

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CARLOS DANIEL GAIDEX

**A INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE
UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2019**

CARLOS DANIEL GAIDEX

**A INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE
UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Gabriel Nunes Maia Junior

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

A INFLUÊNCIA DA MANUTENÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS

por

CARLOS DANIEL GAIDEX

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 5 de julho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Me. Gabriel Nunes Maia Junior
Orientador

Prof. Dr. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**

Coordenador do Curso

“ A única certeza do planejamento é que as coisas nunca ocorrem como foram planejadas. ”

(COSTA, Lúcio. 27/02/1902 – 13/06/1998)

RESUMO

GAIDEX, Carlos Daniel. **A influência da manutenção no desempenho térmico de um trocador de calor de placas**. 2019. 69 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo analisar o efeito da manutenção no trocador de calor de placas e verificar seu desempenho através da comparação da transferência de calor. A metodologia adotada na quantificação da transferência de calor é através do Balanço de Energia e Efetividade-NUT (Número de Unidade de Transferência). Para a realização da manutenção no trocador de calor foi utilizada a NBR 13971:2014 e informações contidas em catálogos, para os testes experimentais. Quanto aos objetivos da pesquisa, o experimento integra a assimilação da problemática com estudos bibliográficos para complementação, sendo considerada uma pesquisa exploratória. O estudo foi conduzido no Laboratório Didático de Ciências Térmicas do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa. Os testes realizados no trocador de calor de placas foram em escoamento contracorrente, com três variações na vazão do fluido quente, três variações na vazão do fluido frio e com quatro variações na temperatura do reservatório. O resultado alcançado foi o aumento na transferência de calor em ambos os métodos aplicados para o cálculo, com um aumento médio geral de 5.1%, comprovando o efeito da manutenção corretiva não programada.

Palavras-chave: Trocador de calor de placas. Manutenção. Transferência de calor. Balanço de Energia. Efetividade-NUT.

ABSTRACT

GAIDEX, Carlos Daniel. **The influence of maintenance on the thermal performance of a plate heat exchanger**. 2019. 69 sheets. Work Course Conclusion (Bachelor of Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

This Work Course Conclusion had the objective analyzing the effect of the maintenance on the plate heat exchanger and verifying its performance by comparing the heat transfer. The methodology used in the quantification of the heat transfer is through the Energy Balance and Effectiveness-NTU (Number of Transfer Unit). To perform the maintenance in the heat exchanger was used the NBR 13971: 2014 and information contained in catalogs, for the experimental tests. Regarding the objectives of the research, the experiment integrates the assimilation of the problematic with bibliographic studies for complementation, being considered an exploratory research. The study was conducted in the Didactic Laboratory of Thermal Sciences of the Academic Department of Mechanics of UTFPR / Campus Ponta Grossa. The tests performed on the plate heat exchanger were in countercurrent flow, with three variations in the flow of the hot fluid, three variations in the flow of the cold fluid and four variations in the temperature of the reservoir. The result was the increase in heat transfer in both methods applied for the calculation, with an overall average increase of 5.1%, proving the effect of non-programmed corrective maintenance.

Keywords: Plate heat exchanger. Maintenance. Heat transfer. Energy Balance. Effectiveness-NTU.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Desenvolvimento de camada-limite fluidodinâmica laminar em um tubo circular.....	14
Figura 2. Desenvolvimento de camada-limite térmica em um tubo circular aquecido..	16
Figura 3. Escoamento turbulento no interior das placas.....	17
Figura 4. Balanços de energia globais para os fluidos quentes e frio de um trocador de calor com dois fluidos.....	20
Figura 5. Trocador de calor do tipo placas.....	23
Figura 6. Arranjo tipo U do trocador de calor.....	23
Figura 7. Exemplificação da placa e do fluxo de um trocador de calor.....	24
Figura 8. Tipos de manutenção.....	25
Figura 9. Equipamento EDIBON.....	28
Figura 10. Unidade de abastecimento.....	28
Figura 11. Módulo de aquisição e controle de dados.....	29
Figura 12. Trocador de calor de placas.....	30
Figura 13. <i>Software (Uncertainty Calculator)</i>	34
Figura 14. Desmontagem parcial.....	43
Figura 15. Decorrência da limpeza.....	44
Figura 16. Aparência da solução.....	44
Figura 17. Vazamento após limpeza.....	45
Figura 18. Comprimento original total.....	45
Figura 19. Linha lateral.....	46
Figura 20. Condição da placa.....	46
Figura 21. Placa limpa.....	47
Figura 22. Vazamento após manutenção.....	47

Figura 23. Formato gaxeta.....	48
Figura 24. Material da gaxeta artesanal.....	48
Figura 25. Resultado final gaxeta artesanal.....	49
Figura 26. Corrosão das placas.....	49
Figura 27. Parafusos originais.....	50
Figura 28. Comprimento final total.....	50
Figura 29. Trocador de calor em operação.....	51

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1. Representação dos fatores de deposição.....	19
Tabela 2. Sequência de realização de testes.....	35
Tabela 3. Identificação dos sensores.....	36
Tabela 4. Temperaturas aferidas.....	36
Tabela 5. Propriedades dos fluidos.....	37
Tabela 6. Resultados balanço de energia.....	39
Tabela 7. Resultados efetividade-NUT.....	40
Tabela 8. Comparação entre métodos.....	41
Tabela 9. Sequência de realização de testes.....	52
Tabela 10. Temperaturas aferidas.....	53
Tabela 11. Propriedades.....	54
Tabela 12. Resultados balanço de energia.....	55
Tabela 13. Resultados efetividade-NUT.....	56
Tabela 14. Comparação entre métodos.....	57
Tabela 15. Comparativo balanço de energia.....	59
Tabela 16. Comparativo efetividade-NUT.....	61
Gráfico 1. Comparativo antes da manutenção.....	42
Gráfico 2. Comparativo depois da manutenção.....	58
Gráfico 3. Comparativo balanço de energia do fluido quente.....	60
Gráfico 4. Comparativo balanço de energia do fluido frio.....	60
Gráfico 5. Comparativo efetividade – NUT.....	62

LISTA DE SIGLAS

DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
NUT	Número de Unidades de Transferência
PG	Ponta Grossa
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Capacidade calorífica a pressão constante [J/kgK]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
i	Entalpia [J/kg]
D	Diâmetro dos tubos [m]
k	Condutividade térmica [W/mK]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
Nu	Número de <i>Nusselt</i>
q	Taxa total de transferência de calor [W]
R	Razão entre as temperaturas
R''_d	Fator de deposição
Re	Número de <i>Reynolds</i>
T	Temperatura do fluido [K]
$X_{fd,h}$	Comprimento de entrada fluidodinâmico [m]
$X_{fd,t}$	Comprimento de entrada térmico [m]

Letras gregas

β	Ângulo das ranhuras da placa do trocador de calor
ε	Efetividade
ρ	Massa específica [kg/m ³]
ΔT	Variação de temperatura [K]

Subscritos

ent	Entrada
f	Frio
máx	Máximo
mín	Mínimo
m	Médio
q	Quente
sai	Saída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 CONSIDERAÇÕES FLUIDODINÂMICAS	14
2.2 CONSIDERAÇÕES TÉRMICAS	15
2.3 FATOR DE INCRUSTAÇÃO (FATOR DE DEPOSIÇÃO)	18
2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO BALANÇO DE ENERGIA	19
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA EFETIVIDADE-NUT	21
2.6 TROCADORES DE CALOR	22
2.7 MANUTENÇÃO	24
3 METODOLOGIA	27
3.1 EQUIPAMENTO	27
3.2 TROCADOR DE CALOR DE PLACAS	29
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
3.4 PROCEDIMENTO DOS CÁLCULOS	31
3.4.1 Balanço de Energia	31
3.4.2 Método de Efetividade-NUT	31
3.5 MANUTENÇÃO	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 ANTES DA MANUTENÇÃO	35
4.1.1 Propriedades	37
4.1.2 Transferência de Calor pelo Balanço de Energia	38
4.1.3 Transferência de Calor pela Efetividade-NUT	40
4.1.4 Comparação Entre os Valores	41
4.2 MANUTENÇÃO	42
4.3 DEPOIS DA MANUTENÇÃO	51
4.3.1 Propriedades	53
4.3.2 Transferência de Calor pelo Balanço de Energia	54
4.3.3 Transferência de Calor pela Efetividade-NUT	56
4.3.4 Comparação Entre os Valores	57
4.4 COMPARATIVO ANTES/DEPOIS MANUTENÇÃO	58
4.4.1 Balanço de Energia	59
4.4.2 Efetividade-NUT	61
5 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65
ANEXO A	67

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros trocadores de calor que se têm conhecimento pela humanidade eram simplesmente rochas colocadas na fogueira. Essas rochas armazenavam o calor do fogo e eram postas dentro das cabanas e tendas para aquecer o seu interior sem ter problemas de causar incêndio.

O calor perdido pelo fogo era capturado pela rocha e transferido para o interior das residências.

Com o passar dos anos, o uso dos trocadores de calor foi mais intensificado e largamente difundido com o advento das máquinas a vapor na primeira Revolução Industrial, com início na Inglaterra na segunda metade do século XVIII, sendo conhecida como a era do carvão e do ferro. Logo mais, sucedeu a era do aço e da eletricidade em 1860 na segunda Revolução Industrial (HOBBSAWM, 2015).

Os trocadores de calor de placas foram introduzidos na década de 30 principalmente na indústria alimentícia pelo fato de serem facilmente limpos e alcançaram a sua maturidade de projeto na década de 60 (KAKAÇ, 2012).

O desenvolvimento da geometria das placas, forma de montagem, e o melhoramento dos materiais de vedação, aumentaram as possibilidades de aplicação deste aparelho, em casos até que faz a substituição meticulosa dos trocadores de calor tubulares (KAKAÇ, 2012).

Por definição temos os trocadores de calor como:

“ Dispositivos que promovem a transferência de energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Estes dispositivos são usados em diversas aplicações, como a produção de energia, processamento, indústria química e alimentícia, indústria de transformação, condicionamento de ar, refrigeração, etc (KAKAÇ et al., 2012). “

A limpeza desses trocadores de calor é muito importante para a continuidade do processo de transferência de calor de qualidade, pois evita a incrustação de partículas do fluido nas placas, a corrosão das mesmas e a contaminação do produto que circula no equipamento.

A manutenção é relativamente simples, são seguidos determinados procedimentos contidos em documentos e manuais nos quais são fundamentados em normas, porém requer cuidados na sua montagem para que opere em conformidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os trocadores de calor são importantes nas indústrias, assim como para o aprendizado didático na área de transferência de calor nas instituições de ensino. Até hoje não foi investigado a influência da manutenção no trocador de calor de placas do Laboratório Didático de Ciências Térmicas do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Campus Ponta Grossa que é de suma relevância para o conhecimento acadêmico e preparação do corpo discente para o mercado de trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente o efeito da manutenção em um trocador de calor de placas, sob diferentes condições de operação em escoamento contracorrente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar testes no aparato experimental sem manutenção e com manutenção;
- Determinar a taxa total de transferência de calor pelo Balanço de Energia;
- Determinar a taxa total de transferência de calor pelo Método ϵ -NUT;
- Comparar os resultados experimentais obtidos sob as condições de operação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

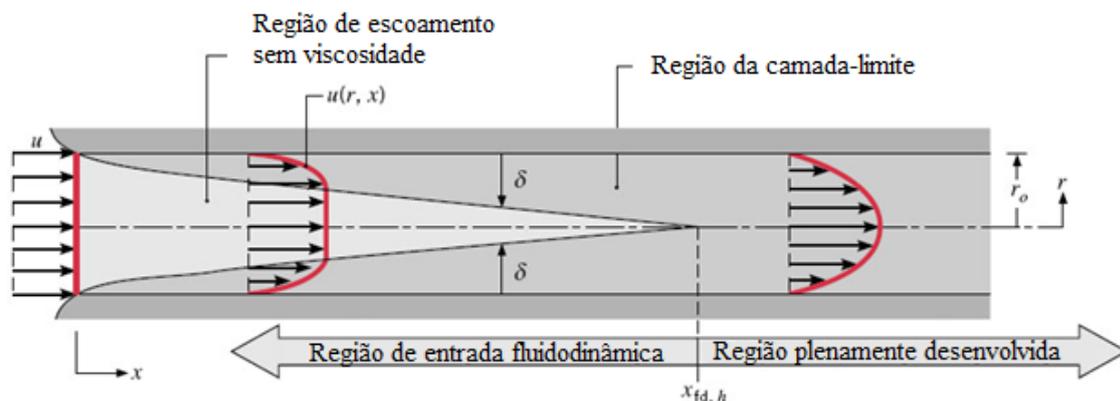
Com o intuito de uma compreensão mais eficaz a respeito dos trocadores de calor deve-se preliminarmente averiguar as considerações realizadas para a convecção no escoamento interno.

2.1 CONSIDERAÇÕES FLUIDODINÂMICAS

Para o escoamento interno, a camada-limite cresce conforme o fluido escoar por toda a extensão do tubo, ou seja, a velocidade do fluido é variável na região de entrada. A partir do momento em que o perfil de velocidade se torna constante na região transversal, pode-se dizer que o escoamento está completamente desenvolvido e a distância entre esse ponto com o ponto de entrada é denominado comprimento de entrada fluidodinâmico ($x_{fd,h}$) (INCROPERA, 2011).

A Figura 1 mostra como a camada-limite evolui e o formato parabólico do perfil de velocidades na região plenamente desenvolvida.

Figura 1. Desenvolvimento de camada-limite fluidodinâmica laminar em um tubo circular



Fonte: Incropera (2011) p. 308

O conhecimento do número de *Reynolds* (Re_D) é relevante para realizar o cálculo do comprimento de entrada fluidodinâmico ($x_{fd,h}$). O (Re_D) é um número adimensional que classifica o regime de escoamento do fluido em laminar ou turbulento.

