



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Monitoramento da Efetividade Térmica de Trocadores de Calor

Autor: Kelvin Alex Schenkel

Orientadora: Prof.^a Dra. Débora Jung Luvizetto Faccin

Coorientador: Eng Dr. Carlos Eduardo Pereira Siqueira Campos

Porto Alegre, julho de 15

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica e Conceitos Fundamentais	2
2.1 Trocadores de Calor	2
2.2 Incrustação	3
2.3 Coeficiente Global de Transferência de Calor e Resistência Térmica	4
2.4 Método da Efetividade NUT	6
2.5 Monitoramento da Efetividade Térmica	7
3 Formulação do Problema ou Estudo de Caso	10
3.1 Descrição da Unidade	10
3.2 Seleção do trocador de estudo	11
3.3 Aquisição dos dados operacionais	12
4 Resultados	15
4.1 Monitoramento da Efetividade	15
4.1.1 Efeito da Qualidade de Limpeza do P-03	17
4.1.2 Efeito de Furos nos Tubos do P-03	18
4.1.3 Efeito da Carga de Processo	20
4.2 Impacto financeiro	21
5 Conclusões	24
5.1 Trabalhos Futuros	24
6 Referências	25

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Aos meus pais pelas palavras de apoio e conforto.

À minha namorada pelo companheirismo.

À minha orientadora acadêmica, Professora Débora Jung Luvizetto Faccin, pela atenção e dedicação ao meu trabalho e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao meu coorientador, Eng. Carlos Eduardo P. S. Campos, pela paciência, ensinamentos e por confiar a mim o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso pela amizade, convivência e parceria.

Resumo

Um dos constantes desafios da indústria petroquímica é a melhoria contínua da eficiência energética de seus processos, pois ela representa a maior parcela dos custos operacionais. No entanto, o uso eficiente da energia nos equipamentos industriais pode ser prejudicado por incrustações ou mudanças nas condições operacionais que podem ser alteradas quando comparadas a valores de projeto.

Um dos equipamentos mais utilizados em processos petroquímicos é o trocador de calor e uma de suas principais funcionalidades é a recuperação de calor e redução do consumo total de energia da planta. O grande número de trocadores de calor presentes e as variações nas condições operacionais dificultam o monitoramento térmico diário e contínuo desse tipo de equipamento.

O presente trabalho tem por objetivo aplicar uma metodologia de monitoramento de efetividade térmica para precisar o período de limpeza de trocadores de calor em uma planta industrial. Paralelamente, serão avaliados efeitos como a qualidade de limpeza, variação na carga de operação e ocorrência de furos nos tubos do trocador e os impactos financeiros que esses efeitos ocasionam.

Através desse estudo foi possível acompanhar a efetividade térmica e o nível de incrustação do trocador ao longo do tempo. Com isso, foi possível apontar exatamente o período de limpeza do trocador e, além disso, observar o momento e as condições exatas onde o trocador opera distante das condições estabelecidas no projeto.

Palavras-chaves: trocador de calor, monitoramento, incrustação, efetividade.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema de um trocador de calor casco e tubo adaptado de Kakaç e Liu (2002)	2
Figura 2.2: Esquema de um termossifão adaptada de Arneth e Stichlmair, (2001).....	3
Figura 2.3: Representação das resistências térmicas e de incrustação nas paredes de um tubo adaptada de Kakaç e Liu (2002)	5
Figura 3.1: Esquema da unidade de estudo.....	10
Figura 3.2: Esquema do P-03 adaptado de Arneth e Stichlmair, (2001).....	11
Figura 3.3: Tela de acompanhamento de processo para a vaporização do fluido A (Fonte: Determinada Petroquímica)	12
Figura 3.4: Calor específico do fluido B em função da temperatura	13
Figura 4.1: Monitoramento da efetividade set-13.....	15
Figura 4.2: Índice de Incrustação set-13	16
Figura 4.3: Monitoramento da efetividade jan-13.....	17
Figura 4.4: Monitoramento da efetividade abr-13	17
Figura 4.5: Monitoramento da efetividade jun-13	17
Figura 4.6: Índice de incrustação jul-11.	18
Figura 4.7: Furo nos tubos (Fonte: Determinada Petroquímica)	19
Figura 4.8: Feixe de tubos plugados (Fonte: Determinada Petroquímica).....	19
Figura 4.9: Monitoramento da efetividade jul-11 (antes dos furos)	19
Figura 4.10: Monitoramento da efetividade set-11 (depois dos furos).....	20
Figura 4.11: Monitoramento da efetividade abr-14	21
Figura 4.12: Monitoramento da carga de processo abr-14	21
Figura 4.13: Custo associado ao consumo de VM no P-04	22

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Parâmetros da equação de correção de NUT	9
Tabela 3.1: Variáveis de estudo do P-03	12
Tabela 3.2: Folha de dados do P-03	14
Tabela 4.1: Quantidade de VM consumida no P-04	22
Tabela 4.2: Custos Associados à manutenção do P-03	23

Lista de Símbolos

q	Calor trocado
m_q	Vazão mássica do fluido quente
m_f	Vazão mássica do fluido frio
Cp_q	Calor específico do fluido quente
Cp_f	Calor específico do fluido frio
T_{q,e}	Temperatura de entrada do fluido quente
T_{q,s}	Temperatura de saída do fluido quente
T_{f,e}	Temperatura de entrada do fluido frio
T_{f,s}	Temperatura de saída do fluido frio
L_q	Calor latente do fluido quente
L_f	Calor latente do fluido frio
U	Coefficiente global de troca térmica
F_i	Resistência térmica do fluido no interior do tubo
F_o	Resistência térmica do fluido fora dos tubos
h_i	Coefficiente de calor convectivo do fluido no interior dos tubos
h_o	Coefficiente de calor convectivo do fluido fora dos tubos
Fd_i	Resistência térmica da incrustação no interior dos tubos
Fd_o	Resistência térmica da incrustação fora dos tubos
F_{TOTAL}	Incrustação total formada no trocador de calor
U_{LIMPO}	Coefficiente global de transferência de calor livre de incrustação
U_{SUJO}	Coefficiente global de transferência de calor considerando a incrustação de projeto
C_q	Capacidade calorífica do fluido quente
C_f	Capacidade calorífica do fluido frio
ε	Efetividade térmica
q_{MÁX}	Máximo calor trocado
C_{mín}	Capacidade calorífica que tiver menor valor entre C _f e C _q

C_{máx}	Capacidade calorífica que tiver maior valor entre C_f e C_q
A	Área de troca térmica
R	Razão entre as capacidades caloríficas dos fluidos quente e frio
r	Razão entre as capacidades caloríficas dos fluidos frio e quente
J	Fator adimensional da correlação do cálculo de NUT
h_f	Coeficiente convectivo do fluido frio
h_q	Coeficiente convectivo do fluido quente
IF	Índice de Incrustação

Lista de Abreviaturas e Siglas

- NUT** Número de Unidades de Transferência
- P** Permutador
- VM** Vapor de média pressão
- MLDT** Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura

1 Introdução

Atualmente, tem-se a necessidade de otimizar e promover cada vez mais a integração energética de processos para evitar gastos excedentes em matéria prima e utilidades. Além disso, exige-se que os equipamentos e o processo produtivo como um todo atendam aos requisitos mínimos de confiabilidade de produção e de segurança.

