trocadores paralelos e contracorrentes com um passe no casco ou no tubo (Souza, 2013).

Para trocadores de calor mais complexo, com arranjos com vários passes na carcaça e tubo ou trocadores que apresentam arranjo de feixes cruzados, com fluidos misturados ou não, se faz necessário a aplicação de um fator de correção Ft para modificar a equação de derivação média de temperatura, pois calculá-la se torna uma tarefa muito complexa, sendo facilitada pela aplicação do fator de correção (Bergman; Lavine, 2019).

A Equação 4 demonstra a aplicação desse fator de correção na equação da média logarítmica e a Figura 6 apresenta o gráfico para obtenção do fator de correção para permutadores com escoamento cruzado.

$\Delta T_{médio} = LMTD * Ft$	(4)
--------------------------------	-----

Figura 6 - Fator de correção para um trocador de calor de escoamento cruzado, com único passe, com um fluido misturado e o outro não misturado.



Fonte: Bergman; Lavine, 2019.

Os valores de P e R são constantes que são definidas pelas temperaturas de entrada e saída dos fluidos. Os subscritos T_i e T_o se referem aos valores de

temperatura de entrada e saída no casco respectivamente, e os subscritos t_i e t_o se referem os valores de temperatura de entrada e saída no tubo respectivamente (Bergman; Lavine, 2019).

A Equação 5 corrige o fluxo de calor para um permutador de fluxo cruzado.

$Q = U * A * \Delta T_{m\u00e9dio}$	(5)
-------------------------------------	-----

Em que:

U : Coeficiente global de transferência de calor

$\Delta T_{m\u00e9dio}$: Valor corrigido da diferença logar\u00edtmica para permutadores de fluxo cruzado

A : \u00c1rea estimada de troca t\u00e9rmica

2.5 C\u00c1LCULO DA EFICI\u00caNCIA

A efici\u00eancia de trocador de calor ξ pode ser definida realizando uma rela\u00e7\u00e3o simples entre a taxa de transfer\u00eancia de calor real do equipamento com um valor m\u00e1ximo poss\u00edvel de transfer\u00eancia de calor, considerando que essa troca seja realizada em uma \u00e1rea infinita de trocador de calor de configura\u00e7\u00e3o contracorrente.

Para essa, considera-se que a temperatura de sa\u00edda do fluido quente alcan\u00e7a na troca t\u00e9rmica o mesmo valor da temperatura de entrada do fluido frio, ou seja, essa analogia compara a taxa real moment\u00e2nea com a maior taxa poss\u00edvel, limitante pela segunda lei da termodin\u00e2mica, configurando assim a energia m\u00e1xima dispon\u00edvel ao equipamento. O fluido que apresentar menor coeficiente de capacidade t\u00e9rmica, ter\u00e1 uma maior varia\u00e7\u00e3o em suas temperaturas iniciais e finais (Welty; Rorrer; Foster, 2017).

A Equa\u00e7\u00e3o 6 mostra como o c\u00e1lculo de efici\u00eancia est\u00e1 relacionada com as temperaturas e coeficientes calor\u00edficos dos flu\u00eddos.

$\varepsilon = \frac{C_q(T_{q,ent} - T_{q,sai})}{C_{min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})}$	(6)
---	-----

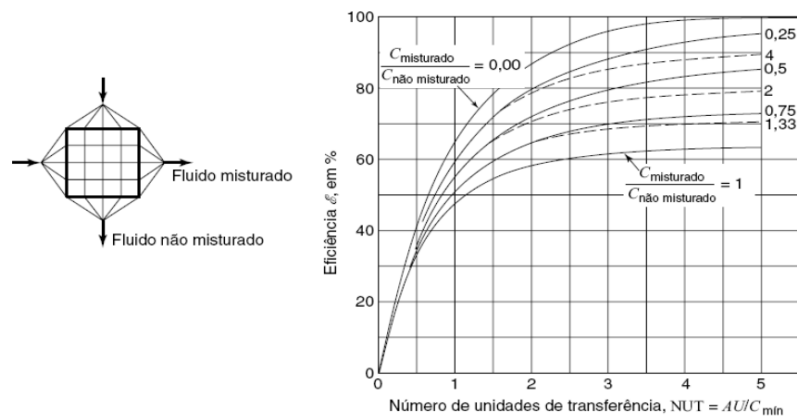
Em que:

C_q : Relação entre \dot{m} e C_p do fluido quente.