O escoamento laminar interno acontece quando as partículas do fluido se movem ao longo de sua trajetória de forma definida, na configuração de lâminas ou

camadas. O seu número é $Re_D \leq 2300$ e o $(x_{fd,h})$ pode ser ponderado através da Equação 1 (PRITCHARD, 2011; INCROPERA, 2011).

$$x_{fd,h} \approx 0,05DRe_D \quad (1)$$

O escoamento interno é turbulento quando as partículas do fluido não se movem de forma ordenada, ou seja, descrevem trajetórias irregulares. O seu número é $Re_D \geq 10000$ e o $(x_{fd,h})$ é apurado pela Equação 2 (PRITCHARD, 2011; INCROPERA, 2011).

$$10D \leq x_{fd,h} \leq 60D \quad (2)$$

Dentre essas duas regiões tem o que é chamado de região crítica, em que o número de *Reynolds* está entre 2300 e 10000.

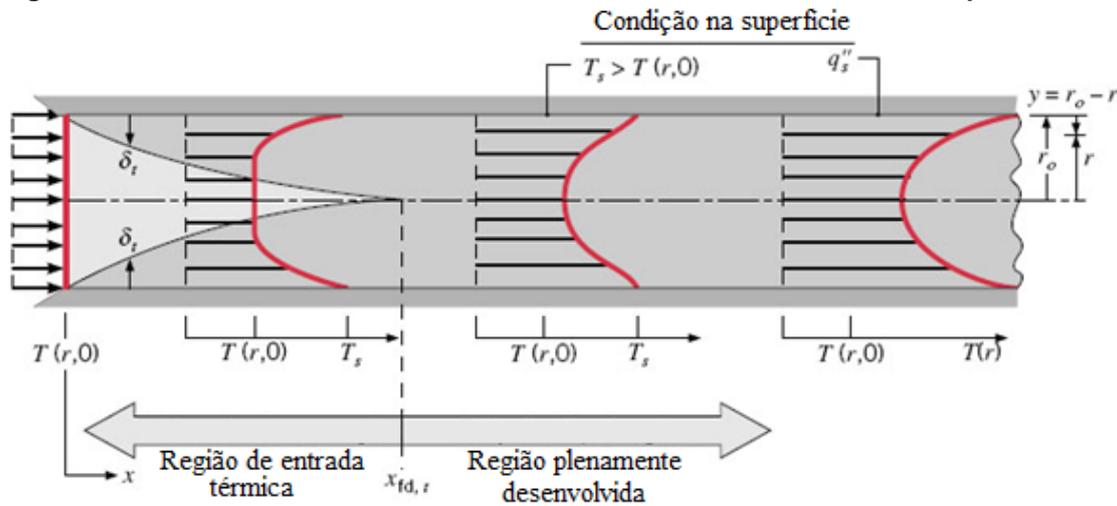
2.2 CONSIDERAÇÕES TÉRMICAS

A partir do momento que foram delimitadas as considerações fluidodinâmicas, subsequentemente é feita a identificação das considerações térmicas na camada-limite.

Se o fluido adentra no tubo à uma temperatura uniformemente menor que a da superfície, ocorre transferência de calor por convecção e dá-se o início do alargamento da camada-limite térmica até chegar na região completamente desenvolvida (INCROPERA, 2011).

A extensão entre a entrada e a parte termicamente desenvolvida é chamado de comprimento de entrada térmico $(x_{fd,t})$, que é representado na Figura 2.

Figura 2. Desenvolvimento de camada-limite térmica em um tubo circular aquecido



Fonte: Incropera (2011) p. 311

O $x_{fd,t}$ para o escoamento laminar e turbulento pode ser demonstrado respectivamente pela Equação 3 e 4:

$$x_{fd,t} = 0,05DRe_DPr \quad (3)$$

$$x_{fd,t} \leq 10D \quad (4)$$

As circunstâncias do escoamento interno influenciam na variação do fluxo térmico, com isso, o coeficiente convectivo (h) também se altera ocasionando a necessidade de aplicar um coeficiente convectivo médio. Esse coeficiente convectivo depende das propriedades físicas do fluido, tais como temperatura e da condição física que ele se encontra (INCROPERA, 2011).

Esse valor pode ser empregado na Equação 5 para obtenção do Número de *Nusselt* (Nu) médio e por consequência, a taxa total de transferência de calor por intermédio da Lei de Resfriamento de *Newton*.

O Número de *Nusselt* representa fisicamente a razão entre a transferência de calor por convecção e a condução.

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k_f} \quad (5)$$

Em que \bar{h} é o coeficiente convectivo médio, D é o diâmetro do tubo circular e k_f é a condutividade térmica do fluido manipulado.

Para os valores de *Nusselt*, possuem diversas analogias empíricas no qual consegue extrair o coeficiente convectivo médio. As propriedades termofísicas empregadas nessas analogias são fundamentadas nas temperaturas médias de entrada e de saída, como mostra a Equação 6 (INCROPERA, 2011).

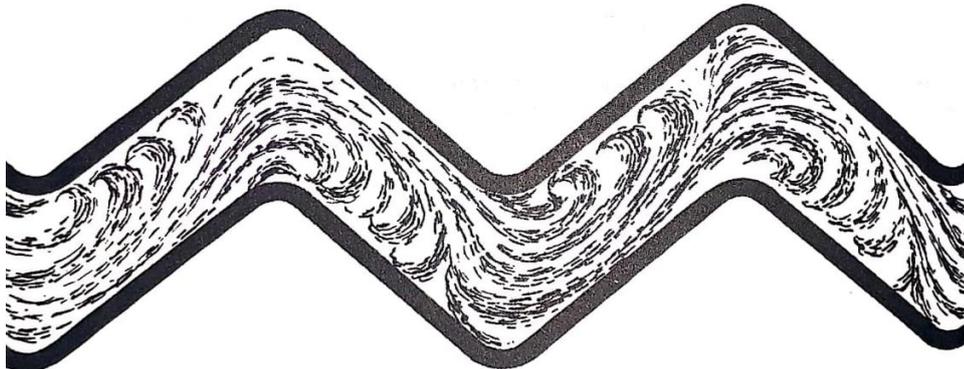
$$T_m = \left(\frac{T_{m,ent} + T_{m,sai}}{2} \right) \quad (6)$$

A fim de dar continuidade aos cálculos, a utilização de equações específicas para cada tipo de trocador de calor e cada tipo de escoamento interno se faz necessária.

No caso do trocador de calor de placas, os cálculos dos números de *Reynolds* e de *Nusselt* são necessários apenas quando se deseja projetar um novo equipamento ou quando demanda descobrir algum parâmetro oculto, como temperatura de saída do fluido, área da troca de calor, comprimento total do aparelho.

Isso simplifica a análise e também diminui os parâmetros com incertezas a serem calculados, a Figura 3 esclarece como acontece o escoamento dentro deste tipo de trocador de calor.

Figura 3. Escoamento turbulento no interior das placas



Fonte: Kakaç (2012) p. 464

O escoamento interno é considerado turbulento por toda a sua extensão devido as ranhuras das placas com a intenção de que ocorra a transferência de calor máxima (KAKAÇ, 2012).

2.3 FATOR DE INCRUSTAÇÃO (FATOR DE DEPOSIÇÃO)

O desempenho dos trocadores de calor se prejudicam com o passar do tempo, pois ocorrem depósitos de impurezas dos fluidos em sua superfície e esses sedimentos diminuem sensitivamente a transferência de calor, aumentando a resistência (INCROPERA, 2011).

Um exemplo mais comum a respeito de incrustações são os sais minerais contidos na água, que com o passar do tempo aderem as paredes do encanamento, diminuindo a vazão do fluido.

Por isso que na indústria a água é extremamente tratada e filtrada antes de ser permitida a sua circulação pela planta industrial, afim de evitar o acúmulo desses sedimentos na tubulação e equipamentos (ÇENGEL, 2012).

O efeito da incrustação é levado em conta nos cálculos de transferência de calor através da introdução de uma resistência térmica adicional, na qual é chamada de fator de deposição (R''_d) (INCROPERA, 2011).

Esse fator tende a crescer com o passar do tempo quando a velocidade do escoamento é baixa e a temperatura de funcionamento do equipamento é muito alta (ÇENGEL, 2012).

A Tabela 1 representa os valores das resistências do fator de deposição para alguns tipos de fluidos.

Tabela 1. Representação dos fatores de deposição

Fluido	R'_d [m².K/W]
Água destilada, água marinha, águas fluviais e água de alimentação tratada para caldeira (abaixo de 50°C).	0,0001
Água destilada, água marinha, águas fluviais e água de alimentação tratada para caldeira (acima de 50°C)	0,0002
Água de rio (abaixo de 50°C)	0,0002-0,0001
Óleo combustível	0,0009
Líquidos de refrigeração	0,0002
Vapor d'água (sem arraste de óleo)	0,0001
Vapor de refrigeração	0,0004
Vapores de álcool	0,0001
Ar	0,0004

Fonte: Çengel, 2012. p. 636.

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO BALANÇO DE ENERGIA

Aplicando o balanço de energia, pode-se determinar a temperatura média que varia conforme o seu comprimento. Então é relacionado o comprimento com a taxa total de transferência de calor, na qual é importante para calcular e projetar o desempenho de um trocador de calor (INCROPERA, 2011).

Para que seja possível calcular esse desempenho, é aplicado o balanço global de energia no trocador de calor no fluido frio e quente. Esse balanço leva em

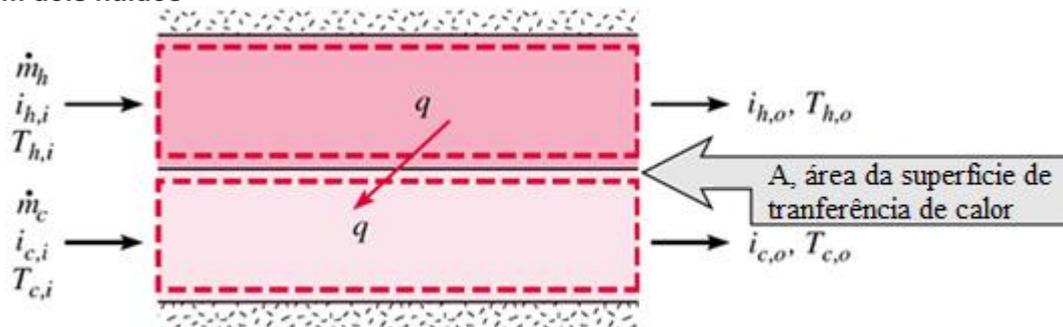
consideração que o trocador de calor se encontra isolado do ambiente externo, de maneira que a troca de calor só ocorra entre os fluidos.

As variáveis \dot{m} é a vazão mássica [kg/s], i é a entalpia [kJ/kg] e T é a temperatura [K].

O fluxo térmico obedece a segunda lei da termodinâmica, em que o fluido de maior temperatura perde calor para o fluido de menor temperatura, ocorrendo esta troca até as duas temperaturas se igualarem.

Na Figura 4 é visto este tipo de troca através da perda de calor do fluido localizado na parte superior da imagem, enquanto quem recebe calor é o fluido localizado na parte inferior.

Figura 4. Balanços de energia globais para os fluidos quente e frio de um trocador de calor com dois fluidos



Fonte: Incropera (2011) p. 428

Considerar que as mudanças nas energias potenciais e cinéticas são desprezíveis, os calores específicos, coeficiente global de transferência de calor e a condução ao longo das placas do trocador também são constantes, com isso as Equações 7 e 8 do balanço de energia são expostas (INCROPERA, 2011):

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (7)$$

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,ent} - T_{f,sai}) \quad (8)$$

Assim, (q) é a taxa de transferência de calor, (c_p) é o calor específico a pressão constante [J/(kg.K)], os subíndices q significam fluido quente, f fluido frio, ent significa entrada e sai significa saída. As temperaturas que aparecem nas expressões são temperaturas dos fluidos no local indicado.

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA EFETIVIDADE - NUT

O método da efetividade por número de unidades de transferência é mais apropriado porque não há a necessidade de muitas iterações, portanto, um método mais prático. Calcula-se a taxa de transferência de calor de maneira distinta, porém com maior aplicabilidade entre os trocadores de calor (INCROPERA, 2011).

É conceituado por um parâmetro adimensional que adquire o nome de efetividade de transferência de calor (ε), que exprime a divisão entre a taxa de transferência de calor real pela máxima, através da Equação 9 (KAKAÇ, 2012).

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{real}}}{q_{\text{máx}}} \quad (9)$$

Considera-se R a taxa de capacidade de calor. Com esse valor é possível classificar essas capacidades através da Equação 10 (KAKAÇ, 2012).

$$R = \frac{(T_{q,\text{ent}} - T_{q,\text{sai}})}{(T_{f,\text{sai}} - T_{f,\text{ent}})} \quad (10)$$

Sabendo que (C_f) e (C_q) são as taxas de capacidade térmica dos fluidos frio e quente respectivamente, para se ter a transferência de calor máxima possível, é necessário identificar a diferença de temperatura do fluido quente para o fluido frio na entrada do trocador de calor (KAKAÇ, 2012).

Considera-se que $C_{\text{mín}}$ assume o valor do fluido frio quando o R é menor que 1, e que o $C_{\text{mín}}$ adquire o valor do fluido quente quando R maior que 1.

Com o valor de $R < 1$: $C_q = C_{\text{máx}}$ e $C_f = C_{\text{mín}}$.

Com o valor de $R > 1$: $C_q = C_{\text{mín}}$ e $C_f = C_{\text{máx}}$.

As Equações 11 e 12 representam o Número de Unidades de Transferência (KAKAÇ, 2012).

$$NUT_q = \frac{T_{q_2} - T_{q_1}}{\Delta T_m} \quad (11)$$

$$NUT_f = \frac{T_{f_2} - T_{f_1}}{\Delta T_m} \quad (12)$$

Onde no dividendo encontra-se a diferença das temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio, enquanto que no divisor tem-se a média dos deltas de temperatura dos fluidos.