Os trocadores de calor são amplamente utilizados nos mais diversos ramos da indústria e, por esse motivo, é de fundamental importância que se tenha um controle e monitoramento robusto alinhado a esses equipamentos. Um trocador operando de forma confiável contribui para a melhoria dos índices globais de eficiência energética de uma planta industrial.

O estudo de caso do presente trabalho se concentrará sobre um trocador de calor extremamente crítico no processo, pois esse equipamento necessita de frequentes limpezas e intervenções de manutenção devido à perda de efetividade associada ao aumento da incrustação. Dessa forma, é de extrema importância o uso de métodos de fácil aplicação que permitam o engenheiro responder questões como: Qual é o desempenho térmico atual do trocador de calor? Qual é o momento ideal de parar a operação para limpeza do trocador?

O presente trabalho terá como foco principal o monitoramento da efetividade térmica de um trocador de calor, instalado em uma planta industrial, através de uma metodologia que tem como base o cálculo do número de unidades de transferência. Paralela a essa análise, serão abordadas questões que influenciam diretamente esse estudo como, qualidade da limpeza do trocador, ocorrência de furos nos tubos e variação da carga de processo. Além disso, o acompanhamento da efetividade térmica permitirá que seja possível precisar o momento correto de limpeza do trocador através do acompanhamento do índice de incrustação.

Com o intuito de corroborar a ideia do monitoramento da efetividade térmica desse trocador, serão apresentados os principais impactos econômicos englobados na operação desse equipamento.

2 Revisão Bibliográfica e Conceitos Fundamentais

2.1 Trocadores de Calor

Trocadores de calor são equipamentos que permitem um fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos a diferentes temperaturas. Esses equipamentos possuem uma grande variedade de aplicações, dentre elas: aquecimento e resfriamento de correntes, condicionamento de ar, produção de potência e recuperação de calor em processos (KAKAÇ E LIU, 2002).

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios:

- Recuperadores/Regeneradores
- Processo de transferência: contato direto e indireto
- Geometria de construção: tubos, placas e superfícies estendidas.
- Mecanismo de transferência de calor: uma fase e duas fases
- Configuração do escoamento: paralelo, contracorrente e cruzado.

Em se tratando da geometria de construção, os mais utilizados são os trocadores do tipo tubular, cujo principal representante é o casco e tubo. Formas específicas desse trocador diferem pelo número de passes no casco e nos tubos. Na sua forma mais simples tem-se uma passagem nos tubos e uma no casco. Geralmente são instaladas chicanas para aumentar a transferência de calor, induzindo a turbulência e um componente de velocidade no escoamento cruzado. Na figura 2.1 encontra-se um esquema de um trocador casco e tubo.

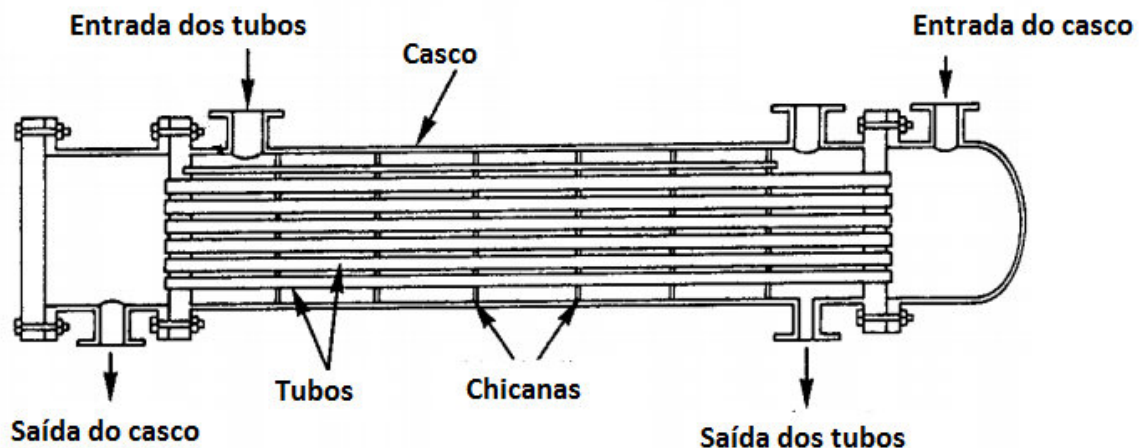


Figura 2.1: Esquema de um trocador de calor casco e tubo adaptado de Kakaç e Liu (2002)

Na indústria química, quando se deseja evaporar determinada substância através de um trocador de calor utilizam-se, frequentemente, aquecedores verticais do tipo termossifão que são caracterizados por proporcionar alta taxa de transferência de calor, baixa tendência de incrustação e não necessitarem de bomba para circulação do fluido, já que o mesmo se desloca por diferença de massa específica.

Quando projetado e operado adequadamente, o líquido possui baixo tempo de residência o que diminui os riscos de degradação térmica. Além disso, um termossifão

possui dimensões compactas e é capaz de operar em grandes intervalos de pressão e temperatura (ARNETH E STICHLMAIR, 2001).

A figura 2.2 apresenta um esquema de termossifão. O fluido A entra líquido na extremidade inferior do trocador e sai na porção superior na forma de vapor ou de uma mistura líquido-vapor. É importante dividir esse tipo de trocador em duas zonas principais: uma em que o líquido A recebe calor do fluido B e outra onde o fluido A é parcialmente evaporado.

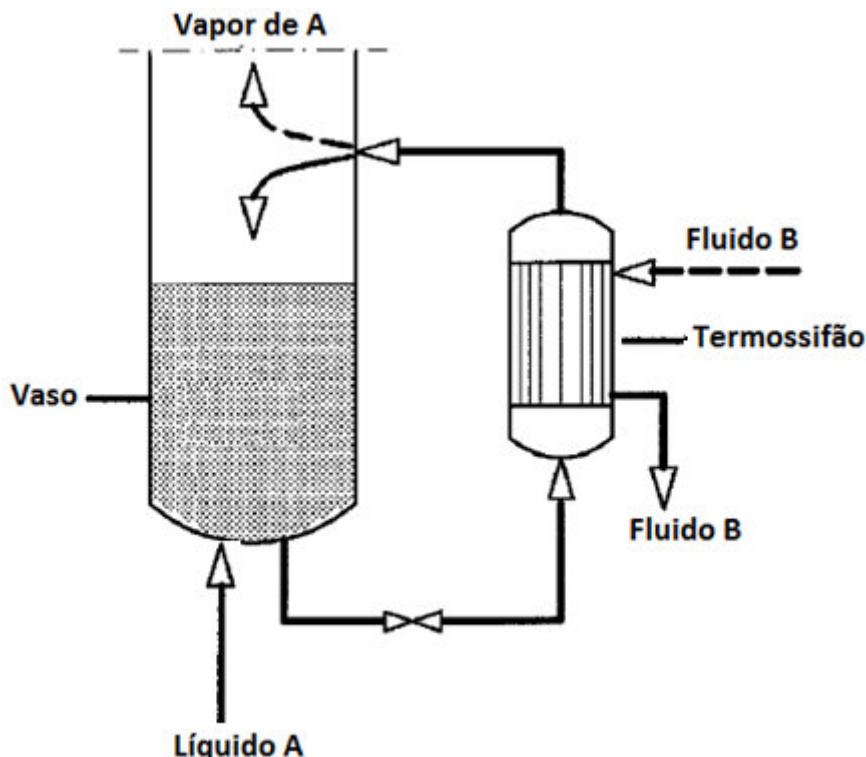


Figura 2.2: Esquema de um termossifão adaptada de Arneth e Stichlmair, (2001)

A taxa de calor em trocadores pode ser determinada através das seguintes equações:

$$q = m_q \times Cp_q \times (T_{q,e} - T_{q,s}) \quad (2.1)$$

$$q = m_f \times Cp_f \times (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (2.2)$$

$$q = m_q \times L_q \quad (2.3)$$

$$q = m_f \times L_f \quad (2.4)$$

Onde os índices q e f , referem-se aos fluidos quente e frio, e e s representam a entrada e saída, respectivamente. As vazões das correntes são definidas como m , Cp é o calor específico, L é o calor latente e T as temperaturas.