C_{min} é o menor valor entre as relações de \dot{m} e C_p dos fluidos quentes e frios.

Para trocadores de fluxo cruzado, sua eficiência pode ser estimada por um gráfico de eficiência definido, que é apresentada pela Figura 7, relacionando o número de NUT com as relações dos coeficientes caloríficos dos fluidos (Welty; Rorrer; Foster, 2017).

Figura 7 - Trocador de calor para um dos fluxos não misturados.



Fonte: Welty (2017).

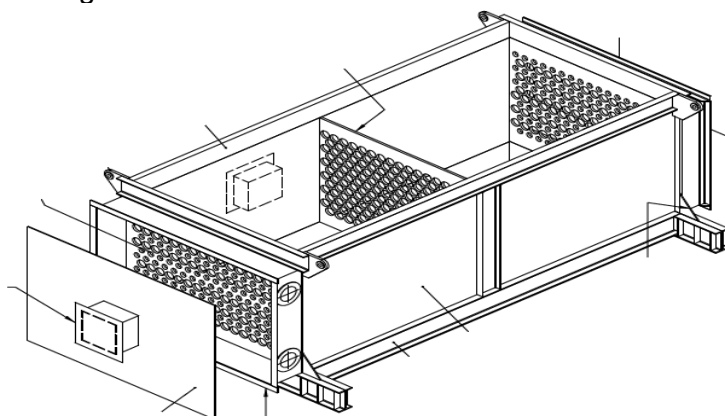
Com a Figura 7 é possível verificar que o valor da eficiência é alterado pela variação do número de NUT e pela relação dos coeficientes dos fluidos misturados e não misturados, representados aqui pelos fluidos no interior e exterior dos tubos, sendo que qualquer um deles pode assumir ambos papeis, dependendo da construção do trocador de calor (Welty; Rorrer; Foster, 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Para obtenção do estudo proposto, foi utilizado um permutador de calor do tipo feixes de tubos com casco retangular e dimensões de 4,25 metros de comprimento por 2,0 metros de altura e 2,0 metros de largura. Essa configuração é apresentada pela Figura 8 que demonstra a vista isométrica do equipamento para compreensão da disposição do feixe de tubos e construção física do equipamento (Documento Interno, 2020).

Figura 8 - Vista Isométrica do trocador de calor.



Fonte: Documento interno da empresa

A Figura 8 demonstra que seu interior é multitubular, pois é percorrido por 17 tubos de 2" de diâmetro externo, sendo que cada tubo executa 12 passes no casco, totalizando assim 204 tubos para troca térmica, que estão dispostos ao escoamento dos gases de entrada em fluxo cruzado, representado pela Figura 2.3.

Cada tubo possui 4.100 metros de comprimento para troca térmica, totalizando 846 metros de tubulação no permutador. Os tubos possuem aletas circulares, com altura de 13mm e estão dispostas com um perfil de 188 aletas a cada metro de tubo, dispostas ao permutador aproximadamente 157.000 aletas. Somando-se as áreas das aletas e a área exposta do tubo externo, tem-se uma área de aproximadamente 607 m² (Documento Interno, 2020).

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO DE ESTUDO

Por se tratar de um sistema real, sendo esse já desenvolvido e implantado, foi realizado um estudo de caso para o entendimento real do problema, como ele funciona e o porquê de sua implantação. Isso pode ser visto por Yin (2014, p.4) que mostra que o estudo de caso é uma modalidade muito utilizada quando se colocam questões do tipo “por que” ou “como”, que são situações onde o pesquisador não possui controle sobre os eventos que ocorrem em algum contexto da vida real.

Gil (2017, p.34) ressalta que a utilização do estudo de caso vem crescendo por diferentes propósitos, tais como: “exploração de situações da vida real, descrição do contexto ao qual está sendo realizada a investigação, formulação de hipóteses ou teorias e explicar variáveis causais que determinam fenômenos complexos que não poderiam ser explicados através de experimentos”.

O tipo de pesquisa realizada teve como objetivo explicar, de forma teórica e prática, o assunto abordado. Para isso, estudos do tipo descritivo e explicativos foram utilizados. Para Gil (2017, p.26) pesquisas do tipo descritivas são importantes, pois “explicam as características de determinado fenômeno, relacionando variáveis”. Já a pesquisa explicativa identifica fatores determinantes que ocorrem nos fenômenos estudados. É o tipo de pesquisa mais profunda, que aproxima o conhecimento da realidade, pois tem o objetivo de explicar causas e motivos, sendo esse o estudo mais complexo a ser realizado, devido aos erros que possam ser cometidos.