Para um escoamento contracorrente para um trocador de calor de placas, as Equações 13 e 14 são as duas principais equações que regem a efetividade NUT (KAKAÇ, 2012):

$$\varepsilon = \frac{\exp\left[\left(1 - C_{\text{mín}}/C_{\text{máx}}\right)NUT_{\text{mín}}\right] - 1}{\exp\left[\left(1 - C_{\text{mín}}/C_{\text{máx}}\right)NUT_{\text{mín}}\right] - C_{\text{mín}}/C_{\text{máx}}} \quad (13)$$

$$NUT_{\text{mín}} = \frac{\ln\left[\left(1 - C_{\text{mín}}/C_{\text{máx}}\right)/(1 - \varepsilon)\right]}{\left(1 - C_{\text{mín}}/C_{\text{máx}}\right)} \quad (14)$$

Com isso, a Equação 15 mostra como obter a taxa de transferência de calor real.

$$q_{\text{real}} = \varepsilon C_{\text{mím}}(T_{\text{q,ent}} - T_{\text{f,ent}}) \quad (15)$$

2.6 TROCADOR DE CALOR

Realizar o processo de troca de calor entre fluidos que se encontram em temperaturas diferentes através de um obstáculo, impedindo que se misturem, isto é a função de um trocador de calor. Mas isso depende da forma como foi projetado.

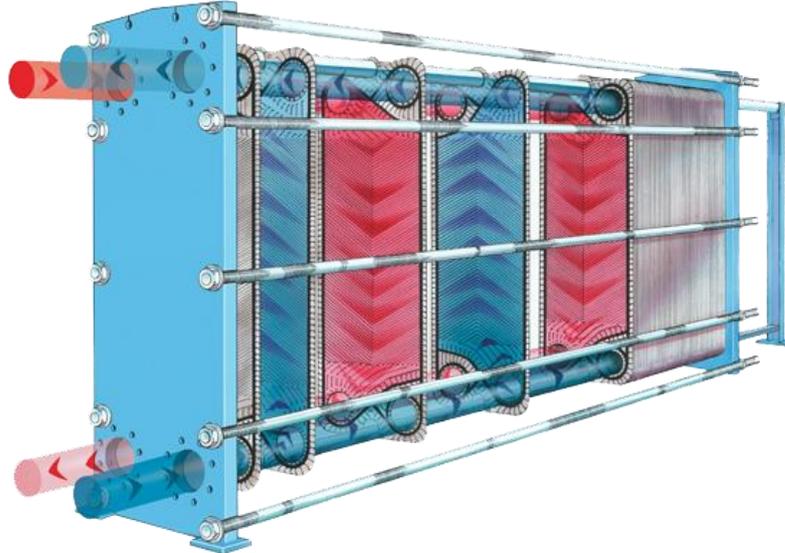
Segundo Incropera et al. (2011), a classificação dos trocadores de calor é de acordo com a configuração de escoamento e do tipo de construção. No que se refere ao tipo de escoamento temos o paralelo, o contracorrente, o cruzado, o misturado e o não-misturado e quanto ao tipo de construção tem-se: trocador de calor de tubos concêntricos, de jaqueta, escoamento cruzado, casco e tubos, compacto e do tipo placas.

Na composição do tipo placas, no qual é o trocador de calor utilizado nesta pesquisa, existe basicamente um maço de placas metálicas finas e onduladas, que

são comprimidas entre si através de um suporte. Entre as placas são usadas as gaxetas, compostas por elastômeros, para vedar e formar os canais de escoamento pelos quais os fluidos frio e quente circundam alternadamente, trocando calor por meio do contato das placas metálicas.

Na Figura 5 tem um exemplo de trocador de calor do tipo placas.

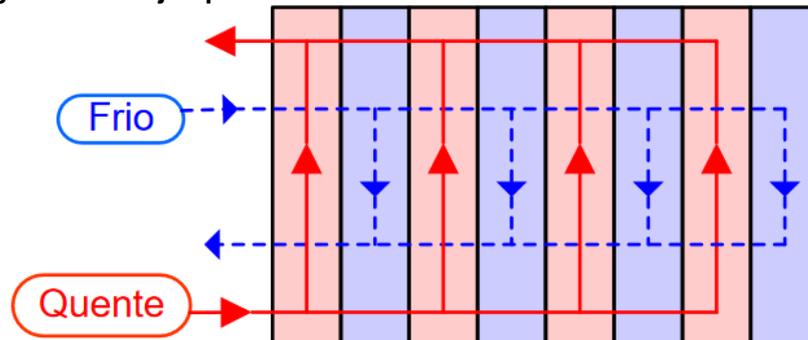
Figura 5. Trocador de calor do tipo placas



Fonte: Tranter (2011) p. 2

O que justifica o fluxo alternado entre quente e frio deste trocador de calor é o tipo de arranjo adotado, que neste caso é o arranjo de escoamento tipo U, como mostra a Figura 6.

Figura 6. Arranjo tipo U do trocador de calor



Fonte: Martelli (2016)

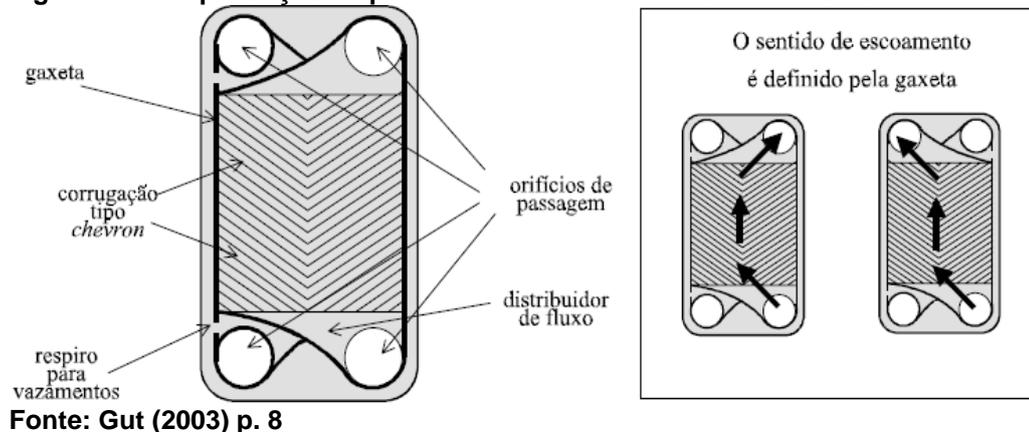
As placas que compõe o equipamento são classificadas como do tipo *Chevron*, fundamentado no ângulo que a corrugação (β) faz nas placas para direcionar melhor o escoamento do fluido e aumentar a área efetiva de contato (KAKAÇ, 2012).

Placas com ângulos maiores tendem a dar mais velocidade ao fluido, ou seja, o fluido adquire maior vazão, enquanto placas com ângulos menores tendem a trocar mais calor, devido à baixa velocidade (GUT, 2003).

O trocador de calor estudado possui placas do tipo *Chevron* com o ângulo de 45° e o fluxo de escoamento na vertical.

O fluxo das placas pode ser no sentido vertical ou diagonal, conforme delimitado pelas gaxetas, conforme a Figura 7.

Figura 7. Exemplificação da placa e do fluxo de um trocador de calor



2.7 MANUTENÇÃO

A manutenção é definida como uma intervenção feita no equipamento de caráter a conferir o pleno funcionamento da máquina, ajustando-a para novas condições de trabalho, sendo necessária ou não a troca de seus componentes (CABRAL, 2006).

As abordagens dos mais variados tipos de manutenção são feitas por CABRAL, KARDEC e VIANA, entretanto pode-se listar 5 tipos de manutenção no qual podem ser classificados como: manutenção corretiva, preventiva, detectiva, preditiva e engenharia da manutenção.

A manutenção corretiva acontece quando o equipamento apresenta um certo tipo de falha ou o seu desempenho não corresponde com o desejado. Esse tipo ainda se subdivide em não planejada e planejada. A não planejada é o reparo da falha de modo aleatório, enquanto que na planejada é feita com base em histórico da máquina (KARDEC, 2009).

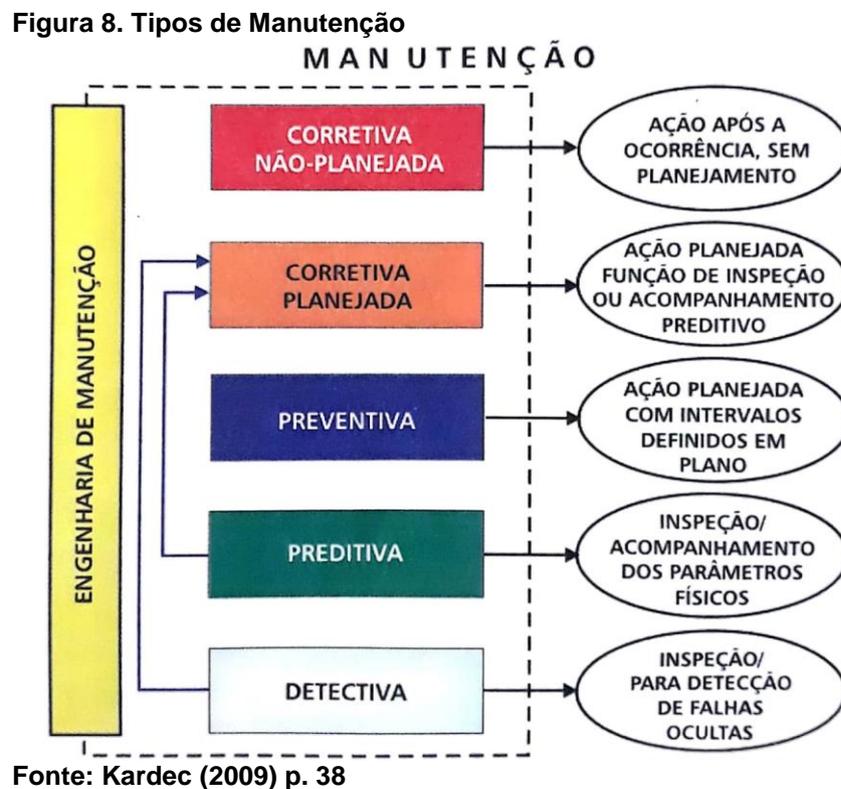
A manutenção preventiva é classificada como um serviço realizado nas máquinas que não apresentam qualquer tipo de falha, com o objetivo de evitar a ocorrência de avarias ou eliminá-las, obedecendo um plano de trabalho em intervalos de tempo predeterminados (VIANA, 2002).

A manutenção detectiva é a utilização de sistemas de proteção, nos quais procuram detectar falhas camufladas, não perceptíveis pelos operadores das máquinas (KARDEC, 2009).

A manutenção preditiva é o monitoramento da máquina através de controle estatístico onde o objetivo é determinar o tempo correto da intervenção, evitando a necessidade de desmontagem para inspeção (VIANA, 2002).

A engenharia da manutenção ou também manutenção centrada na confiabilidade significa uma metodologia de trabalho, destinada a apontar o nível de criticidade de cada equipamento, no qual é a aplicação de todos os conceitos anteriores na melhoria contínua da rotina de trabalho e redução de problemas (CABRAL, 2006).

A Figura 8 a seguir elucida os principais tipos de manutenção.



Pode-se defender a hipótese de que a manutenção realizada neste trocador de calor do laboratório da instituição de ensino foi uma manutenção corretiva não-planejada, pois não há registros de que foram efetuadas intervenções anteriores.

Também se encaixa nesta classificação o fato do trocador de calor apresentar vazamentos em determinadas faixas de atuação, assim, o desempenho não correspondia ao pretendido.

3 METODOLOGIA

A classificação dessa pesquisa é de natureza aplicada, pois envolve a elucidação de um problema em particular. A abordagem do problema é quantitativa, no qual avalia informações e detalha a descrição dos fenômenos observados.

Foi utilizado o Laboratório Didático de Ciências Térmicas do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Campus Ponta Grossa para realização dos testes no trocador de calor de placas.

Quanto aos objetivos da pesquisa, é considerada exploratória, no qual o experimento faz parte da compreensão da problemática e os estudos bibliográficos complementam teoria e prática.

O método utilizado quanto aos procedimentos técnicos é uma pesquisa experimental, pois testa uma relação de causa e efeito de certo fenômeno.

3.1 EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado é um trocador de calor de placas da marca EDIBON, modelo TIPL de número serial TIPL 0041/11 no qual possui para seu funcionamento os aparelhos complementares, também da marca EDIBON, integrados pelo aparato experimental e pelo módulo de aquisição e controle de dados.

O aparato experimental é uma unidade de abastecimento com:

- Um reservatório com capacidade para trinta litros, feito em aço inox;
- Um aquecedor elétrico de três mil watts de potência para o aquecimento do fluido;
- Um termostato com capacidade de setenta graus Celsius;
- Uma bomba centrífuga de capacidade de três litros por minuto.

O sistema em geral conta com mangueiras flexíveis de aço inoxidável para conectar as bancadas de testes, sensores de temperatura do tipo J, rotâmetros para medir a vazão dos fluidos e válvulas esféricas para alterar a direção do escoamento e controlar a vazão.

A Figura 9 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 9. Equipamento EDIBON



Fonte: Autorial Própria

O fluido de trabalho adotado para a parte quente é a água destilada, enquanto que a parte fria é a água corrente vindo da tubulação de rede de abastecimento do município à temperatura ambiente.

A Figura 10 mostra a unidade de abastecimento que abriga o fluido quente no reservatório.

Figura 10. Unidade de abastecimento



Fonte: Autorial Própria

O módulo de aquisição e controle de dados admite o controle da temperatura e vazão do fluido quente, que é armazenado no tanque e permite a leitura das temperaturas nos sensores do tipo J.

A Figura 11 ilustra o módulo com todos os sensores conectados e pronto para o uso.

Figura 12. Trocador de calor de placas



Fonte: Autoria Própria

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos seguem as diretrizes do referido laboratório da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa, no qual existem roteiros de experimentos da disciplina Laboratório de Sistemas Fluidotérmicos (PG0064), conforme o Anexo A, que foram moldados nos padrões constados em manuais técnicos fornecidos pela empresa EDIBON.

Os experimentos práticos seguem alguns protocolos:

- Definir o sentido do fluxo (paralelo/contracorrente) e regular as válvulas de modo a obedecer ao fluxo desejado;
- Checar as conexões e fios dos sensores de temperatura e do módulo de aquisição de dados;
- Verificar o nível do fluido de trabalho no reservatório da unidade de abastecimento;
- Ligar o equipamento na energia elétrica e acionar a bomba centrífuga;
- Estipular a temperatura do reservatório do fluido quente;
- Regular as vazões dos fluidos quente e frio;
- Aguardar as vazões dos fluidos estabilizarem para fazer a coleta de dados necessários, cujo o tempo determinado é de 30 minutos para admitir que os fluxos se encontrem em regime permanente.