2.2 Incrustação

No presente contexto, incrustação pode ser definida como acúmulo de substâncias indesejáveis na superfície de troca térmica. Durante a operação de um trocador de calor, a área de troca térmica suja, o que ocasiona um aumento da resistência térmica e, conseqüentemente, aumento nos custos de bombeamento devido ao aumento da perda

de carga do sistema. Assim, para compensar a formação de incrustação o projeto inicial de um trocador de calor pode exigir o superdimensionamento de bombas e trocadores, utilização de materiais caros, como aço inox, e um plano de limpeza robusto (KAKAÇ E LIU, 2002).

A incrustação influencia significativamente no projeto de um trocador de calor e pode determinar a quantidade de material empregado para a construção do mesmo. Consequentemente, esse fenômeno causa um enorme impacto econômico nos custos iniciais, custos de operação e no desempenho do trocador.

Em Kakaç e Liu (2002) encontram-se identificadas cinco principais categorias de incrustação baseadas na sua causa imediata, como descrito abaixo:

- Incrustação de particulado: ocorre quando sólidos suspensos no fluido acumulam na superfície de troca térmica.
- Incrustação por cristalização: ocorre quando a corrente possui em sua composição sais dissolvidos que, ao atingirem o grau de supersaturação, cristalizam.
- Incrustação por corrosão: ocorre em presença de fluidos corrosivos que, ao entrarem em contato com a área de troca térmica, reagem produzindo produtos de corrosão.
- Incrustação biológica: ocorre quando há deposição ou crescimento de material biológico, como algas e bactérias.
- Incrustação por reação química: depósitos formados a partir de reação química na superfície de troca térmica, onde a superfície do material não é reagente. Polimerização, craqueamento, e cozimento de hidrocarbonetos são exemplos típicos desse tipo de incrustação.

Os principais fatores que influenciam a taxa de incrustação são:

- Temperatura de superfície: quanto maior a temperatura, mais favorece o desenvolvimento de incrustações.
- Velocidade das correntes de processo: quanto menor a velocidade, maior acúmulo de depósitos.
- Qualidade das correntes de processo: quanto maior presença de impurezas, maior a taxa de incrustação.
- Tecnologia aplicada: dispersantes ou inibidores diminuem a taxa de incrustação.

2.3 Coeficiente Global de Transferência de Calor e Resistência Térmica

Em se tratando de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com um coeficiente global de transferência, U , que é definido em termos da resistência térmica total associada ao sistema. Assim, esse coeficiente representa a medida da habilidade global de uma série de barreiras condutivas e convectivas para transferir calor.

Se considerarmos somente as resistências dos fluidos de troca térmica no cálculo e desprezarmos a resistência associada à parede do tubo, U pode ser definido de acordo com a Equação 2.5.

$$U = \frac{1}{F_i + F_o} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}\right)} \quad (2.5)$$

Onde F_i e F_o são as resistências interna e externa à transferência de calor convectivo; h_i e h_o são os coeficientes de transferência de calor convectivo dos fluidos interno e externo aos tubos.

Como já discutido, durante o período de operação de um trocador de calor formam-se depósitos na superfície de troca térmica e, conseqüentemente, o desenvolvimento de uma resistência térmica. Devido a isso, o coeficiente U sofre um decréscimo, como representado na Equação 2.6.

$$U = \frac{1}{F_i + F_o + F_{di} + F_{do}} \quad (2.6)$$

Onde F_{di} e F_{do} representam as resistências das incrustações formadas no lado interno e externo dos tubos.

Na Figura 2.3 é apresentado um esquema de um tubo de trocador de calor com suas respectivas resistências térmicas e de incrustação.

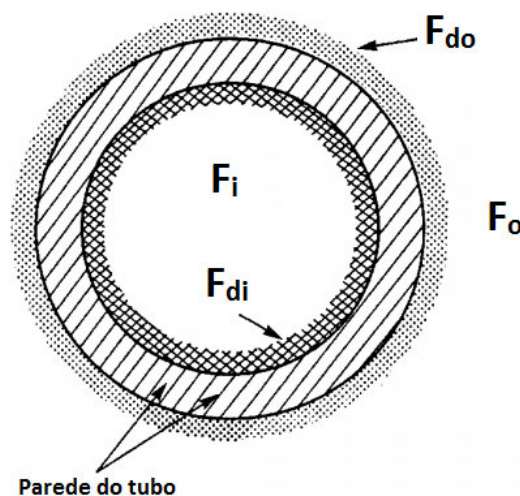


Figura 2.3: Representação das resistências térmicas e de incrustação nas paredes de um tubo adaptada de Kakaç e Liu (2002)

Assim, em trocadores de calor é importante destacar duas variantes de U : coeficiente global de troca térmica limpo (U_{LIMPO}) e sujo (U_{SUJO}). O primeiro caracteriza o coeficiente global térmico livre de incrustações (Equação 2.5), ou seja, quando o trocador está limpo. Já o segundo, leva em consideração a resistência térmica associada à incrustação (Equação 2.6). Dessa forma, define-se o nível de incrustação total de um trocador de calor conforme Equação 2.7.

$$F_{TOTAL} = \frac{1}{U_{SUJO}} - \frac{1}{U_{LIMPO}} \quad (2.7)$$

Os coeficientes convectivos introduzidos na Equação 2.5 além de dependerem de numerosas propriedades dos fluidos, tais como massa específica, viscosidade, condutividade térmica e calor específico, são funções da geometria da superfície e das condições de escoamento (Incropera *et al.*, 2002).

Embora esses coeficientes possam ser obtidos pela solução das equações de camada-limite, somente em condições de escoamento mais simples tais soluções podem ser obtidas de imediato. O procedimento mais prático envolve, frequentemente, o cálculo dos coeficientes convectivos a partir de relações empíricas que possuem intervalos e condições específicas de aplicação.

2.4 Método da Efetividade NUT

Em Incropera *et al.* (2002) encontram-se dois métodos para análise de trocadores de calor: média logarítmica das diferenças de temperatura (MLDT) e o método da efetividade-NUT. O método MLDT é utilizado quando as temperaturas dos fluidos na entrada são conhecidas e as temperaturas de saída ou são especificadas ou podem ser determinadas pelas equações de balanço de energia. Quando as temperaturas não são conhecidas, é preferível utilizar o método da efetividade-NUT.