A natureza da pesquisa possui característica qualitativa e quantitativa, ou seja, o enfoque de pesquisa é mista, pois o objetivo é explorar e medir os fenômenos que ocorrem no estudo em campo. Para isso, foram coletados dados de variáveis importantes no processo.

O conceito de coleta de dados pode ser melhor entendido por Sampieri, Collado e Lucio (2013, p.31):

A coleta de dados se fundamenta na medição (medimos as variáveis ou os conceitos contidos nas hipóteses). Essa coleta é realizada quando utilizamos procedimentos padronizados ou aceitos por uma comunidade científica. Para que uma pesquisa seja crível e aceita por outros pesquisadores, temos de demonstrar que esses procedimentos foram seguidos. Como nesse enfoque o que se pretende é medir, os fenômenos estudados devem conseguir ser observados ou se referir ao “mundo real”. Como os dados são produtos de medições, eles são representados por números (quantidades) e devem ser analisados com métodos estatísticos.

As variáveis mensuradas nesse experimento foram fundamentais no cálculo de rendimento do fluxo de calor e eficiência do equipamento, dentre elas: temperatura de entrada e saída dos gases no permutador, temperatura de entrada e saída do óleo térmico e vazão mássica de ambos os fluidos.

A coleta dos dados do modelo teórico de projeto foi obtida através da folha de dados do equipamento, utilizando documentação interna da empresa, que é caracterizada como uma fonte primária de informação. Nela contém informações essenciais do desenvolvimento dos projetos iniciais na aplicação do equipamento.

Esses dados foram tratados e apresentados conforme Figura 8 da sessão resultados e discussões. Já para o modelo experimental proposto por esse trabalho, os dados foram coletados de forma experimental por observação participante, que é caracterizada como uma pesquisa exploratória, com o intuito de formulação de problemas, desenvolvimento de hipóteses, familiaridade do pesquisador com o fenômeno e capacidade de entendimento dos conceitos observados, pois há a participação direta do pesquisador com o ambiente do problema de pesquisa, sendo possível a manipulação de variáveis para controle dos fatores pertinentes (Marconi; Lakatos, 2017). As variáveis foram registradas e avaliadas através de instrumentos industriais instalados nos locais de interesse do equipamento, sendo seus dados analisados e tratados, conforme a Tabela 1 e 2 da sessão resultados e discussões.

3.3 DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para avaliação das temperaturas de entrada e saída dos fluidos, foram utilizados termo resistores, que são elementos primários do tipo transdutores, ou seja, elementos que sentem uma variável física e se modificam conforme essa variável se altera, concedendo um sinal de saída resultante. Após concedido o sinal, esse é enviado a um TIT (Temperature indicator transmitter) que é um instrumento transmissor e indicador de temperatura, que interpreta esse sinal, demonstrando quantitativamente o valor dessa variável em valor digital, além de transmitir um sinal de comando de saída para uma interface CLP/Supervisório (Bega, 2011).

Para a vazão mássica do óleo, foram utilizadas placas de orifício, como elementos primários, que restringem a passagem do fluido, diminuindo sua velocidade e criando uma diferença de potencial de pressão na entrada e saída, que sendo medido e interpretado representa a vazão do fluido (Fialho, 2013). O sinal

gerado pela placa de orifício é enviado a um FIT (Flow indicator transmitter), que é um instrumento transmissor e indicador de vazão, o qual interpreta o sinal e quantifica o valor da variável em um display digital, além de transmitir um sinal de comando para uma interface CLP/Supervisório (Alves, 2010).

Para os gases exaustos, não havia, no momento da coleta experimental, instrumentos instalados para medição da vazão, pois o mesmo só foi implementado no momento da coleta de dados dos projetos iniciais. Portanto, os valores experimentais de vazão mássica dos gases exaustos foram calculados aplicando a equação de balanço energético, igualando as Equações 1 e 2 para obtenção da mesma.

Todo o trabalho tem embasamento teórico para explicar os efeitos que ocorrem em um permutador de calor e aproximá-lo ao estudo de caso proposto. Essas informações foram obtidas através de fontes secundárias de pesquisa tais como: Livros, artigos científicos, monografias, dissertações e publicações online encontradas em sites acadêmicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DADOS DOS PROJETOS

Para a análise de desempenho do permutador de calor no pré-aquecimento do óleo térmico, foi realizado uma comparação entre o projeto inicial de operação do equipamento e os valores obtidos de forma experimental por esse trabalho. O equipamento foi projetado com base em duas possibilidades de aplicação na planta, sendo essas as aplicações mais comuns, baseadas em estudos realizados pelo corpo de engenharia da companhia.