Os testes foram executados com escoamento contracorrente com três variações na vazão do fluido quente, três variações na vazão do fluido frio e com quatro variações na temperatura do reservatório. As vazões empregadas foram de 1.0, 1.5 e 2.0 litros por minuto, enquanto que a temperatura foi alterada de 5 em 5 graus Celsius, tendo início em 45°C e fim em 60°C.

Com o intuito de obter maior exatidão nos resultados, os testes foram realizados com pelo menos uma temperatura fixa e variando as suas vazões. Também realizados o maior número de testes no mesmo dia, assim diminuindo as oscilações de medidas das temperaturas do fluido frio.

3.4 PROCEDIMENTO DOS CÁLCULOS

Posteriormente ao recolhimento de dados, foram calculados da taxa total de transferência de calor através da aplicação dos dois métodos: Balanço de Energia e Efetividade-NUT. As propriedades termofísicas foram adquiridas com auxílio da tabela existente no apêndice A da literatura Incropera, et al., 2011. As incertezas experimentais foram calculadas pelo *software Uncertainty Calculator*, encontrado no *site* da instituição *Colby College*.

3.4.1 Balanço de Energia

Com o valor das vazões mássicas calculadas e as propriedades termofísicas dos fluidos determinado no apêndice do livro mencionado, aplica-se estes valores nas Equações 7 e 8 juntamente com os valores encontrados nos sensores de temperatura.

Com isso é encontrado o valor da taxa de transferência de calor para o balanço de energia.

3.4.2 Método de Efetividade – NUT

Para a realização dos cálculos da efetividade-NUT é empregado primeiramente o cálculo da razão da taxa de capacidade calorífica R na Equação 10. Com isso é delimitado qual será o valor da capacidade calorífica mínima.

Posteriormente aplica-se a Equação 11 ou 12, dependendo do valor de R, para obter o valor do número de unidades de transferência (NUT). Com esse valor, a

Equação 13 está completa para poder ser calculado a efetividade de transferência de calor (ϵ).

Por fim, é utilizado a Equação 15 para calcular a taxa de transferência de calor para este método.

3.5 MANUTENÇÃO

O procedimento de manutenção do trocador de calor de placas teve como base a norma da ABNT – NBR 13971:2014 e informações contidas em catálogos de outros fabricantes, garantindo uma manutenção mais detalhada.

Primeiramente, deve-se observar certas informações, como o uso imprescindível do Equipamento de Proteção Individual (EPI), despressurizar e esvaziar o trocador de calor, deixá-lo inativo até que se atinja a temperatura ambiente e averiguar se o material que circula pelo trocador de calor é corrosivo.

Antes de abrir o equipamento é recomendável fazer uma vistoria externa, para observar possíveis pontos de corrosão no suporte ou na base e tratá-los para não afetar o equipamento.

Uma faixa na diagonal do trocador de calor pode ser feita e numerá-las, para melhor identificar a posição das placas, quando montadas nos seus devidos lugares. É importante aferir a dimensão inicial do aparelho, pois, quando montado posteriormente não apresente discrepâncias e venha a causar falhas de funcionamento.

Para abrir o trocador de calor tem que desacoplá-lo do sistema e retirar os parafusos de sua base e do próprio trocador.

Uma análise é feita para checar se é vantajoso fazer a troca da placa ou submeter a peça aos procedimentos elucidados a seguir.

A limpeza das placas é feita num primeiro momento de forma manual com o auxílio de uma escova com cerdas macias e água corrente, para não danificar as ranhuras. Se a incrustação estiver agregada ainda, utilizar uma lavadora de jato de alta pressão, com o jato atingindo a placa verticalmente e cuidando para não danificar as gaxetas. Uma última alternativa é fazer o ataque químico nas placas, monitorando o tempo para não acabar corroendo demais o material que compõe a placa.

Se as gaxetas estiverem ressecadas ou danificadas, a troca é realizada. Entretanto é recomendada a troca de todas as gaxetas para que não ocorra o risco de vazamentos e perda de eficiência do aparelho.

Em seguida o equipamento é montado, delineando as condições de operação do aparelho.

4.1 ANTES DA MANUTENÇÃO

A Tabela 2 apresentada a seguir mostra a sequência de realização dos testes no trocador de calor antes de ser efetuado a manutenção.

Tabela 2. Sequência de realização de testes

Vazão do fluido frio $Q_f = 1,0$ L/min				
Q_q [l/min]	Temperatura do reservatório (ST-16)[°C]			
	45	50	55	60
1	#1	#10	#19	#28
1,5	#2	#11	#20	#29
2	#3	#12	#21	#30
Vazão do fluido frio $Q_f = 1,5$ L/min				
Q_q [l/min]	Temperatura do reservatório (ST-16)[°C]			
	45	50	55	60
1	#4	#13	#22	#31
1,5	#5	#14	#23	#32
2	#6	#15	#24	#33
Vazão do fluido frio $Q_f = 2,0$ L/min				
Q_q [l/min]	Temperatura do reservatório (ST-16)[°C]			
	45	50	55	60
1	#7	#16	#25	#34
1,5	#8	#17	#26	#35
2	#9	#18	#27	#36

Fonte: Autoria Própria

Como exemplo, no caso #12 a temperatura do reservatório é 50°C, a vazão do fluido quente é 2 litros por minuto e a vazão do fluido frio é 1 litro por minuto.

Onde as vazões são idênticas, tanto para o fluido quente quanto para o frio são nos casos: #1, #10, #19 e #28 para 1 litro por minuto; #5, #14, #23 e #32 para 1.5 litros por minuto e #9, #18, #27 e #39 para 2 litros por minuto.

Os testes aconteceram em escoamento contracorrente, no qual foi fixada a temperatura e variada a vazão do fluido quente e frio. Com a variação desses parâmetros foram realizados no total 36 testes.

A Tabela 3 explica a posição de cada sensor de temperatura no aparelho coletor de dados.

Tabela 3. Identificação dos Sensores

ST1[°C]	Entrada fluido quente
ST2[°C]	Saída fluido quente
ST3[°C]	Saída fluido frio
ST4[°C]	Entrada fluido frio
ST16[°C]	Temperatura reservatório

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 4 indica as temperaturas aferidas nos testes com a variação de temperatura no reservatório (ST16) do fluido quente em 45°C, 50°C, 55°C e 60°C em diferentes vazões.

Tabela 4. Temperaturas aferidas

Temperatura do reservatório ST-16 (45°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
ST1[°C]	38	39	40	38	39	40	39	39	38
ST2[°C]	27	31	33	27	30	32	27	29	28
ST3[°C]	33	35	37	32	35	36	31	33	32
ST4[°C]	22	23	23	24	25	25	25	25	23
Temperatura do reservatório ST-16 (50°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18
ST1[°C]	42	43	43	42	42	43	42	42	43
ST2[°C]	29	32	35	27	30	32	26	29	32
ST3[°C]	37	39	41	34	37	38	32	35	37
ST4[°C]	23	23	23	23	23	23	24	25	25
Temperatura do reservatório ST-16 (55°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#19	#20	#21	#22	#23	#24	#25	#26	#27
ST1[°C]	47	48	49	46	47	47	46	47	47
ST2[°C]	32	37	40	32	35	37	30	32	34
ST3[°C]	41	44	46	39	42	44	37	39	41
ST4[°C]	27	29	29	29	29	28	28	28	28
Temperatura do reservatório ST-16 (60°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#28	#29	#30	#31	#32	#33	#34	#35	#36
ST1[°C]	49	51	52	49	49	50	50	50	50
ST2[°C]	31	37	40	28	32	36	28	31	34
ST3[°C]	43	47	49	39	42	45	37	39	42
ST4[°C]	25	25	25	24	24	24	26	26	26

Fonte: Autoria Própria

Nos casos #19 ao #27 dentre os 36 totais, teve o registro das maiores temperaturas advindas do fluido frio, sendo a maior delas 29°C.

Nota-se que nos casos #34, #35 e #36 registraram temperaturas de entrada iguais para ambos os fluidos, modificando apenas a vazão do fluido quente.

4.1.1 Propriedades

Para a resolução dos cálculos mencionados na metodologia, demanda antes de tudo a computação dos valores das propriedades termofísicas dos fluidos de trabalho para cada caso.

A Tabela 5 elucida a representação desses valores.

Tabela 5. Propriedades dos fluidos

CASO	ρ_q [kg/m ³]	ρ_f [kg/m ³]	m_q [kg/s]	m_f [kg/s]	C_{p_q} [J/kg.K]	C_{p_f} [J/kg.K]
#1	994,73	996,27	0,017	0,017	4178,60	4179,50
#2	994,01	995,82	0,025	0,017	4178,30	4179,30
#3	993,49	995,48	0,033	0,017	4178,30	4179,30
#4	994,73	996,17	0,017	0,025	4178,60	4179,10
#5	994,16	995,57	0,025	0,025	4178,40	4178,90
#6	993,64	995,42	0,033	0,025	4178,30	4178,90
#7	994,56	996,26	0,017	0,033	4178,70	4179,00
#8	994,31	995,92	0,025	0,033	4178,50	4178,90
#9	994,63	996,32	0,033	0,033	4178,50	4179,30
#10	993,72	995,48	0,017	0,017	4178,80	4179,30
#11	993,02	995,11	0,025	0,017	4178,60	4179,50
#12	992,53	994,73	0,033	0,017	4178,60	4179,70
#13	993,97	996,02	0,017	0,025	4179,00	4179,30
#14	993,58	995,48	0,025	0,025	4178,70	4179,30
#15	993,02	995,28	0,033	0,025	4178,60	4179,40
#16	994,12	996,17	0,017	0,033	4179,20	4179,10
#17	993,72	995,57	0,025	0,033	4178,80	4178,90
#18	993,02	995,23	0,033	0,033	4178,60	4178,90
#19	992,18	994,18	0,017	0,017	4179,00	4178,90
#20	991,12	993,31	0,025	0,017	4179,20	4179,00
#21	990,37	992,89	0,033	0,017	4179,70	4179,20
#22	992,40	994,31	0,017	0,025	4178,90	4178,50
#23	991,69	993,72	0,025	0,025	4179,00	4178,80
#24	991,34	993,46	0,033	0,025	4179,00	4179,10
#25	992,74	994,83	0,017	0,033	4179,10	4178,40
#26	992,18	994,46	0,025	0,033	4179,00	4178,60
#27	991,88	994,08	0,033	0,033	4179,00	4178,80
#28	991,95	994,06	0,017	0,017	4179,50	4179,50
#29	990,45	993,22	0,025	0,017	4179,80	4179,90
#30	989,66	992,79	0,033	0,017	4180,30	4180,30
#31	992,39	994,96	0,017	0,025	4179,80	4179,30
#32	991,75	994,37	0,025	0,025	4179,40	4179,60
#33	990,89	993,75	0,033	0,025	4179,60	4179,90
#34	992,18	995,08	0,017	0,033	4180,00	4178,70
#35	991,73	994,71	0,025	0,033	4179,70	4178,90
#36	991,24	994,12	0,033	0,033	4179,60	4179,20

Fonte: Autoria Própria

Os valores mencionados na Tabela 5 foram retirados de acordo com a temperatura aferida na entrada e na saída do trocador de calor e feito a média. O livro Incropera (2011) foi escolhido para a densidade e para o calor específico. O cálculo da vazão mássica se deu através de iterações matemáticas com a densidade do líquido.

4.1.2 Transferência de Calor pelo Balanço de Energia

Os resultados do valor da transferência de calor, juntamente com a incerteza, para o método de balanço de energia se encontram na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados balanço de energia

CASO	Q_q	Incerteza	Incerteza	Q_f	Incerteza	Incerteza
	[W]	+ - [W]	[%]	[W]	+ - [W]	[%]
#1	762,04	230	30,2	763,38	230	30,1
#2	830,66	330	39,7	832,37	230	27,6
#3	968,59	430	44,4	970,76	240	24,7
#4	762,04	230	30,2	832,62	330	39,6
#5	934,65	330	35,3	1040,10	330	31,7
#6	1107,13	430	38,8	1143,94	330	28,8
#7	831,19	230	27,7	832,68	430	51,6
#8	1038,68	330	31,8	1109,82	440	39,6
#9	1385,36	440	31,8	1249,17	440	35,2
#10	899,73	230	25,6	970,76	240	24,7
#11	1141,10	330	28,9	1109,08	240	21,6
#12	1105,97	430	38,9	1247,30	250	20,0
#13	1038,45	240	23,1	1144,73	330	28,8
#14	1245,56	380	30,5	1456,14	340	23,3
#15	1521,46	440	28,9	1559,87	340	21,8
#16	1107,90	240	21,7	1110,15	440	39,6
#17	1349,59	340	25,2	1386,80	440	31,7
#18	1521,46	440	28,9	1663,58	440	26,4
#19	1036,58	240	23,2	969,40	240	24,8
#20	1139,08	330	29,0	1037,76	240	23,1
#21	1241,83	430	34,6	1175,69	250	21,3
#22	967,66	240	24,8	1038,68	330	31,8
#23	1243,28	330	26,5	1349,59	340	25,2
#24	1380,94	440	31,9	1660,71	340	20,5
#25	1106,34	240	21,7	1247,04	440	35,3
#26	1554,87	340	21,9	1523,66	440	28,9
#27	1796,20	440	24,5	1800,09	440	24,4
#28	1243,75	250	20,1	1246,41	250	20,1
#29	1448,96	340	23,5	1522,24	260	17,1
#30	1654,84	440	26,6	1660,07	270	16,3
#31	1451,80	260	17,9	1559,33	340	21,8
#32	1761,59	340	19,3	1870,23	350	18,7
#33	1932,72	440	22,8	2180,74	350	16,0
#34	1520,68	260	17,1	1524,65	440	28,9
#35	1968,94	350	17,8	1801,27	440	24,4
#36	2209,59	440	19,9	2215,81	440	19,9

Fonte: Autoria Própria

Tem-se os maiores valores de incerteza para o fluido quente com 44,4% no caso #3 e para o fluido frio com 51,6% no caso #7.