Em virtude do presente trabalho estar baseado em estudos feitos por Jerónimo *et al.* (1997) e ter o foco direcionado ao monitoramento de efetividade térmica, optou-se por utilizar a metodologia de NUT.

Para definir a efetividade de um trocador de calor, é importante, em primeiro lugar, determinar a taxa de transferência de calor máxima possível, $q_{máx}$. Essa taxa de transferência de calor poderia, em princípio, ser alcançada em um trocador de calor contracorrente com comprimento infinito. Em tal trocador, o fluido com menor capacidade calorífica iria apresentar a máxima diferença de temperaturas possível, $(T_{q,e} - T_{f,e})$. A capacidade calorífica pode ser definida como uma grandeza física que determina a relação entre a quantidade de calor fornecida a um fluido e a variação de temperatura observada no mesmo. Assim, as capacidades caloríficas dos fluidos quente e frio podem ser representadas pelas Equações 2.8 e 2.9, respectivamente (INCROPERA ET AL., 2002).

$$C_q = Cp_q \times m_q \quad (2.8)$$

$$C_f = Cp_f \times m_f \quad (2.9)$$

Dessa forma, efetividade pode ser definida como a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência de calor máxima, tal como apresentado na Equação 2.10.

$$\varepsilon = \frac{q_{TROCADO}}{q_{MÁX}} = \frac{C_q \times (T_{q,e} - T_{q,s})}{C_{min} \times (T_{q,e} - T_{f,e})} = \frac{C_f \times (T_{f,s} - T_{f,e})}{C_{min} \times (T_{q,e} - T_{f,e})} \quad (2.10)$$

Para o método NUT é válido que, para qualquer trocador de calor, a efetividade é uma função de NUT, das capacidades caloríficas dos fluidos e da geometria do trocador de calor, tal como explicitado na Equação 2.11.

$$\varepsilon = f \left(NUT, \frac{C_{min}}{C_{max}}, Geometria \right) \quad (2.11)$$

A razão C_{min} / C_{max} pode ser igual à C_f / C_q ou C_q / C_f , dependendo das magnitudes relativas das taxas de capacidades caloríficas dos fluidos quente e frio. O número de unidades de transferência (NUT) é um parâmetro adimensional amplamente utilizado na análise de trocadores de calor, sendo definido de acordo com a equação 2.12.

$$NUT = \frac{U \times A}{C_{min}} \quad (2.12)$$

Onde U representa o coeficiente global de troca térmica, A é a área de troca de calor e C_{min} representa a menor capacidade calorífica entre os fluidos quente e frio.

Várias expressões foram desenvolvidas para medir a efetividade térmica considerando diferentes configurações de trocadores e condições particulares de processo. Para um trocador de calor do tipo (1-n), ou seja, um passe no casco e n passes nos tubos, a efetividade pode ser calculada em função de C_{min} / C_{max} e NUT como na equação 2.13 (INCROPERA ET AL., 2002).

$$\varepsilon = \frac{2}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} + \sqrt{1 + \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)^2}} \times \left(\frac{-NUT \times \sqrt{1 + \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)^2}}{1 + e} \right) \left(\frac{-NUT \times \sqrt{1 + \left(\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)^2}}{1 - e} \right) \quad (2.13)$$

Quando a capacidade térmica do fluido quente for menor que a do frio, a razão C_{min} / C_{max} será representada por R . Já, quando a capacidade térmica do fluido frio for a menor, a razão será identificada como r . Assim, tem-se que

$$R = \frac{C_q}{C_f} \quad (2.14)$$

$$r = \frac{C_f}{C_q} \quad (2.15)$$

Para o caso de evaporadores e condensadores, ou seja, em trocadores onde há mudança de fase, R e r são iguais a zero, pois como não há variação de temperatura, $C_{máx}$ tende a infinito. Nesse caso, para qualquer configuração de escoamento, o cálculo da efetividade dá-se através da Equação 2.16 (INCROPERA ET AL., 2002).

$$\varepsilon = 1 - e^{-NUT} \quad (2.16)$$

2.5 Monitoramento da Efetividade Térmica

Como mostrado através da Equação 2.12, a determinação de NUT é diretamente dependente do cálculo do coeficiente global de troca térmica que por sua vez é dependente da determinação dos coeficientes convectivos dos fluidos quente e frio e das resistências térmicas de incrustação (Equações 2.5 e 2.6). De acordo com Jerónimo *et al.* (1997), sob condições de trabalho constantes, a aplicação da Equação 2.7 se torna simples para monitorar o grau de incrustação em trocadores. Tal situação não ocorre em grande maioria de plantas industriais cujos dados de operação variam modificando as propriedades dos fluidos e, dessa forma, as magnitudes dos coeficientes convectivos de transferência de calor.

Para monitorar o grau de incrustação, Jerónimo *et al.* (1997) basearam-se no cálculo de três efetividades térmicas: efetividade medida, efetividade calculada limpa e

efetividade calculada suja. De acordo com Tonin (2003), a simplicidade desse método reside na medição de quatro temperaturas e uma vazão.

A efetividade medida é aquela calculada a partir das temperaturas de entrada e saída do trocador de calor, como mostrado na equação 2.10.

Jerónimo *et al.* (1997) definem efetividade calculada limpa como a efetividade predita para um trocador de calor limpo, já a efetividade calculada suja é a efetividade considerando as resistências térmicas dos depósitos previstas no projeto do trocador. Para estimar os valores dessas efetividades, utiliza-se a equação 2.16 que é dependente da determinação de NUT .

Devido a isso, em seu trabalho, Jerónimo *et al.* (1997) estudaram a influência da carga de processo no NUT e consideraram que o coeficiente convectivo interno aos tubos para regime turbulento depende da taxa mássica na potência 0,8. Já para o lado do casco, essa dependência é aproximadamente 0,8 quando o fluido escoar paralelamente aos tubos e 0,6 quando o escoamento é perpendicular aos tubos. Para o lado do casco, os autores assumem um valor médio de 0,7.

Portanto, quando as vazões dos fluidos variam, a efetividade do trocador calculada na condição de projeto deve ser corrigida para que se possa compará-la com a efetividade medida do trocador nas condições operacionais. Para levar essa variação em consideração no cálculo de efetividade, são definidos quatro casos especiais para a determinação do número de NUT , como mostrado na equação 2.17 (JERÓNIMO ET AL., 1997).

$$NUT = \frac{NUT_{PROJETO} \times C_{PROJETO}^a}{C^{a \times J}} \quad (2.17)$$

$$J = 1 + \left(\frac{U}{h}\right)_{PROJETO} \times \left[\left(\frac{R}{R_{PROJETO}}\right)^b \times \left(\frac{C}{C_{PROJETO}}\right)^c - 1 \right] \quad (2.18)$$

Os parâmetros das Equações 2.17 e 2.18 são de acordo com a localização do fluido quente (casco ou tubos) no trocador são exibidos na Tabela 2.1 e variam com a posição do fluido quente, casco ou tubos, no trocador de calor.