Para o primeiro projeto, foram utilizados dados médios dos gases exaustos pelo processo de compressão do gás de Golfinho. Nesse projeto, foram considerados os valores de vazão nominal dos gases exaustos da turbina e da vazão do óleo necessária para atender a demanda de troca térmica das plantas de processamento de gás natural de Golfinho. Os valores nominais desse projeto estão dispostos na Figura 9 abaixo pela folha de dados do equipamento.

Figura 9 - Folha de dados do equipamento do caso Golfinho.

TÍTULO:		UNIDADES RECUPERADORAS DE CALOR									
GERAL											
EQUIPAMENTO: UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE CALOR											
SERVIÇO: PRÉ-AQUECIMENTO DO ÓLEO TÉRMICO											
CASO OPERACIONAL: GÁS DE GOLFINHO (NOTA 2)											
TIPO:		VERTICAL				NÚMERO DE UNIDADES:			06 (NOTA 1)		
DESEMPENHO POR UNIDADE - RENDIMENTO, kW 5600.00											
CONFIG. (CASCO)		NA	SÉRIE	NA	PARALELO	INSTALAÇÃO:		X	VERTICAL	HORIZONTAL	INCLINADO
CONFIG. (TUBO)		NA	SÉRIE	NA	PARALELO						
CONDIÇÕES OPERACIONAIS (NOTA 2)											
						LADO DO CASCO			LADO DO TUBO		
						ENTRADA		SAÍDA	ENTRADA		SAÍDA
FLUIDO:						GÁS EXAUSTO (NOTA 3)			ÓLEO TÉRMICO (NOTA 4)		
VAZÃO		TOTAL (kg/h)				84600			120000		
		VAPOR (kg/h)				84600		84600	-		-
		ÓLEO TÉRMICO (kg/h)				-		-	120000		120000
TEMPERATURA (°C)						430		220 (NOTA 11)	142		209
PRESSÃO DE ENTRADA MEDIDA (kPa)						(NOTA 3)			15400 (NOTA 12, 13)		

Fonte: Próprios autores, 2023.

Para o segundo caso, foram utilizados dados médios dos gases exaustos pelo processo de compressão do gás de Peroá. Nesse projeto, foram considerados os valores de vazão nominal dos gases exaustos da turbina e da vazão do óleo necessária para atender a demanda de troca térmica das plantas de processamento de gás natural de Peroá.

Os valores nominais desse projeto estão dispostos na Figura 10 abaixo pela folha de dados do equipamento.

Figura 10 – Folha de dados do equipamento do caso Peroá.

TÍTULO:		UNIDADES RECUPERADORAS DE CALOR									
GERAL											
EQUIPAMENTO: UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE CALOR DESPERDIÇADO (WHRU)											
SERVIÇO: PRÉ-AQUECIMENTO DO ÓLEO TÉRMICO											
CASO OPERACIONAL: GÁS DE PEROÁ (NOTA 2)											
TIPO:		VERTICAL				NÚMERO DE UNIDADES:			06 (NOTA 1)		
DESEMPENHO POR UNIDADE - RENDIMENTO, kW 3429.00											
CONFIG. (CASCO)		NA	SÉRIE	NA	PARALELO	INSTALAÇÃO:		X	VERTICAL	HORIZONTAL	INCLINADO
CONFIG. (TUBO)		NA	SÉRIE	NA	PARALELO						
CONDIÇÕES OPERACIONAIS (NOTA 2)											
						LADO DO CASCO			LADO DO TUBO		
						ENTRADA		SAÍDA	ENTRADA		SAÍDA
FLUIDO:						GÁS EXAUSTO (NOTA 3)			ÓLEO TÉRMICO (NOTA 4)		
VAZÃO		TOTAL (kg/h)				56000			145600		
		VAPOR (kg/h)				56000		56000	-		-
		ÓLEO TÉRMICO (kg/h)				-		-	145600		145600
TEMPERATURA (°C)						430		220 (NOTA 11)	183		215,6
PRESSÃO DE ENTRADA MEDIDA (kPa)						(NOTA 3)			15500 (NOTA 12, 13)		

Fonte: Próprios autores, 2023.