4.1.3 Transferência de Calor pela Efetividade – NUT

Os valores utilizados para o cálculo da transferência de calor pelo método da efetividade-NUT estão na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados efetividade - NUT

CASO	R	C_{min} [J/kg.K]	NUT	ε	q_{ε} [W]	Incerteza + - [W]	Incerteza [%]
#1	1,00	69,28	2,20	0,69	762,50	190	24,9
#2	0,67	69,36	2,00	0,74	820,72	190	23,2
#3	0,50	69,34	2,15	0,79	936,52	210	22,4
#4	1,38	69,28	2,44	0,79	767,04	200	26,1
#5	0,90	104,01	2,22	0,69	1003,70	270	26,9
#6	0,73	103,99	2,00	0,72	1125,50	280	24,9
#7	2,00	69,27	2,40	0,82	797,98	200	25,1
#8	1,25	103,87	2,00	0,72	1050,05	270	25,7
#9	1,11	138,54	1,82	0,65	1341,48	350	26,1
#10	0,93	69,34	2,55	0,72	945,23	200	21,2
#11	0,69	69,32	2,46	0,79	1097,93	220	20,0
#12	0,44	69,29	2,57	0,84	1163,23	230	19,8
#13	1,36	69,23	2,50	0,80	1047,52	220	21,0
#14	0,86	104,01	2,33	0,70	1382,33	300	21,7
#15	0,73	103,99	2,14	0,74	1536,59	320	20,8
#16	2,00	69,24	2,67	0,85	1057,44	220	20,8
#17	1,30	103,81	2,36	0,76	1347,47	300	22,3
#18	0,92	138,63	1,85	0,65	1617,42	380	23,5
#19	1,07	69,11	2,73	0,73	1012,03	210	20,8
#20	0,73	69,18	2,50	0,80	1045,96	220	21,0
#21	0,53	69,16	2,43	0,83	1141,66	230	20,1
#22	1,40	69,12	2,80	0,82	966,61	210	21,7
#23	0,92	103,81	2,36	0,70	1312,19	290	22,1
#24	0,63	103,79	2,67	0,79	1559,68	320	20,5
#25	1,78	69,15	2,91	0,87	1080,35	220	20,4
#26	1,36	103,66	2,50	0,78	1529,97	320	20,9
#27	1,00	138,17	2,17	0,68	1797,53	390	21,7
#28	1,00	69,10	3,00	0,75	1244,75	230	18,5
#29	0,64	69,19	2,75	0,82	1471,29	250	17,0
#30	0,50	69,17	2,67	0,85	1583,45	260	16,4
#31	1,40	69,13	3,00	0,84	1448,20	250	17,3
#32	0,94	103,90	2,40	0,71	1831,82	350	19,1
#33	0,67	103,84	2,47	0,77	2087,44	370	17,7
#34	2,00	69,12	2,93	0,87	1443,07	250	17,3
#35	1,46	103,63	2,38	0,76	1902,16	350	18,4
#36	1,00	138,10	2,00	0,67	2211,65	440	19,9

Fonte: Autoria Própria

Tem-se o maior valor de incerteza para o cálculo da efetividade-NUT no caso #5 com 26,9% de incerteza nos resultados.

4.1.4 Comparação Entre os Valores

A Tabela 8 expressa a comparação dos dados aferidos pelos 2 métodos praticados.

Tabela 8. Comparação entre métodos

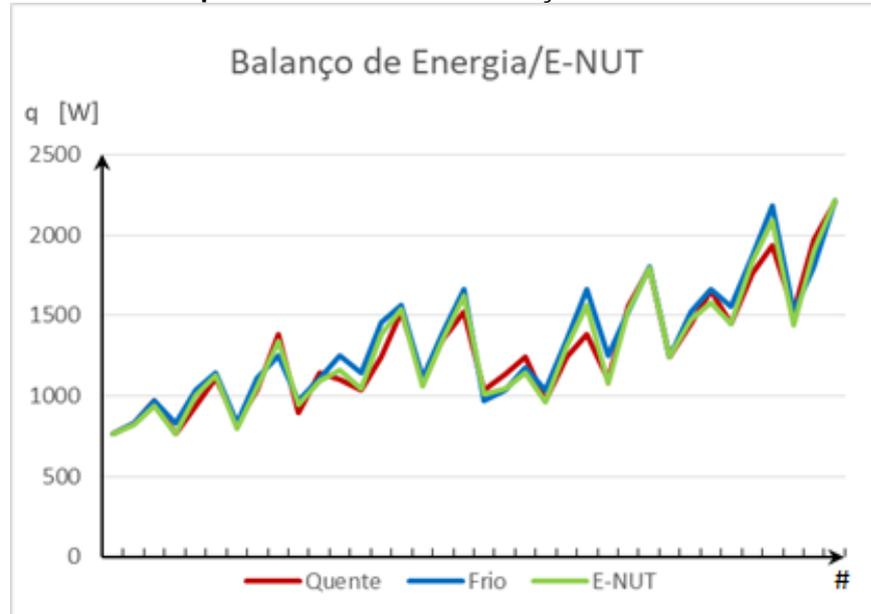
CASO	q_a [W]	q_f [W]	q_ε [W]
#1	762,04	763,38	762,50
#2	830,66	832,37	820,72
#3	968,59	970,76	936,52
#4	762,04	832,62	767,04
#5	934,65	1040,10	1003,70
#6	1107,13	1143,94	1125,50
#7	831,19	832,68	797,98
#8	1038,68	1109,82	1050,05
#9	1385,36	1249,17	1341,48
#10	899,73	970,76	945,23
#11	1141,10	1109,08	1097,93
#12	1105,97	1247,30	1163,23
#13	1038,45	1144,73	1047,52
#14	1245,56	1456,14	1382,33
#15	1521,46	1559,87	1536,59
#16	1107,90	1110,15	1057,44
#17	1349,59	1386,80	1347,47
#18	1521,46	1663,58	1617,42
#19	1036,58	969,40	1012,03
#20	1139,08	1037,76	1045,96
#21	1241,83	1175,69	1141,66
#22	967,66	1038,68	966,61
#23	1243,28	1349,59	1312,19
#24	1380,94	1660,71	1559,68
#25	1106,34	1247,04	1080,35
#26	1554,87	1523,66	1529,97
#27	1796,20	1800,09	1797,53
#28	1243,75	1246,41	1244,75
#29	1448,96	1522,24	1471,29
#30	1654,84	1660,07	1583,45
#31	1451,80	1559,33	1448,20
#32	1761,59	1870,23	1831,82
#33	1932,72	2180,74	2087,44
#34	1520,68	1524,65	1443,07
#35	1968,94	1801,27	1902,16
#36	2209,59	2215,81	2211,65

Fonte: Autoria Própria

Percebe-se que pelos dois métodos os resultados da taxa de transferência de calor se mostraram equivalentes.

O Gráfico 1 explica que as medidas realizadas estão convergindo.

Gráfico 1. Comparativo antes da manutenção



Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 1 acima compara os valores contidos nos 36 testes da Tabela 7 mostrando a similaridade de resultados para ambos os métodos de cálculo adotado. Para o menor valor do gráfico tem-se 762,04 Watts no fluido quente, e o maior 2215,81 Watts no fluido frio.

4.2 MANUTENÇÃO

Nesta seção será descrita a forma como foi realizada a manutenção no trocador de calor de placas do Laboratório Didático de Ciências Térmicas do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Campus Ponta Grossa.

A manutenção adotada foi a corretiva não planejada e desenrolou-se em três diferentes partes. A primeira parcela foi feita somente uma manutenção com desmontagem parcial do trocador de calor, no segundo momento foi feito o desmantelamento do trocador de calor para realizar a limpeza das placas e conserto das fissuras, no último segmento da manutenção foi feita a substituição das gaxetas e ajustes para evitar o vazamento dos fluidos de trabalho.

As figuras a seguir tentam explicitar da melhor forma como foi desempenhado as tratativas citadas.

A Figura 14 mostra a desmontagem parcial do aparelho e preparado para receber a solução de hipoclorito de sódio, ou mais conhecida como água sanitária, na qual é responsável por dissolver e retirar a incrustação do interior da tubulação.

Figura 14. Desmontagem parcial



Fonte: Autoria Própria

A escolha por este líquido para a limpeza do trocador de calor se deu devido a pressuposição de que apenas água corrente e detergente líquido não surtiriam efeito na limpeza.

A Figura 15 exprime o que ocorreu com a incrustação presente no trocador de calor.

Figura 15. Decorrência da limpeza



Fonte: Autoria Própria

A Figura 16 mostra em um balde de cor branca como ficou a aparência da água sanitária retirada do interior do trocador de calor, lembrando que o tom da solução inicialmente era transparente.

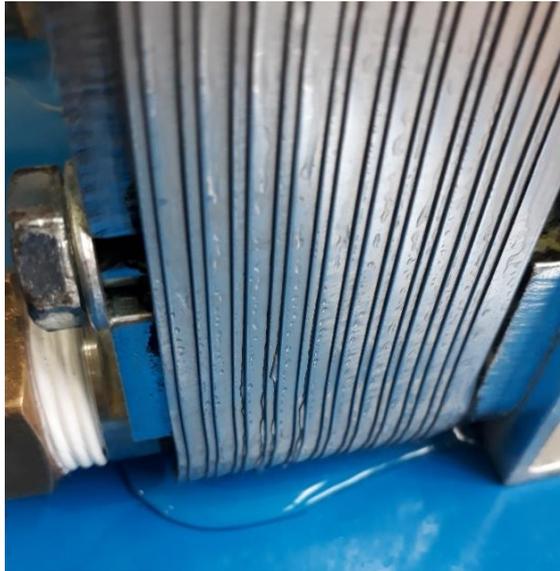
Figura 16. Aparência da solução



Fonte: Autoria Própria

O estopim da segunda fase da manutenção se deu devido ao vazamento conforme a Figura 17, que mistura do fluido quente com o fluido frio, prevendo que a limpeza da primeira etapa tenha exposto por completo os buracos das placas, antes encobertos pela incrustação, ocasionados pela corrosão devido ao tempo de operação do aparelho.

Figura 17. Vazamento após limpeza

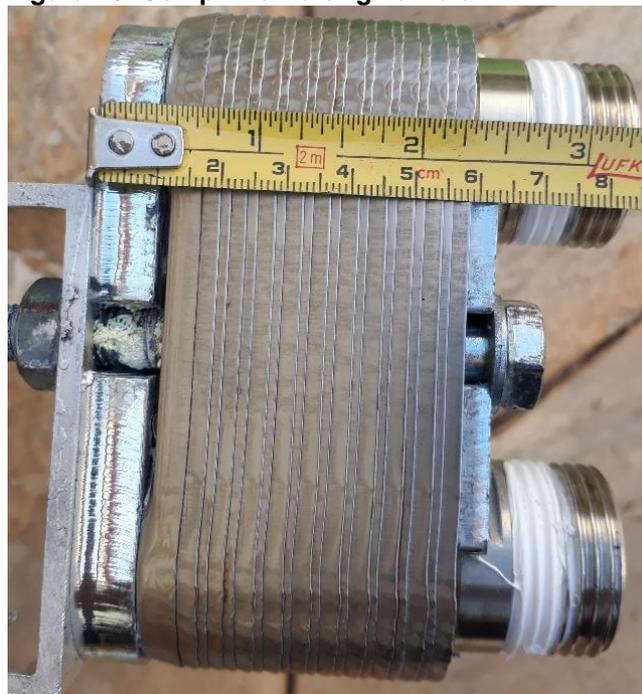


Fonte: Aatoria Própria

A segunda parte da manutenção seguiu os procedimentos de desmontagem do trocador de calor relatados na metodologia deste trabalho.

Foi medido o comprimento total do arranjo das placas de acordo com a Figura 18 e retirados os parafusos, afrouxando-os de forma alternada para não causar qualquer tipo de deformação das placas.

Figura 18. Comprimento original total

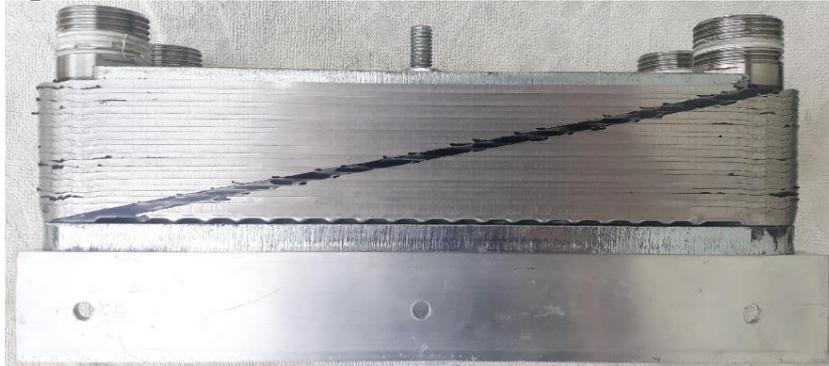


Fonte: Aatoria Própria

A medida aferida foi de 6,4 centímetros conforme a trena, ou 64 milímetros, considerando as placas de suporte, antes de dar início a desmontagem do trocador de calor.

A Figura 19 mostra a linha lateral no trocador de calor para manter as ordens das placas.

Figura 19. Linha lateral



Fonte: Autoria Própria

O ideal é enumerar as placas para saber a sequência de montagem, mas devido ao tamanho do trocador de calor, foi feita somente a marcação na lateral.

As placas estavam com resíduos de incrustação devido ao seu tempo de operação, o equipamento funcionava desde 2012 sem nenhum tipo de intervenção e utilizado pelos cursos de engenharia mecânica e química, representado na Figura 20.