Tabela 2.1: Parâmetros da equação de correção de NUT

		Parâmetros					
Caso	Característica	a	b	c	C	R	h
A	Fluido quente no casco e $R < 1$	0,3	0,8	0,2	C_q	R	h_f
B	Fluido quente nos tubos e $R < 1$	0,2	0,7	0,3	C_q	R	h_f
C	Fluido quente no casco e $r < 1$	0,2	0,7	0,3	C_f	r	h_q
D	Fluido quente nos tubos e $r < 1$	0,3	0,8	0,2	C_f	r	h_q

Com objetivo de determinar o desempenho térmico de trocadores de calor através da incrustação formada ao longo do tempo de operação, Jerónimo *et al.* (1997) definiram um índice (IF), denominado índice de incrustação, representado pela Equação 2.19.

$$\%IF = \frac{(\varepsilon_{LIMPA} - \varepsilon_{MEDIDA})}{(\varepsilon_{LIMPA} - \varepsilon_{SUJA})} \times 100 \quad (2.19)$$

De acordo com os autores, esse índice permite avaliar quando um trocador precisa ser limpo. Para situações que IF for igual a zero, o trocador está limpo e a efetividade medida é igual à efetividade calculada limpa; Para valores de IF compreendidos entre 0 e 100 %, o trocador está operando em condições previstas no projeto; Já para o caso que o índice for maior ou igual 100 %, o trocador está sujo e necessita de limpeza.

3 Formulação do Problema ou Estudo de Caso

3.1 Descrição da Unidade

O trocador de calor que será o objeto de estudo nesse trabalho faz parte de uma rede de troca térmica de uma planta petroquímica industrial e é utilizado para a vaporização do fluido A.

Em um determinado processo petroquímico, depois de passar por uma unidade de remoção de impurezas, um fluido A sofre um processo de aquecimento, passando pelo pré-aquecedor (P-01) e, em seguida, pelo aquecedor (P-02), que promovem a elevação da sua temperatura até próximo ao seu ponto de ebulição (140 °C), utilizando, para tanto, como fluido de aquecimento, uma corrente de fluido B. Do P-02 a corrente segue para o vaso onde é vaporizada por dois trocadores denominados vaporizadores primário e secundário, P-03 e P-04, respectivamente. O P-03 aproveita o calor da corrente do fluido B, sendo que a carga térmica restante, necessária para a vaporização do fluido A, é suprida pelo P-04 que utiliza vapor dessuperaquecido como meio de aquecimento. O fluido A, já na fase vapor, sai do vaso dirigindo-se ao superaquecedor (P-05), onde troca calor com a mesma corrente dos permutadores P-01, P-02 e P-03.

Na Figura 3.1 encontra-se um esquema do processo descrito anteriormente cujas correntes identificadas pelas cores azul, vermelho e verde representam, respectivamente, o fluido A, fluido B e vapor dessuperaquecido.

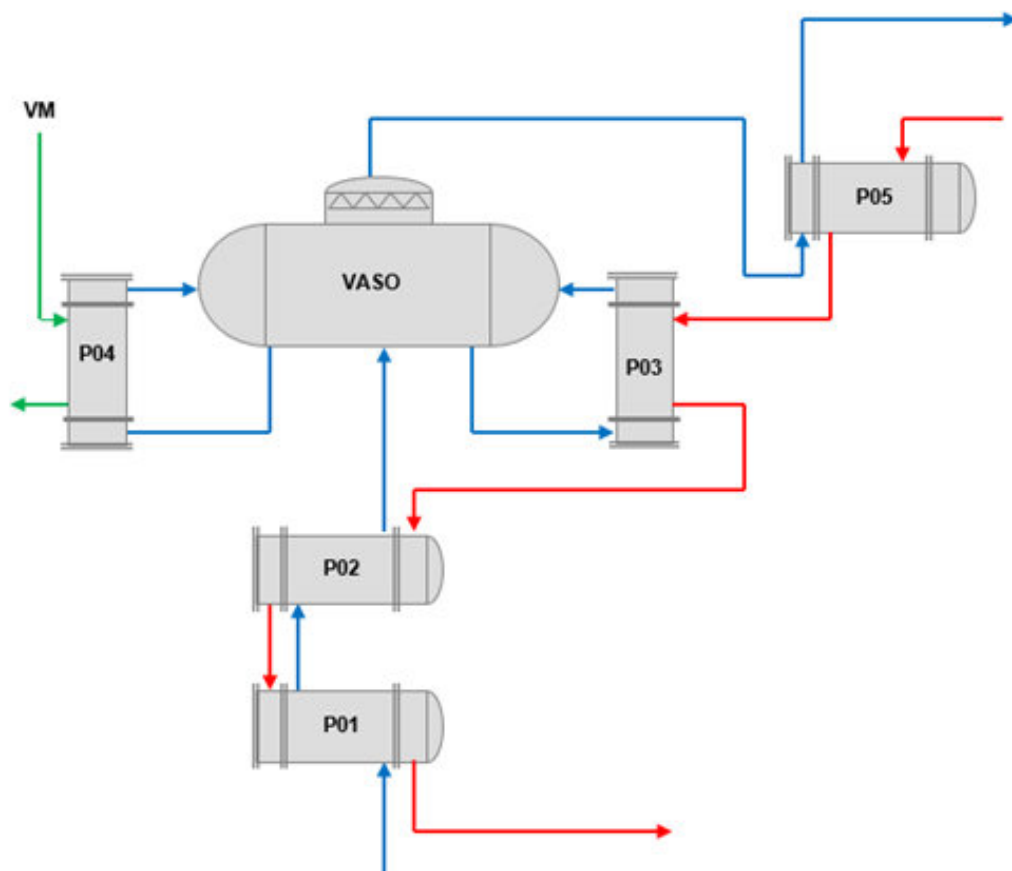


Figura 3.1: Esquema da unidade de estudo

Frequentemente, ocorre perda de troca térmica nos permutadores laterais do vaso de vaporização (P-03 e P-04). Tal fenômeno é ocasionado, comumente, por obstruções nas linhas em decorrência do tempo de campanha e da qualidade da carga, potencializados pela concentração de contaminantes pesados, como hidrocarbonetos.

Outro problema refere-se aos limites de temperatura do material dos permutadores. Como a incrustação em alguns permutadores se desenvolve rapidamente, é extremamente importante que as temperaturas sejam mantidas dentro dos limites de operação para que não acarrete em defeitos, como o surgimento de furos nos tubos dos trocadores.

Devido à tamanha criticidade do processo e a importância de manter o bom funcionamento dos permutadores é de extrema importância o monitoramento da efetividade térmica desses equipamentos e a determinação do momento certo de limpeza dos mesmos.

3.2 Seleção do trocador de estudo

Com o intuito de fazer um estudo mais detalhado, optou-se por direcionar o foco do trabalho para trocador de calor P-03, já que este equipamento exerce papel fundamental na vaporização do fluido A e, além disso, tem sido motivo de limitações operacionais, seja pelo excesso de incrustação formada, seja pela ocorrência de furos nos tubos.

Esse trocador funciona com o princípio de termossifão, como discutido no item 2.1. Nele, o fluido A entra líquido na base do trocador e vaporiza parcialmente dentro dos tubos. A fração vaporizada dirige-se para o P-05 e a fração líquida permanece no vaso para ser vaporizada posteriormente. A Figura 3.2 ilustra esse equipamento, bem como as variáveis de interesse.