Em ambos os projetos houve a estimativa da potência gerada pelos equipamentos ligados aos casos operacionais específicos, observando que ocorreu a mudança de desempenho entre as unidades devido as diferentes características de vazão e temperatura dos fluídos considerados no projeto.

4.2 DADOS EXPERIMENTAIS

Para os valores experimentais, foram coletados os dados necessários para estimar o rendimento do equipamento solicitado no momento da operação de compressão do gás de golfinho. Os dados foram coletados através dos instrumentos industriais descritos na metodologia desse trabalho.

Para os experimentos 1 e 2, foram realizadas três medições em tempo real, obtendo os dados necessários para os cálculos.

Os valores encontrados estão relacionados nas Tabelas 1 e 2, sendo que para determinar a vazão mássica do fluído quente, foram efetuadas estimativas através da igualdade entre as Equações 1 e 2 de balanço energético, motivo esse informado na metodologia de pesquisa.

Tabela 1 – Dados referente ao experimento 1.

Experimento 1					
Fluido quente			Fluido frio		
Vazão mássica (Kg/h)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Vazão mássica (Kg/h)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
102.600,00	498,5	229,2	166.320,00	152	225
102.600,00	498,73	229,69	168.120,00	152,2	225,12
102.600,00	499	229,7	169.560,00	152,21	225,2

Fonte: Próprios autores, 2023.

Tabela 2 – Dados referente ao experimento 2.

Experimento 2					
Fluido quente			Fluido frio		
Vazão mássica (Kg/h)	Temperatura de entrada	Temperatura de saída	Vazão mássica (Kg/h)	Temperatura de entrada	Temperatura de saída
97.992,00	467,56	219,35	166.644,00	149,73	213,37
98.028,00	467,58	219,51	167.184,00	149,73	213,38
98.064,00	467,71	219,66	168.660,00	150	213,4

Fonte: Próprios autores, 2023.

Utilizando os valores dos experimentos 1 e 2, calculou-se a média logarítmica de temperatura para um permutador de fluxo cruzado, utilizando as premissas de correlação entre as Equações 3 e 4 com a Figura 6, para obter o valor corrigido da média logarítmica.

Dispondo desse dado, efetuou-se o cálculo do fluxo de transferência de calor do equipamento, ou seja, o seu desempenho energético, aplicando os conceitos da Equação 5.

Obtendo o fluxo de calor e isolando a incógnita U , nessa equação, obtém-se o valor do coeficiente global de transferência global de calor, que mede o valor efetivo de transferência de calor entre os fluidos por meio das paredes dos tubos dispostos em seu interior. Os valores encontrados estão descritos nas Tabelas 3 e 4 abaixo.

Tabela 3 – Resultado dos cálculos referente ao experimento 1.

Experimento 1		
Fluxo de calor (KW)	Média logarítmica de temperatura	Coefficiente global de transferência de calor (W)
8772,58	144,33	100,14
8764,11	144,58	99,87
8772,58	144,64	99,92

Fonte: Próprios autores, 2023.

Tabela 4 – Resultado dos cálculos referente ao experimento 2.

Experimento 2		
Fluxo de calor (KW)	Média logarítmica de temperatura	Coefficiente global de transferência de calor
7722,42	132,55	95,98
7720,90	132,67	95,88
7723,12	132,61	95,94

Fonte: Próprios autores, 2023.

Para o cálculo da eficiência do equipamento, utilizou-se a Equação 6 para encontrar a eficiência em contracorrente e compará-la com os valores encontrados de fluxo cruzado, através da análise realizada na compilação de Welty da Figura 7.

Assim, foram encontrados os valores de eficiência dos projetos e experimentos representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de eficiência dos projetos e experimentos.

Comparações	Eficiência contracorrente	Eficiência fluxo cruzado
Projeto 1	85,02%	83,00%
Projeto 2	75,69%	73,00%
Experimento 1	77,67%	74,00%
Experimento 2	78,07%	74,00%