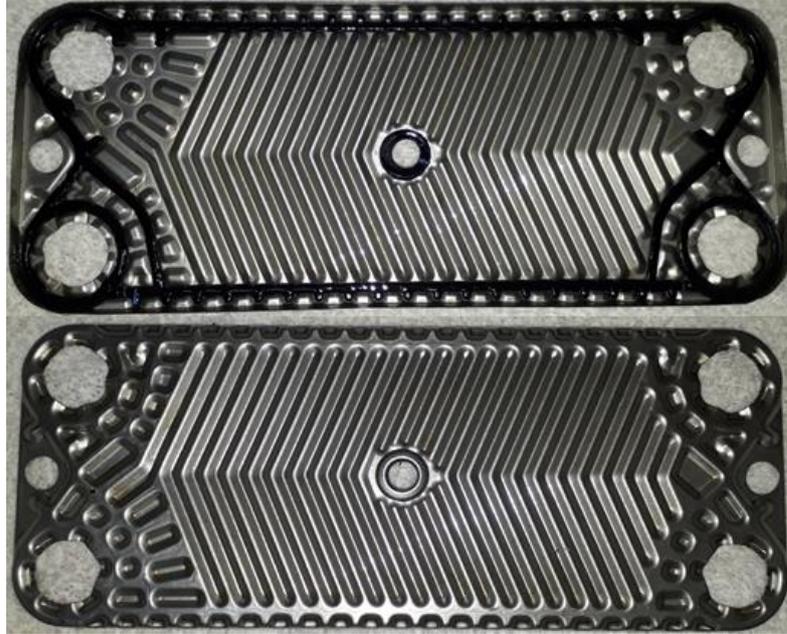
Figura 20. Condição da placa



Fonte: Autoria Própria

As placas foram limpas com água corrente e sabão, com o auxílio de uma esponja de aço para retirar as sujeiras mais aderidas. Após limpas e secas, foi utilizado um desengripante spray para protegê-las. A Figura 21 mostra a placa limpa e protegida.

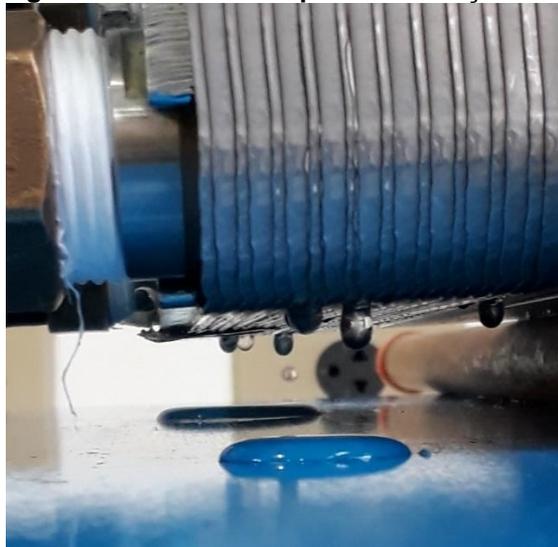
Figura 21. Placa limpa



Fonte: Autoria Própria

Após a limpeza, foi montado o trocador de calor novamente e preparado para ser utilizado e realizar os testes depois da manutenção. Entretanto o aparelho continuava a apresentar vazamentos, como a Figura 22 ilustra.

Figura 22. Vazamento após manutenção



Fonte: Autoria Própria

O trocador de calor foi desmontado novamente e desta vez foi estudado a possibilidade de troca das gaxetas, um material integrado por elastômeros, em sua maior parte composta de borracha nitrílica, que atende as mais variadas formas de utilização. A Figura 23 mostra o formato da gaxeta deste trocador de calor.

Figura 23. Formato gaxeta



Fonte: Autoria Própria

As gaxetas são feitas conforme o tamanho da placa e seguem padrões de construção, entretanto para este tipo de trocador não foi encontrado devido ao seu pequeno tamanho. As gaxetas mais comuns de serem encontradas são medidas de trocadores de calor industrial.

Após várias pesquisas e frustrações em não encontrar a gaxeta específica para este trocador de calor, foi acatada a ideia de fazer a própria gaxeta de forma artesanal.

A Figura 24 exhibe o material utilizado para a construção artesanal das gaxetas.

Figura 24. Material da gaxeta artesanal



Fonte: Autoria Própria

Os materiais utilizados foram anéis de borracha, também conhecido como *o-ring*, filamentos de borracha nitrílica com 3 milímetros de espessura e cola adesiva universal com base de cianocrilato líquido.

A Figura 25 destaca o resultado final.

Figura 25. Resultado final gaxeta artesanal



Fonte: Autoria Própria

A troca das gaxetas se fez necessária devido à perda de elasticidade do material original, que apesar de visualmente não apresentar defeitos, não cumpria sua função de isolar o meio interno do meio externo.

Para vedar os buracos ocasionados pela corrosão foi utilizado a cola adesiva com retalhos do mesmo material da gaxeta. A Figura 26 revela a situação das placas devido a utilização da água da rede de fornecimento do município sem os devidos tratamentos necessário para prolongar a vida útil do trocador de calor.

Figura 26. Corrosão das placas



Fonte: Autoria Própria

A placas foram reparadas e o trocador de calor foi novamente montado. Para ter um melhor ajuste na hora de apertar os parafusos e ter vedação completa, foram trocados os parafusos originais com rosca parcial por parafusos com rosca total.

A Figura 27 exhibe os parafusos originais.

Figura 27. Parafusos originais



Fonte: Aatoria Própria

Finalizando a parte da manutenção com a montagem do trocador de calor como era originalmente, os parafusos foram estreitados e o comprimento total do arranjo das placas do trocador de calor, considerando as placas de suporte, foi de 6,5 centímetros ou 65 milímetros. A Figura 28 retrata a medida final.

Figura 28. Comprimento final total



Fonte: Aatoria Própria

O trocador de calor de placas foi montado no Laboratório Didático de Ciências Térmicas junto aos aparelhos adjacentes e pronto para ser utilizado.

A Figura 29 ilustra o trocador de calor em pleno funcionamento para a aferição das medidas após a manutenção.

Figura 29. Trocador de calor em operação



Fonte: Autoria Própria

4.3 DEPOIS DA MANUTENÇÃO

A Tabela 9 a seguir mostra a sequência da realização dos testes no trocador de calor depois de ser efetuado a manutenção.

Tabela 9. Sequência de realização de testes

Vazão do fluido frio $Q_f = 1,0$ L/min				
Q_q [l/min]	Temperatura do reservatório (ST-16)[°C]			
	45	50	55	60
1	#37	#46	#55	#64
1,5	#38	#47	#56	#65
2	#39	#48	#57	#66
Vazão do fluido frio $Q_f = 1,5$ L/min				
Q_q [l/min]	Temperatura do reservatório (ST-16)[°C]			
	45	50	55	60
1	#40	#49	#58	#67
1,5	#41	#50	#59	#68
2	#42	#51	#60	#69
Vazão do fluido frio $Q_f = 2,0$ L/min				
Q_q [l/min]	Temperatura do reservatório (ST-16)[°C]			
	45	50	55	60
1	#43	#52	#61	#70
1,5	#44	#53	#62	#71
2	#45	#54	#63	#72

Fonte: Autoria Própria

Exemplificando o caso #59 a temperatura do reservatório é 55°C e as vazões dos fluidos quente e fluido frio são 1.5 litros por minuto.

As vazões se equiparam nos fluidos quente e frio nos casos: #37, #46, #55 e #64 para 1 litro por minuto; #41, #50, #59 e #68 para 1.5 litros por minuto e #45, #54, #63 e #72 para 2 litros por minuto.

Os testes aconteceram em escoamento contracorrente e em parâmetros de regulagem do equipamento iguais aos realizados nos 36 primeiros testes. Aqui também foram realizadas 36 aferições, no qual foram enumerados do 37 ao 72 para não causar problemas de interpretação.

A Tabela 10 indica as temperaturas encontradas nos testes com a variação de temperatura no reservatório do fluido quente em 45°C, 50°C, 55°C e 60°C em diferentes vazões, obedecendo os parâmetros citados.

Tabela 10. Temperaturas aferidas

Temperatura do reservatório ST-16 (45°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#37	#38	#39	#40	#41	#42	#43	#44	#45
ST1[°C]	38	39	40	38	38	39	38	38	39
ST2[°C]	27	30	33	26	28	30	25	27	29
ST3[°C]	34	36	38	32	33	35	30	32	33
ST4[°C]	22	23	23	23	23	23	23	23	23
Temperatura do reservatório ST-16 (50°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#46	#47	#48	#49	#50	#51	#52	#53	#54
ST1[°C]	42	42	43	41	42	42	42	42	43
ST2[°C]	27	31	34	26	30	31	27	29	32
ST3[°C]	36	39	41	33	36	37	31	32	34
ST4[°C]	21	22	22	22	23	23	22	22	22
Temperatura do reservatório ST-16 (55°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#55	#56	#57	#58	#59	#60	#61	#62	#63
ST1[°C]	46	47	47	46	46	47	45	46	46
ST2[°C]	31	35	38	28	31	35	27	30	32
ST3[°C]	35	37	39	33	35	38	31	34	36
ST4[°C]	18	19	19	20	21	21	21	21	22
Temperatura do reservatório ST-16 (60°C)									
Qf = 1,0 L/min			Qf = 1,5 L/min				Qf = 2,0 L/min		
CASO	#64	#65	#66	#67	#68	#69	#70	#71	#72
ST1[°C]	51	52	51	50	50	51	49	50	49
ST2[°C]	31	36	40	29	35	37	28	32	34
ST3[°C]	38	40	42	36	40	41	33	37	39
ST4[°C]	18	19	20	21	21	22	22	22	23

Fonte: Autoria Própria

Nas aferições das temperaturas de entrada do fluido frio nota-se que teve uma diferença menor com relação as registradas antes da manutenção, tendo 18°C a menor temperatura e 23°C a maior temperatura.

4.3.1 Propriedades

Para a resolução dos cálculos, os valores das propriedades termofísicas foram calculados para cada caso.

Os valores adquiridos abaixo foram retirados de acordo com sua temperatura aferida. Foi escolhido para a densidade e para o calor específico o livro Incropera (2011). O cálculo da vazão mássica se deu através de iterações matemáticas com a densidade do líquido.

A Tabela 11 representa esses valores.

Tabela 11. Propriedades

CASO	ρ_q [kg/m ³]	ρ_f [kg/m ³]	m_q [kg/s]	m_f [kg/s]	C_{p_q} [J/kg.K]	C_{p_f} [J/kg.K]
#37	994,73	996,12	0,017	0,017	4178,60	4179,50
#38	994,16	995,67	0,025	0,017	4178,40	4179,30
#39	993,49	995,28	0,033	0,017	4178,30	4179,40
#40	994,88	996,32	0,017	0,025	4178,80	4179,30
#41	994,63	996,17	0,025	0,025	4178,50	4179,30
#42	994,16	995,82	0,033	0,025	4178,40	4179,30
#43	995,03	996,66	0,017	0,033	4179,00	4179,50
#44	994,73	996,32	0,025	0,033	4178,60	4179,30
#45	994,31	996,17	0,033	0,033	4178,50	4179,30
#46	993,97	995,87	0,017	0,017	4179,00	4179,80
#47	993,43	995,20	0,025	0,017	4178,60	4179,70
#48	992,73	994,83	0,033	0,017	4178,60	4179,90
#49	994,33	996,27	0,017	0,025	4179,10	4179,50
#50	993,58	995,67	0,025	0,025	4178,70	4179,30
#51	993,43	995,48	0,033	0,025	4178,60	4179,30
#52	993,97	996,61	0,017	0,033	4179,00	4179,60
#53	993,72	996,41	0,025	0,033	4178,80	4179,50
#54	993,02	996,12	0,033	0,033	4178,60	4179,50
#55	992,59	996,32	0,017	0,017	4179,00	4180,70
#56	991,69	995,87	0,025	0,017	4179,00	4180,40
#57	991,14	995,50	0,033	0,017	4179,10	4180,60
#58	993,04	996,47	0,017	0,025	4179,30	4180,10
#59	992,59	996,02	0,025	0,025	4179,00	4179,80
#60	991,69	995,48	0,033	0,025	4179,00	4179,90
#61	993,35	996,71	0,017	0,033	4179,30	4179,90
#62	992,74	996,22	0,025	0,033	4179,10	4179,80
#63	992,40	995,77	0,033	0,033	4178,90	4179,50
#64	991,49	995,78	0,017	0,017	4179,90	4180,80
#65	990,40	995,33	0,025	0,017	4180,00	4180,70
#66	989,91	994,82	0,033	0,017	4180,10	4180,60
#67	992,03	995,87	0,017	0,025	4179,90	4179,80
#68	991,04	995,13	0,025	0,025	4179,60	4180,10
#69	990,45	994,83	0,033	0,025	4179,80	4179,90
#70	992,39	996,27	0,017	0,033	4179,80	4179,50
#71	991,53	995,57	0,025	0,033	4179,60	4179,50
#72	991,45	995,11	0,033	0,033	4179,40	4179,50

Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Transferência de Calor pelo Balanço de energia

Os registros apurados pelo método de balanço de energia se encontram na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12. Resultados balanço de energia

CASO	Q_q	Incerteza	Incerteza	Q_f	Incerteza	Incerteza
	[W]	+ - [W]	[%]	[W]	+ - [W]	[%]
#37	762,04	230	30,2	832,66	230	27,6
#38	934,65	330	35,3	901,60	230	25,5
#39	968,59	430	44,4	1039,92	240	23,1
#40	831,48	230	27,7	936,88	330	35,2
#41	1039,02	330	31,8	1040,82	330	31,7
#42	1246,20	440	35,3	1248,55	330	26,4
#43	900,95	230	25,5	971,96	430	44,2
#44	1143,06	330	28,9	1249,17	440	35,2
#45	1384,91	440	31,8	1387,76	440	31,7
#46	1038,45	230	22,1	1040,64	240	23,1
#47	1141,56	330	28,9	1178,57	250	21,2
#48	1244,46	430	34,6	1316,79	250	19,0
#49	1038,85	240	23,1	1145,07	330	28,8
#50	1245,56	330	26,5	1352,39	340	25,1
#51	1522,08	440	28,9	1456,14	340	23,3
#52	1038,45	240	23,1	1249,63	440	35,2
#53	1349,59	340	25,2	1388,17	440	31,7
#54	1521,46	440	28,9	1665,31	440	26,4
#55	1037,01	240	23,1	1180,17	250	21,2
#56	1243,28	330	26,5	1248,94	250	20,0
#57	1242,63	430	34,6	1387,27	260	18,7
#58	1245,06	250	20,1	1353,73	340	25,1
#59	1555,52	340	21,9	1457,11	340	23,3
#60	1657,70	440	26,5	1768,42	340	19,2
#61	1245,46	250	20,1	1388,72	440	31,7
#62	1659,51	340	20,5	1804,40	440	24,4
#63	1935,32	440	22,7	1942,19	440	22,7
#64	1381,44	260	18,8	1387,71	260	18,7
#65	1655,96	340	20,5	1456,41	260	17,9
#66	1517,24	440	29,0	1524,94	260	17,0
#67	1451,31	260	17,9	1560,95	340	21,8
#68	1553,31	340	21,9	1975,88	350	17,7
#69	1931,95	440	22,8	1975,18	350	17,7
#70	1451,80	260	17,9	1526,76	440	28,8
#71	1864,90	350	18,8	2080,50	440	21,1
#72	2071,84	440	21,2	2218,16	450	20,3

Fonte: Autoria Própria

Tem-se os maiores valores de incerteza para o fluido quente 44,4% no caso #39 e para o fluido frio 44,2% no caso #43.