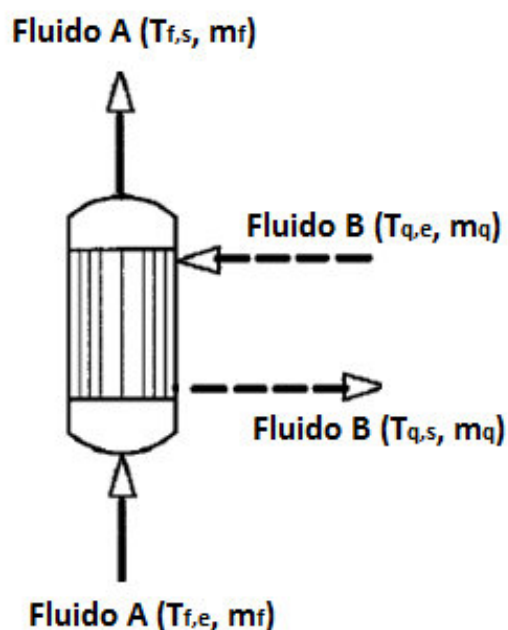


Figura 3.2: Esquema do P-03 adaptado de Arneth e Stichlmair, (2001)

3.3 Aquisição dos dados operacionais

Para iniciar o estudo, foi preciso verificar quais variáveis de processo poderiam ser medidas. Para isso, utilizou-se o software *Aspen Process Explorer*[®] que permite visualizar, analisar, monitorar e acessar os dados de operação de determinada planta, como mostrado na Figura 3.3.

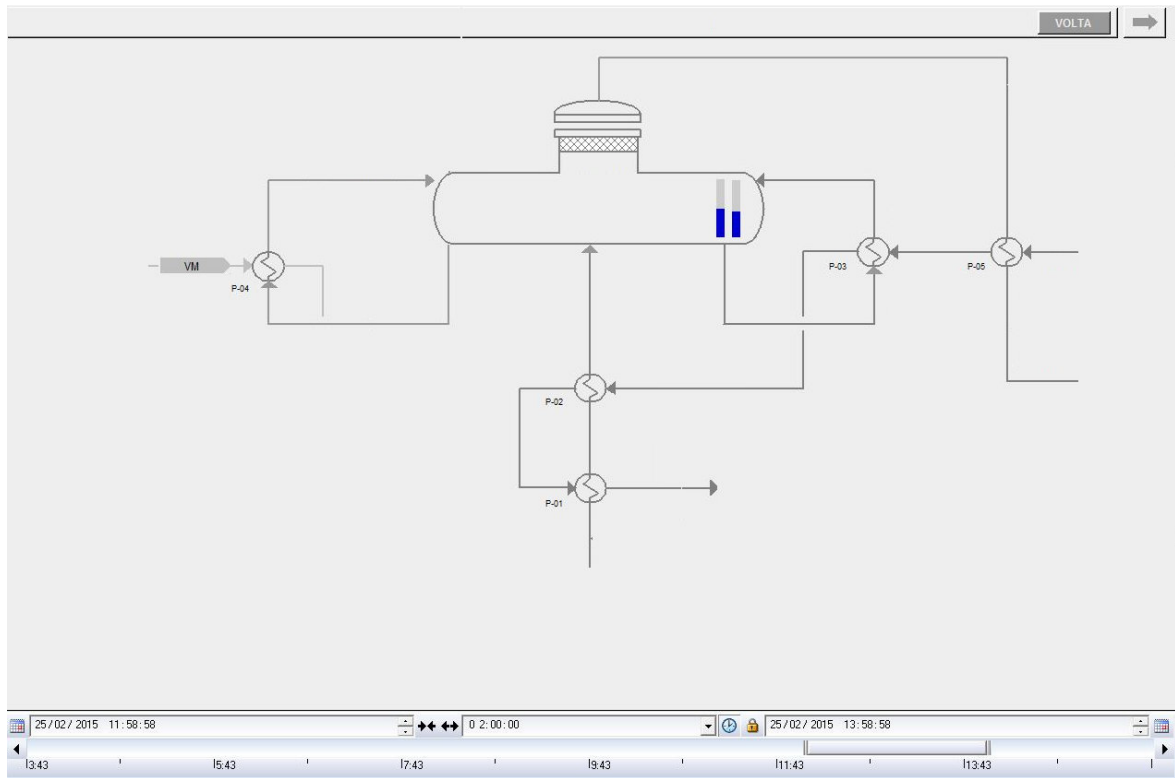


Figura 3.3: Tela de acompanhamento de processo para a vaporização do fluido A (Fonte: Determinada Petroquímica)

Para os períodos analisados nesse trabalho foram utilizados valores médios diários de carga e temperatura.

Para as variáveis que não possuem medida, foi preciso utilizar equações de balanço de energia e determinadas considerações do processo e operação que serão discutidas ao longo do desenvolvimento desse trabalho. A Tabela 3.1 apresenta a forma de aquisição das variáveis para o permutador 3.

Tabela 3.1: Variáveis de estudo do P-03

Fluido A (Fluido Frio)			Fluido B (Fluido Quente)		
T_e	T_s	m_f	T_e	T_s	m_q
INFERIDA	MEDIDA	CALCULADA	MEDIDA	MEDIDA	MEDIDA

Como não há medição para T_e do fluido frio, foi considerado que há equilíbrio entre as fases do fluido A no vaso e as temperaturas de entrada e saída são iguais devido à mudança de fase no trocador.

Para o cálculo da efetividade medida do P-03, fez-se uso da equação 2.10, como mostrado na equação 3.1

$$\varepsilon_{MEDIDA} = \frac{C_q \times (T_{q,e} - T_{q,s})}{C_q \times (T_{q,e} - T_{f,e})} = \frac{(T_{q,e} - T_{q,s})}{(T_{q,e} - T_{f,e})} \quad (3.1)$$

Observa-se que a capacidade térmica mínima é do fluido quente, pois como o fluido frio muda de fase sua capacidade térmica tende ao infinito, resultando em R igual a zero. Assim, dentre as correlações desenvolvidas por Jerónimo *et al.* (1997), a que se aplica para o presente estudo é o caso A, cuja equação pode ser observada a seguir.

$$NUT = \frac{NUT_{PROJETO} \times C_{PROJETO}^{0,3}}{C^{0,3} \times J} \quad (3.2)$$

$$J = 1 + \left(\frac{U}{h_f}\right)_{PROJETO} \times \left[\left(\frac{R}{R_{PROJETO}}\right)^{0,8} \times \left(\frac{C_q}{C_{qPROJETO}}\right)^{0,2} - 1 \right] \quad (3.3)$$

As incógnitas das equações 3.2 e 3.3 com índice projeto são constantes e obtidas através da folha de dados do trocador de calor. As demais variáveis foram determinadas através do banco de dados do *Aspen Process Explorer*®.

Os valores de calor específico do fluido quente, necessários para o cálculo das capacidades caloríficas do fluido B, foram estimados através de uma correlação linear cujos dados foram obtidos das folhas de dados dos permutadores 1, 2, 3 e 5. Assim, a relação entre o calor específico do fluido B com a temperatura é representada no gráfico da Figura 3.4.