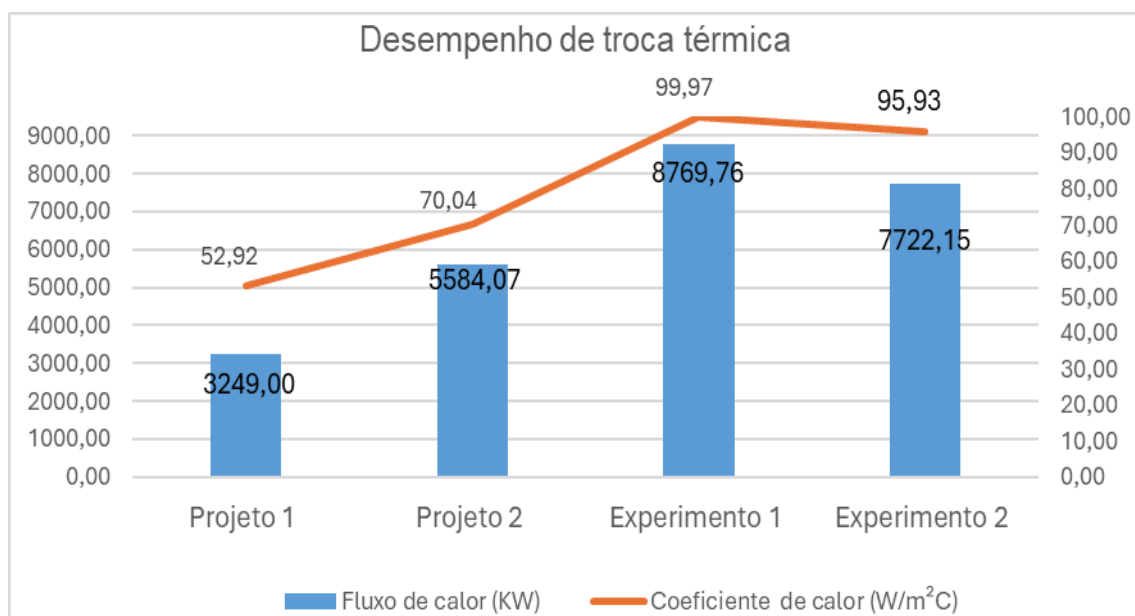
Fonte: Próprios autores, 2023.

4.3 AVALIAÇÕES DAS TROCAS ENERGÉTICAS DOS PROJETOS E EXPERIMENTOS

Realizando uma relação entre os valores de projeto e os valores experimentais, bem como o cálculo do coeficiente global de transferência de calor de ambas as situações, pode-se verificar que a transferência de calor do equipamento está diretamente ligada com a vazão mássica e temperatura do gás, pois esta é a fonte quente da troca térmica e que o fluxo de calor do equipamento sofre modificação conforme se alteram essas variáveis.

De igual maneira, o coeficiente global de transferência de calor é modificado conforme se altera a capacidade do fluxo de calor que o permutador transfere. Relacionando os valores médios obtidos dessas duas variáveis, nas tabelas acima, é possível verificar no Gráfico 1 o comportamento da variação do coeficiente global de transferência de calor com a variação do desempenho energético dos projetos e experimentos.

Gráfico 1 - Desempenho energético.



Fonte: Próprios autores, 2023.

O Gráfico 1 mostra que os valores de transferência térmica alcançados nos experimentos são maiores que os projetados. Isso pode ser explicado pelo

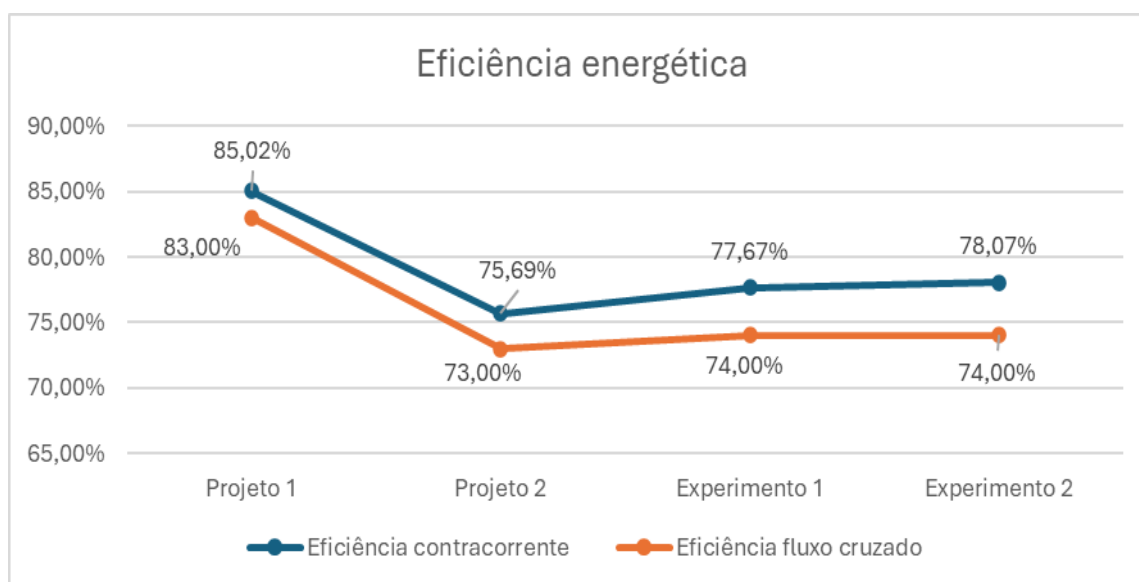
desempenho da turbina a gás, responsável pela exaustão dos gases quentes, que operava acima da carga calculada de ambos os projetos.