4.3.3 Transferência de Calor pela Efetividade - NUT

O resultados e incertezas oriundas do método da efetividade-NUT estão ilustrados na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13. Resultados efetividade - NUT

CASO	R	C_{min} [J/kg.K]	NUT	ε	q_{ε} [W]	Incerteza + - [W]	Incerteza [%]
#37	0,92	69,39	2,67	0,73	806,95	190	23,5
#38	0,69	69,35	2,60	0,81	893,34	210	23,5
#39	0,47	69,33	2,50	0,83	981,25	210	21,4
#40	1,33	69,29	2,67	0,81	843,40	200	23,7
#41	1,00	103,90	2,00	0,67	1039,62	270	26,0
#42	0,75	104,05	2,18	0,74	1237,52	290	23,4
#43	1,86	69,30	2,60	0,84	875,74	210	24,0
#44	1,22	103,91	2,20	0,75	1162,87	290	24,9
#45	1,00	138,49	1,67	0,63	1385,80	350	25,3
#46	1,00	69,23	2,50	0,71	1039,23	210	20,2
#47	0,65	69,33	2,83	0,82	1143,45	220	19,2
#48	0,47	69,30	2,71	0,85	1240,06	230	18,5
#49	1,36	69,26	2,50	0,80	1047,90	220	21,0
#50	0,92	104,03	2,00	0,67	1316,73	290	22,0
#51	0,79	104,01	2,15	0,74	1462,61	310	21,2
#52	1,67	69,23	1,88	0,76	1047,87	210	20,0
#53	1,30	103,81	1,53	0,65	1351,88	300	22,2
#54	0,92	138,78	1,26	0,56	1625,07	380	23,4
#55	0,88	69,42	1,42	0,59	1138,09	230	20,2
#56	0,67	69,39	1,38	0,64	1237,75	240	19,4
#57	0,45	69,36	1,48	0,69	1333,46	240	18,0
#58	1,38	69,17	1,71	0,70	1256,35	230	18,3
#59	1,07	103,70	1,43	0,59	1526,65	320	21,0
#60	0,71	104,02	1,48	0,64	1733,21	340	19,6
#61	1,80	69,19	1,80	0,75	1237,47	230	18,6
#62	1,23	103,72	1,52	0,65	1685,98	330	19,6
#63	1,00	138,24	1,40	0,58	1937,32	420	21,7
#64	1,00	69,07	1,54	0,61	1383,33	260	18,8
#65	0,76	69,35	1,45	0,65	1487,48	270	18,2
#66	0,50	69,32	1,52	0,69	1490,81	260	17,4
#67	1,40	69,11	1,91	0,73	1458,98	250	17,1
#68	0,79	103,99	1,58	0,61	1846,00	360	19,5
#69	0,74	103,96	1,52	0,65	1954,77	370	18,9
#70	1,91	69,13	1,91	0,76	1422,36	250	17,6
#71	1,20	103,61	1,57	0,66	1907,64	360	18,9
#72	0,94	138,63	1,52	0,60	2173,87	440	20,2

Fonte: Autoria Própria

O maior valor de incerteza para o cálculo da efetividade-NUT aconteceu no caso #41 com 26% de incerteza nos resultados.

4.3.4 Comparação Entre os Valores

A comparação entre o método de balanço de energia e efetividade-NUT está esclarecido na Tabela 14.

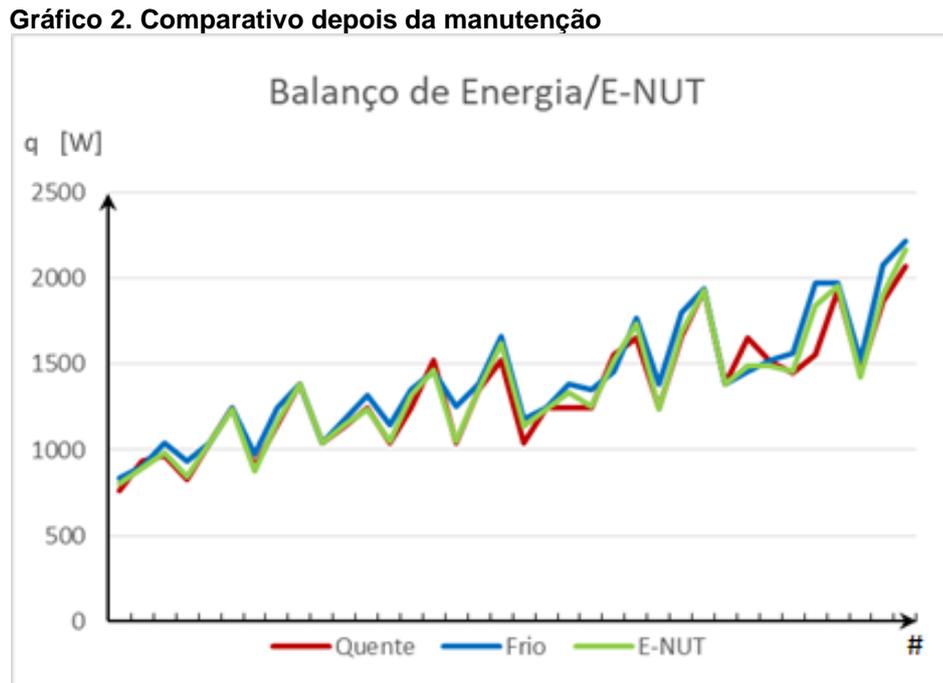
Tabela 14. Comparação entre métodos

CASO	q_q [W]	q_f [W]	q_ε [W]
#37	762,04	832,66	806,95
#38	934,65	901,60	893,34
#39	968,59	1039,92	981,25
#40	831,48	936,88	843,40
#41	1039,02	1040,82	1039,62
#42	1246,20	1248,55	1237,52
#43	900,95	971,96	875,74
#44	1143,06	1249,17	1162,87
#45	1384,91	1387,76	1385,80
#46	1038,45	1040,64	1039,23
#47	1141,56	1178,57	1143,45
#48	1244,46	1316,79	1240,06
#49	1038,85	1145,07	1047,90
#50	1245,56	1352,39	1316,73
#51	1522,08	1456,14	1462,61
#52	1038,45	1249,63	1047,87
#53	1349,59	1388,17	1351,88
#54	1521,46	1665,31	1625,07
#55	1037,01	1180,17	1138,09
#56	1243,28	1248,94	1237,75
#57	1242,63	1387,27	1333,46
#58	1245,06	1353,73	1256,35
#59	1555,52	1457,11	1526,65
#60	1657,70	1768,42	1733,21
#61	1245,46	1388,72	1237,47
#62	1659,51	1804,40	1685,98
#63	1935,32	1942,19	1937,32
#64	1381,44	1387,71	1383,33
#65	1655,96	1456,41	1487,48
#66	1517,24	1524,94	1490,81
#67	1451,31	1560,95	1458,98
#68	1553,31	1975,88	1846,00
#69	1931,95	1975,18	1954,77
#70	1451,80	1526,76	1422,36
#71	1864,90	2080,50	1907,64
#72	2071,84	2218,16	2173,87

Fonte: Autoria Própria

Reparou-se que os valores se mostram análogos e que sofreram um aumento em relação aos valores aferidos antes da manutenção, comprovando que houve uma melhora na transferência de calor.

O Gráfico 2 ilustra a equivalência dos valores dos métodos adotados depois da manutenção.



O Gráfico 2 compara os valores contidos nos 36 testes, enumerados do caso 37 ao 72 da Tabela 14, exibindo as semelhanças de resultados os métodos de cálculo praticado. Para o menor valor do gráfico tem-se 762,04 Watts no fluido quente, e o maior 2218,16 Watts no fluido frio.

4.4 COMPARATIVO ANTES/DEPOIS MANUTENÇÃO

Agora com todos os resultados obtidos, pode-se fazer a comparação de dados utilizando os mesmos métodos como referência e ver a influência deles antes e depois da manutenção.

Nas Tabelas 15 e 16 foram confrontados os valores do método por balanço de energia e em seguida pelo método da efetividade por número de unidades de transferência.

4.4.1 Balanço de energia

Agora fazendo o comparativo do mesmo método, a Tabela 15 expõe os valores do balanço de energia, com as duas últimas colunas evidenciado a porcentagem de melhoria.

Tabela 15. Comparativo balanço de energia

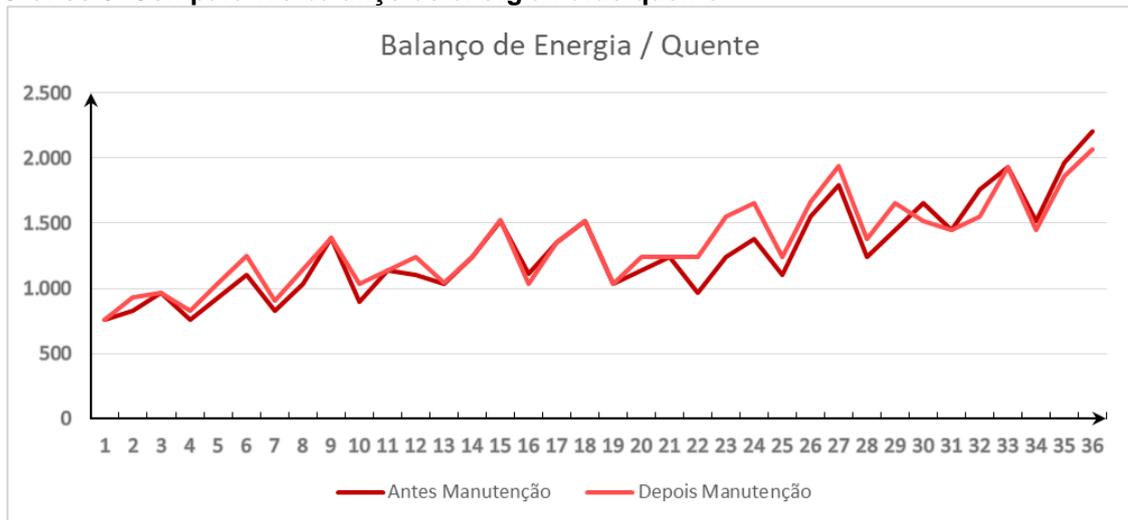
Antes da Manutenção		Depois da Manutenção			
q_a	q_f	q_a	q_f	q_a	q_f
[W]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]
762,04	763,38	762,04	832,66	0,0	8,3
830,66	832,37	934,65	901,60	11,1	7,7
968,59	970,76	968,59	1039,92	0,0	6,7
762,04	832,62	831,48	936,88	8,4	11,1
934,65	1040,10	1039,02	1040,82	10,0	0,1
1107,13	1143,94	1246,20	1248,55	11,2	8,4
831,19	832,68	900,95	971,96	7,7	14,3
1038,68	1109,82	1143,06	1249,17	9,1	11,2
1385,36	1249,17	1384,91	1387,76	0,0	10,0
899,73	970,76	1038,45	1040,64	13,4	6,7
1141,10	1109,08	1141,56	1178,57	0,0	5,9
1105,97	1247,30	1244,46	1316,79	11,1	5,3
1038,45	1144,73	1038,85	1145,07	0,0	0,0
1245,56	1456,14	1245,56	1352,39	0,0	-7,7
1521,46	1559,87	1522,08	1456,14	0,0	-7,1
1107,90	1110,15	1038,45	1249,63	-6,7	11,2
1349,59	1386,80	1349,59	1388,17	0,0	0,1
1521,46	1663,58	1521,46	1665,31	0,0	0,1
1036,58	969,40	1037,01	1180,17	0,0	17,9
1139,08	1037,76	1243,28	1248,94	8,4	16,9
1241,83	1175,69	1242,63	1387,27	0,1	15,3
967,66	1038,68	1245,06	1353,73	22,3	23,3
1243,28	1349,59	1555,52	1457,11	20,1	7,4
1380,94	1660,71	1657,70	1768,42	16,7	6,1
1106,34	1247,04	1245,46	1388,72	11,2	10,2
1554,87	1523,66	1659,51	1804,40	6,3	15,6
1796,20	1800,09	1935,32	1942,19	7,2	7,3
1243,75	1246,41	1381,44	1387,71	10,0	10,2
1448,96	1522,24	1655,96	1456,41	12,5	-4,5
1654,84	1660,07	1517,24	1524,94	-9,1	-8,9
1451,80	1559,33	1451,31	1560,95	0,0	0,1
1761,59	1870,23	1553,31	1975,88	-13,4	5,3
1932,72	2180,74	1931,95	1975,18	0,0	-10,4
1520,68	1524,65	1451,80	1526,76	-4,7	0,1
1968,94	1801,27	1864,90	2080,50	-5,6	13,4
2209,59	2215,81	2071,84	2218,16	-6,6	0,1

Fonte: Autoria Própria

Os Gráficos 3 e 4 a seguir plotam os valores da transferência de calor pelo método de balanço de energia para os resultados antes e depois de ser realizada a manutenção.

O Gráfico 3 mostra os valores apenas para o fluido quente.