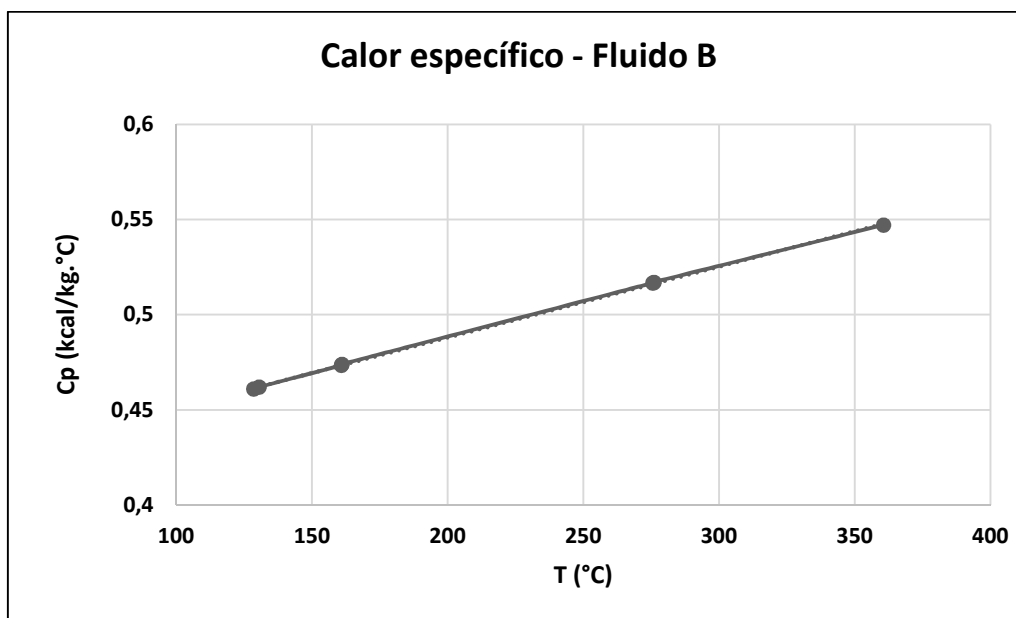


Figura 3.4: Calor específico do fluido B em função da temperatura

Dessa forma, o valor do calor específico do fluido B para cada dia de operação foi estimado através da Equação 3.2, cujo valor de temperatura é obtido através de uma média aritmética das temperaturas de entrada e saída do permutador 3.

$$C_p = 0,0004 \times T_{MÉDIA} + 0,4135 \quad (3.4)$$

A carga de operação do fluido A, foi calculada através de um balanço de energia entre os dois fluidos, através das Equações 2.1 e 2.4. Assim, desprezando-se, perdas de calor para o ambiente e considerando uma fração de evaporação de 20 % (valor de projeto) para o fluido A, tem-se a Equação 3.3.

$$m_f = \frac{m_q \times C_p \times (T_{q,e} - T_{q,s})}{0,2 \times L_f} \quad (3.5)$$

Na tabela 3.2 estão apresentados os dados de projeto do trocador necessários para o desenvolvimento desse trabalho.

Tabela 3.2: Folha de dados do P-03

		Casco (Entrada/Saída)		Tubo (Entrada/Saída)	
Fluido		Fluido B		Fluido A	
Taxa mássica total	kg/h	69390		103428	
Temperatura	°C	275	161	154	154
Quantidade de vapor	%	-	-	-	20
Resistência da incrustação	m ² .h.°C.kcal ⁻¹	0,0002		0,0005	
Calor latente	kcal.kg ⁻¹	-	-	183	185
Calor específico	kcal.kg.°C ⁻¹	0,51	0,47	1,01	0,47/1,00 (V/L)
Coeficiente Convectivo	kcal.h ⁻¹ .m ⁻² .°C ⁻¹	402,0		1899,7	
U _{LIMPO}	kcal.m ⁻² .h ⁻¹ .°C ⁻¹	161,0			
U _{SUJO}	kcal.m ⁻² .h ⁻¹ .°C ⁻¹	144,7			

O valor de U_{SUJO} , exposto na tabela acima, foi estimado através de U_{LIMPO} e das resistências térmicas das incrustações previstas no projeto através da Equação 2.7.

$$U_{SUJO} = \left(Fd_i + Fd_o + \frac{1}{U_{LIMPO}} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

4 Resultados

Os resultados serão estruturados de forma a demonstrar, primeiramente, o monitoramento da efetividade térmica do P-03. Após, serão observados benefícios que esse monitoramento pode trazer como, por exemplo, evolução do índice de incrustação, qualidade da limpeza do trocador e identificação de problemas de operação.

O período escolhido para análise dos dados desse permutador foi a partir de julho de 2011, mês que o P-03 antigo foi trocado por um novo.

4.1 Monitoramento da Efetividade

Como destacado por Jerónimo *et al.* (1997), o desempenho térmico de um trocador de calor pode ser obtido por meio do cálculo de três efetividades: calculada limpa, calculada suja e medida. Segundo o autor, no início da operação a efetividade medida coincide com a calculada limpa e ao longo da operação vai diminuindo até alcançar a efetividade calculada suja, cujo ponto sinaliza que o trocador necessita de limpeza. Dessa forma, o monitoramento da efetividade além de permitir um controle visual do desempenho da planta, possibilita ao engenheiro analisar o quão longe das situações de projeto (limpa ou suja) o trocador se encontra e definir o momento mais adequado para sua limpeza.

A Figura 4.1 mostra o monitoramento da efetividade do P-03 ao longo de nove meses de operação. As limpezas ocorreram em final de ago-13 e final fev-14.

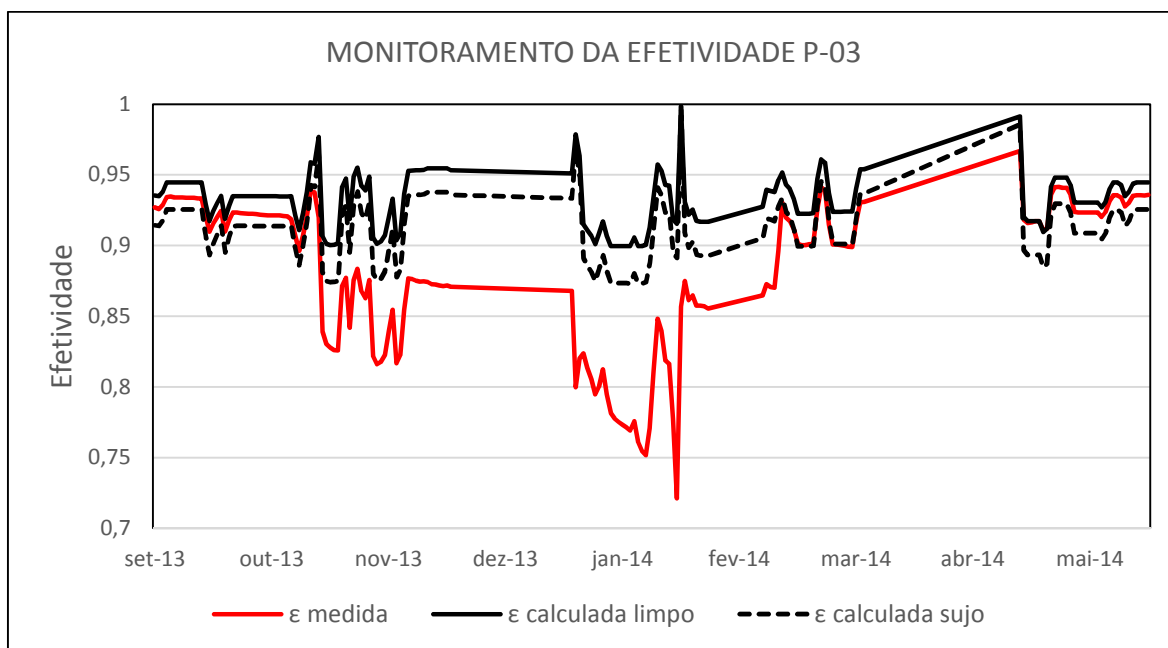


Figura 4.1: Monitoramento da efetividade set-13

Observa-se que, em set-13, após a limpeza do trocador, a efetividade medida possui valores próximos da efetividade calculada limpa. Ao longo da operação, a efetividade medida do trocador alcança, no final de outubro, a efetividade na condição suja, ou seja, o nível de incrustação presente no trocador atinge o valor máximo da resistência térmica estabelecida no projeto. Comportamento análogo foi encontrado por Tonin, (2003) que realizou estudo análogo em uma rede de trocadores de calor de uma refinaria.