No experimento 1, onde houve a maior transferência de calor e temperatura final do óleo, a turbina operava próximo de sua totalidade disponibilizada pelo fabricante, no valor de 102.900,00 Kg/h e 500°C a exaustão dos gases.

4.4 AVALIAÇÕES DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS DOS PROJETOS E EXPERIMENTOS

Para melhor análise das comparações dos valores de eficiência do permutador nas duas configurações de fluxo e a visualização do seu comportamento, com base nas situações de aplicação, utilizou-se o Gráfico 2 para representar sua variação ao longo dos experimentos realizados. O Gráfico 2 demonstra a eficiência do sistema em cada projeto.

Gráfico 2 - Eficiência energética do sistema.



Fonte: Próprios autores, 2023.

É possível verificar que conforme o valor do fluxo de calor aumenta, o rendimento do equipamento também aumenta de forma sucinta. Entretanto, mais importante do que o fluxo de calor é a diferença de temperatura inicial e final que o permutador deve oferecer ao fluido frio.

Isso pode ser observado comparando os resultados da eficiência do projeto 1 com os demais. Mesmo sendo a situação que se demanda menos energia térmica das comparações realizadas, essa necessitava de menor diferença de temperatura inicial e final do óleo, com um ΔT (Diferença de temperatura) de 32 °C, sendo que as demais configurações exigiam um ΔT de 64 °C ou mais.

Além disso, a configuração contracorrente se mostrou pouco mais eficiente do que a cruzado. Isso é compreensível, visto que as perdas de cargas consideradas pela configuração cruzada são consideradas nos fatores de correção apresentados nesse trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esse trabalho, pode-se verificar que o rendimento apresentado pelo permutador em operação foi satisfatório, atendendo as premissas iniciais mínimas do projeto. Além disso, relacionando esses dados, percebe-se que o rendimento do equipamento empregado no momento dos experimentos superava o rendimento teórico do projeto.

Isso foi possível devido a operação da turbina estar muito acima do valor nominal do projeto, o que aumentou consideravelmente a vazão mássica do fluido quente, confirmando que a quantidade de fluxo de calor ofertado por um permutador está diretamente ligada ao valor de vazão mássica do fluido quente, considerando que não haja mudança de fase do fluido, conforme apresentado pelas referências teóricas.

Além disso, foi verificado que a eficiência do sistema é proporcional ao fluxo de calor empregado pelo equipamento, mas o fator determinante da eficiência é a menor diferença de temperatura necessária concedida ao óleo térmico para atender a demanda operacional.

Percebe-se que os valores obtidos de temperatura final do óleo superavam os de projeto, pois no modelo de Golfinho, que era o modelo determinante, a temperatura final do óleo era de 209°C. Já no experimento 1, onde foi obtido maior potência entregue pelo permutador, a temperatura final do óleo era de 229°C.

Obtendo esses valores e relacionando com a necessidade térmica da planta, pode-se concluir que não era necessário realizar uma carga térmica final do óleo nos

fornos aquecedores, superando em muito o projeto que visava apenas um pré-aquecimento do óleo, para que por fim houvesse a carga final nos fornos.

Com isso, os fornos ficaram apenas em Standy-By, caso fosse necessário realizar a parada da turbina de forma programada ou por manutenção corretiva, o que gerou não só apenas economia na quantidade de gás processada nos bicos injetores dos fornos para aquecimento do mesmo, mas também gerou economia nos gases que eram exaustos pelos fornos, contribuindo assim para um sistema mais ecologicamente sustentável.