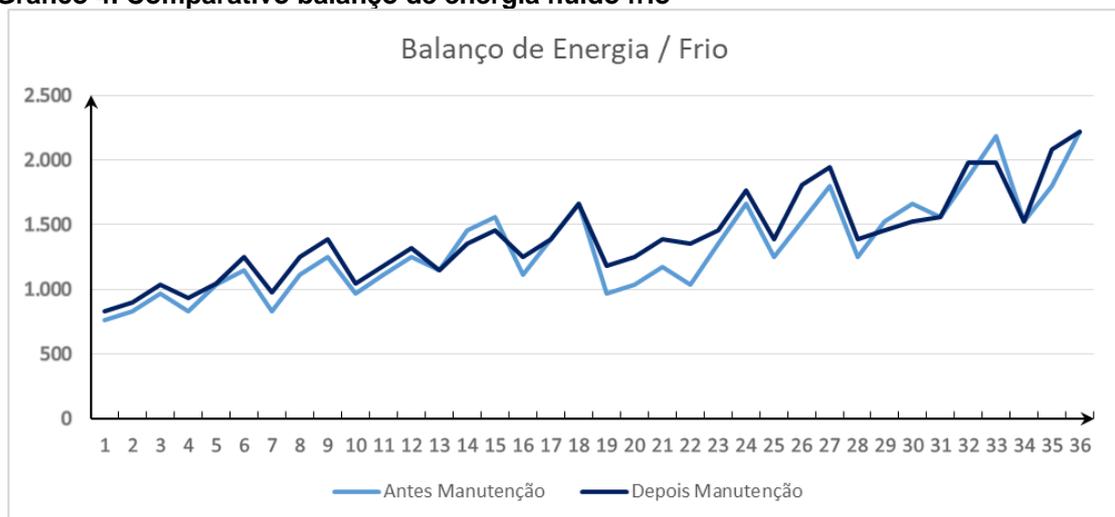
Gráfico 3. Comparativo balanço de energia fluido quente



Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 4 representa os resultados do fluido frio.

Gráfico 4. Comparativo balanço de energia fluido frio



Fonte: Autoria Própria

Percebe-se que os gráficos possuem regiões em que os valores da transferência de calor apresentam melhorias para os números após a manutenção em relação aos antecessores.

Os valores da Tabela 15 mostram que a média de melhoria da troca de calor em Watts foi de 4,2% para o fluido quente e de 6,0% para o fluido frio.

4.4.2 Efetividade – NUT

A Tabela 16 indica a comparação do método da efetividade-NUT com a terceira coluna ilustrando a porcentagem melhorada na manutenção.

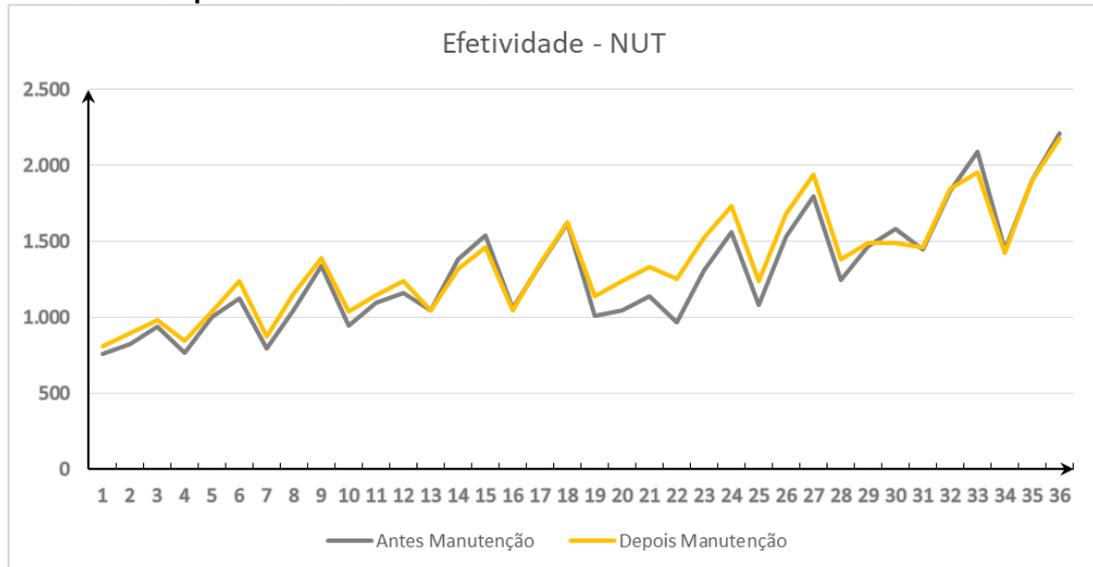
Tabela 16. Comparativo efetividade-NUT

Antes Manutenção	Depois Manutenção	
q_{ε} [W]	q_{ε} [W]	q_{ε} [%]
762,50	806,95	5,5
820,72	893,34	8,1
936,52	981,25	4,6
767,04	843,40	9,1
1003,70	1039,62	3,5
1125,50	1237,52	9,1
797,98	875,74	8,9
1050,05	1162,87	9,7
1341,48	1385,80	3,2
945,23	1039,23	9,0
1097,93	1143,45	4,0
1163,23	1240,06	6,2
1047,52	1047,90	0,0
1382,33	1316,73	-5,0
1536,59	1462,61	-5,1
1057,44	1047,87	-0,9
1347,47	1351,88	0,3
1617,42	1625,07	0,5
1012,03	1138,09	11,1
1045,96	1237,75	15,5
1141,66	1333,46	14,4
966,61	1256,35	23,1
1312,19	1526,65	14,0
1559,68	1733,21	10,0
1080,35	1237,47	12,7
1529,97	1685,98	9,3
1797,53	1937,32	7,2
1244,75	1383,33	10,0
1471,29	1487,48	1,1
1583,45	1490,81	-6,2
1448,20	1458,98	0,7
1831,82	1846,00	0,8
2087,44	1954,77	-6,8
1443,07	1422,36	-1,5
1902,16	1907,64	0,3
2211,65	2173,87	-1,7

Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 5 representa os valores contidos na Tabela 16 para fazer a comparação de dados e inferir a respeito da melhoria.

Gráfico 5. Comparativo Efetividade-NUT



Fonte: Autoria Própria

A representação do gráfico explicita a respeito das melhorias de resultados depois de efetuada a manutenção, pois as linhas estão na mesma medida ou acima da esboçada.

A média de melhoria para a efetividade foi de 5,1% em comparação com antes da manutenção.

5. CONCLUSÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso teve como diretriz principal verificar a influência da manutenção no desempenho térmico de um trocador de calor de placas, este que se encontra nas dependências do Laboratório Didático de Ciências Térmicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

Os parâmetros utilizados para a análise do desempenho térmico foram a adoção de dois métodos para calcular a taxa de transferência de calor; o Balanço de Energia e Efetividade por Número de Unidades de Transferência.

As experiências executadas foram em escoamento contracorrente dos fluidos quente e frio. Ocorreram três variações na vazão do fluido quente, três variações na vazão do fluido frio, sendo utilizadas 1,0; 1,5 e 2,0 litros por minuto. Enquanto isso transcorreram quatro variações na temperatura do reservatório, começando em 45°C e variando de 5°C em 5°C até atingir 60°C.

Através do método de Balanço de Energia foi considerado o trocador de calor isolado termicamente do ambiente externo e foram calculadas as transferências de calor para o fluido quente e para o fluido frio. Para os valores antes e depois da manutenção obteve uma melhoria média de 4,2% para o fluido quente e de 6,0% para o fluido frio.

No método da Efetividade-NUT foi observado que os resultados foram de transferência de calor entre os valores alcançados pelo método de balanço de energia com fluido quente e frio. Comparando os resultados com relação a manutenção, teve um acréscimo médio de 5,1% na transferência de calor.

A manutenção do trocador de calor de placas foi a parte mais desafiadora deste trabalho, já que as poucas referências existentes se concentram nos equipamentos industriais, ou seja, possui dimensões maiores ao do equipamento estudado. Foi adotada a manutenção corretiva não planejada e as peças de reposição originais não foram encontradas, sendo necessário ajustes técnicos para que cumprissem a proposta desejada.

De forma geral os resultados se mostram satisfatórios, já que o objetivo de análise foi centrado na diferença da taxa de transferência de calor do aparelho, no qual teve um acréscimo de melhoria médio geral de 5,1%.

Pode ser citado que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser utilizado como base para futuras pesquisas, como o fato de ser utilizado a torre de resfriamento

instalado no laboratório do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Campus Ponta Grossa para ter melhor controle sobre o fluido frio que circula no equipamento experimental.

Também pode ser aplicado um outro tipo de fluido de trabalho, como por exemplo água destilada e deionizada para aumentar a vida útil de trabalho do aparelho; estender a manutenção para a unidade de abastecimento e a bomba do equipamento; fazer o rearranjo das placas, alterando o sentido ou até diminuir o número de placas operantes; utilizar outro equipamento para fazer a leitura das temperaturas para ter melhor precisão na aquisição de dados.

REFERÊNCIAS

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., BERGMAN, T.L. & LAVINE, A.S., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 643p.

KAKAÇ, S., LIU, H. & PRAMUANJAROENKIJ, A., **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**. 3.ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. 615p.

ÇENGEL, YUNUS A & GHAJAR, AFSHIN J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012. 902 p.

MORAN, MICHAEL J. & SHAPIRO, HOWARD N., **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 800 p.

KARDEC, ALAN & NASCIF, JÚLIO. **Manutenção: Função Estratégica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009. 361 p.

CABRAL, JOSÉ PAULO SARAIVA. **Organização e Gestão da Manutenção: dos conceitos à prática**. 6. ed. Lisboa, Portugal: Lidel – Edições Técnicas LDA, 2006. 362 p.

VIANA, HERBERT RICARDO GARCIA. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 167p.

PRITCHARD, PHILIP J., **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics**. 8. ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, INC, 2011. 875p.

GUT, Jorge A. W. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placas**. 2003. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 236 p.

MAIA JUNIOR, Gabriel Nunes. **Investigação experimental do desempenho de um trocador de calor de tubos concêntricos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014. 80 p.

FERREIRA, Cassio. **Análise experimental do desempenho de um trocador de calor do tipo casco e tubos**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014. 95 p.

HOBBSAWM, Eric J. **A Era das revoluções: 1789-1848**. São Paulo: Paz e Terra, 2015. 536p.

EDIBON PRACTICAL, **Exercises Manual**. 1 ed. Madrid. 2010.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 13971: Sistemas de Refrigeração, Condicionamento de ar, Ventilação e Aquecimento – Manutenção Programada**. Rio de Janeiro, 25 p., 2014.

TRANter, **Superchanger: Plate & Frame HE**. EUA, 2011. 28p.

MARTELLI, M. R. **Nota de aula: Operações Unitárias 2**. Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP, 2016.

UNCERTAINTY CALCULATOR. Disponível em:

<<http://www.colby.edu/chemistry/PCChem/scripts/error.html?ModPagespeed=off>>.

Acessado em: 11/05/2019.

ANEXO A – Procedimiento Operacional Trocador de Calor de Placas

	<p align="center">UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CAMPUS PONTA GROSSA Engenharia: Mecânica/Química</p>
	<p align="center">PROCEDIMENTO OPERACIONAL TROCADOR DE CALOR DE PLACAS Marca: EDIBON</p>

- 1º.** Verificar se os equipamentos da unidade base e de serviço (bomba e resistência) estão conectados com a caixa de controle. Caso contrário conecta-los.
- 2º.** Conectar o trocador de calos de placas com a unidade base e de serviço, da seguinte forma: C1-C1, C2-C2, C3-C3 E C4-C4.
- 3º.** Conectar os sensores de temperatura (termopares) na caixa de controle e nos pontos indicados do trocador de calor de placas.
- 4º.** Conectar uma ponta de uma mangueira na torneira do laboratório e a outra ponta ao lado da caixa de aquecimento, na unidade base e de serviço.
- 5º.** Direcionar a corrente de agua que sai do trocado de calor para o ralo que está embaixo do equipamento.
- 6º.** Verificar se da caixa de aquecimento (cor prata) da unidade base e de serviço está preenchida com água até o sensor de nível. Caso contrário preenchê-la.
- 7º.** Ordenar as válvulas da unidade base e de serviço e do trocador de calor de placas de acordo com o fluxo de água desejado (paralelo ou contracorrente). Ver no final dos processos.
- 8º.** Conectar a caixa de controle em uma tomada (voltagem: 220V).
- 9º.** Mudar a caixa de controle para o modo ON (acionar interruptor azul atrás da caixa).
- 10º.** Ligar a caixa de controle (acionar interruptor vermelho). Ao ligar a caixa de controle, a resistência dentro da caixa de aquecimento liga automaticamente.
- 11º.** Na caixa de controle, ajustar no controlador de temperatura a temperatura para qual a água da caixa de aquecimento irá aquecer. Esperar a água aquecer.
- 12º.** Ligar a bomba na caixa de controle (acionar interruptor verde) e ajustar a vazão de água quente para o valor desejado. (A vazão ajustada na unidade base e de serviço).
- 13º.** Abrir a torneira da água, e na unidade base e de serviço ajustar a vazão de agua para o valor desejado.
- 14º.** Na caixa de controle, anotar as temperaturas de cada ponto do trocador de calor de placas (girar o botão preto até o ponto ST desejado).
- 15º.** Após a obtenção dos dados, desligar a bomba na caixa de controle. Desligar também a caixa de controle, mudá-la para o modo OFF e desconectá-la da tomada.

16º. Fechar a torneira de água e desconectar a mangueira da torneira e da unidade base e de serviço.

17º. Fechar as válvulas da unidade base e de serviço e do trocador de calor de placas.

18º. Desconectar os sensores de temperatura da caixa de controle e do trocador de calor de placas.

19º. Desconectar a unidade base e de serviço do trocador de calor de placas, e este guardar.

20º. Guardar os sensores de temperatura junto com o trocador de calor de placas.

Para o fluxo paralelo, abrir as válvulas:

- I. Corrente de água quente: V1, V7, V10 e V6. A ordem das válvulas é o caminho percorrido pela água no trocador.
- II. Corrente de água fria: V2, V8, V9 e V5. A ordem das válvulas é o caminho percorrido pela água no trocador.
- III. As demais válvulas devem permanecer fechadas.

Para o fluxo contracorrente, abrir as válvulas:

- I. Corrente de água quente: V1, V7, V10 e V6. A ordem das válvulas é o caminho percorrido pela água no trocador.
- II. Corrente de fria: Profield, V4, V9, V8 e V3. A ordem das válvulas é o caminho percorrido pela água no trocador.
- III. As demais válvulas devem permanecer fechadas.