Como o sistema proposto atuava em temperatura elevada, torna-se difícil mensurar, com exatidão, as propriedades caloríficas dos fluidos, além da volatilidade elevada das temperaturas no decorrer do processo de troca térmica, onde foi necessário trabalhar com aproximações para os cálculos realizados.

Como melhoria para futuras análises, pode-se trabalhar com fluidos tabelados e em temperaturas mais usuais, para que essas propriedades não sofram mudanças drásticas e possam ser extraídas por tabelas de bibliografias conhecidas, para uma melhor exatidão dos cálculos realizados.

Trabalhar com permutadores que possibilitem a mudança no tipo de escoamento do fluido da carcaça, alternando entre escoamentos cruzados, contracorrentes e paralelos, proporcionarão análises interessantes a serem discutidas para compreensão da mudança do rendimento e da eficiência do equipamento com a variação do tipo de escoamento.

6 REFERÊNCIAS

ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, controle e automação de processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

ARAUJO, Everaldo Cesar da Costa. **Trocadores de calor**. São Paulo: EdUFSCar, 2002.

BARROS JUNIOR, Joaquim Luiz. Integração de utilidades, recuperação de calor e cogeração em sistemas de aquecimento de fluido térmico. **Konus**. Disponível em: http://www.konus.com.br/public/uploads/artigos/_542a377fbd2e4.pdf. Acesso em: 30 maio. 2020.

BAUER, Wolfgang; WESTFALL, Gary D.; DIAS, Hélio. **Relatividade, oscilações, ondas e calor**. São Paulo: AMGH, 2013.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BOHORQUEZ, Washington Orlando Irrazabal. Aula 23 - Trocadores de calor. **UFJF**. Disponível em: http://www.ufjf.br/washington_irrazabal/files/2014/05/Aula-23_Trocadores-de-Calor.pdf. Acesso em: 1 jun.2020.

ÇENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4.ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

COELHO, João Carlos Martins. **Energia e fluídos: Transferência de calor**. 3.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2016.

COSTA, Roberto Luiz. **Redução de custos: na empresa líder de soluções em informática LTDA**. Projeto de graduação em administração – FPL. Minas Gerais, 2012. Disponível em: https://www.fpl.edu.br/2018/media/pdfs/graduacao/tcc/2012/tcc_roberto_luiz_costa_2012.pdf. Acesso em: 1 jun. 2020.

DAITX, Maximiliano Soares. **A viabilidade de implementação das melhores práticas de redução de custos em micro, pequenas e médias empresas no Rio Grande do Sul**. Projeto de graduação em administração – UFRGS. Rio Grande do Norte, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29624/000768782.pdf?sequence=1>. Acesso em: 1 jun. 2020.

DOCUMENTO INTERNO. **Memorial descritivo da unidade recuperadora de calor**. 2020.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Instrumentação industrial: Conceitos, aplicações e análises**. 7. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2013.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

JANNA, William S. **Projetos de sistemas fluidotérmicos**. 4. Ed. São Paulo: Cengage Learning , 2016.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de transferência de calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

KOLOSQUE, Everton. Fluido térmico orgânico NSF HT1, para transferência de calor é uma opção vantajosa para indústria alimentícia. **Klueber**. Disponível em: https://www.klueber.com/ecomaXL/get_blob.php?name=Fluido_de_transferencia_de_calor.pdf. Acesso em: 31 mai. 2020.

LOPES, Patrícia Beatriz dos Santos. **Estudo de um permutador de calor para aplicação em sistemas de recuperação de energia térmica**. Dissertação em engenharia automível - IPL. Leiria, 2013. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/61799241.pdf>. Acesso em: 31 mai. 2020.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de Pesquisa**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

MORAN, Michael J. et al. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

SAMPIERI, Roberto Hernández; COLLADO, Carlos Fernández; LUCIO, Maria Del Pilar Baptista. **Metodologia de pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: PENSO. 2013.

SOUZA, Monique Silveira. **Análise térmica de um trocador de calor do tipo casco e tubos para resfriamento do resíduo de uma unidade de destilação atmosférica**. Projeto de graduação em engenharia mecânica - UFRJ. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9972/1/monopoli10007837.pdf>. Acesso em: 31 maio. 2020.

TROCADOR DE CALOR **Trocador de calor**. Disponível em: <<http://www.trocadordecalor.com.br/trocador-de-calor>>. Acesso em: 31 maio. 2020.

WELTY, James R.; RORRER, Gregory L.; FOSTER, David G. **Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.