De acordo com a figura 4.1, o trocador diminui sua efetividade até um valor próximo de 0,75, quando então é realizada sua limpeza em final de Fev-14. O efeito dessa ação fica nitidamente visível em mai-14, onde os valores de efetividade retornam ao patamar da condição limpa.

Além disso, é importante ressaltar que a efetividade medida segue o mesmo comportamento das efetividades calculadas o que permite que o engenheiro possa fazer análises simultâneas de diferentes cenários (limpo ou sujo) de operação do trocador.

Na Figura 4.2, vê-se a evolução do índice de incrustação para o mesmo período do gráfico da Figura 4.1. Próximo a 0 % indica que o trocador está limpo e igual a 100 % indica que o trocador opera na condição suja de projeto. Nos dois primeiros meses o trocador opera entre 0 e 100 %, o que significa uma condição prevista no projeto. Após esse período, o índice de incrustação chega a valores próximo de 800 %, ou seja, 800 % da incrustação estabelecida em projeto.

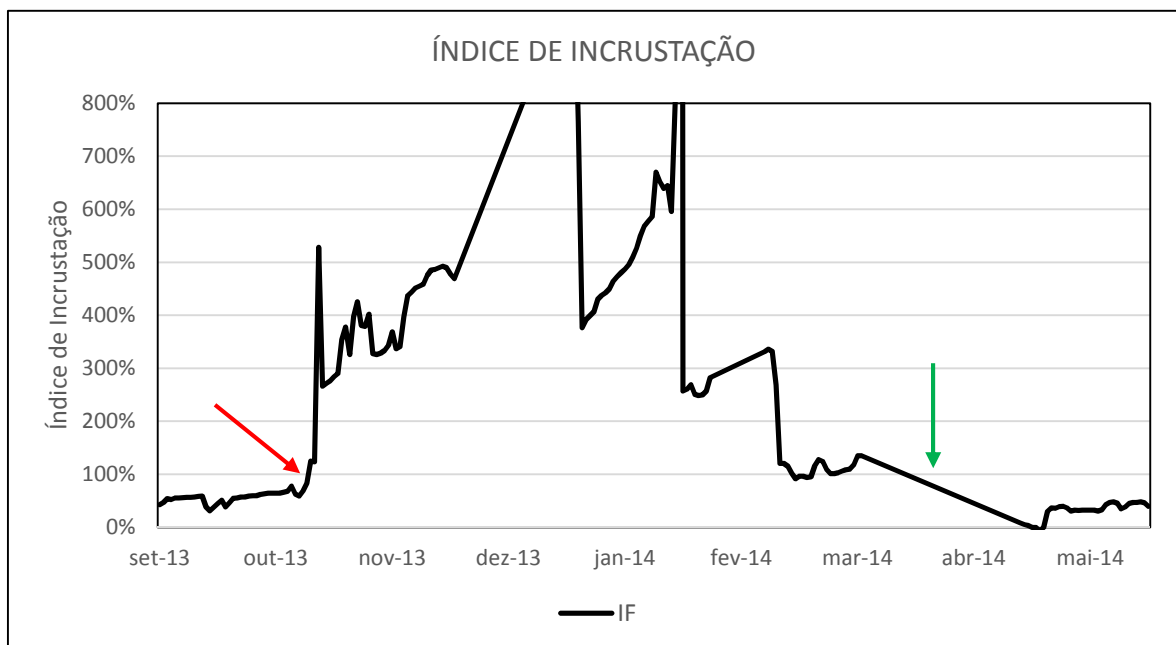


Figura 4.2: Índice de Incrustação set-13

Assim, pela análise da Figura 4.2, nota-se o momento exato em que o trocador necessita ser limpo (sinalizado pela flecha vermelha). Da mesma forma, percebe-se que entre mar-14 e abr-14 (flecha verde), após a limpeza do trocador, o índice de incrustação retorna aos valores iniciais de operação.

Em seu trabalho, Tonin (2003) verificou semelhança entre o comportamento das curvas de resistência térmica da incrustação e do índice de incrustação mostrando a equivalência entre essas duas análises.

O fato de IF não iniciar em 0 % em set-13 e mai-14 será explicado no item 4.1.1 que abrangerá os detalhes da limpeza desse trocador.

Com o intuito de fazer uma análise mais detalhada desse estudo, é importante levar em consideração alguns efeitos importantes para a planta em questão: qualidade da limpeza do trocador, ocorrência de furo nos tubos e variações na carga de processo.

4.1.1 Efeito da Qualidade de Limpeza do P-03

Para analisar esse efeito são demonstrados nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 três períodos de operação antecedidos por limpeza do P-03 e, a partir do monitoramento das efetividades, será avaliada a qualidade de limpeza feita no trocador de calor.

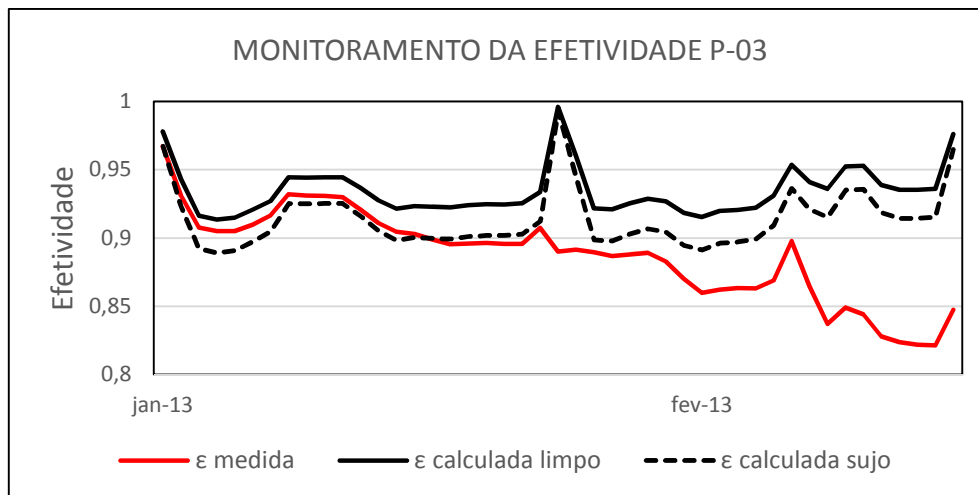


Figura 4.3: Monitoramento da efetividade jan-13

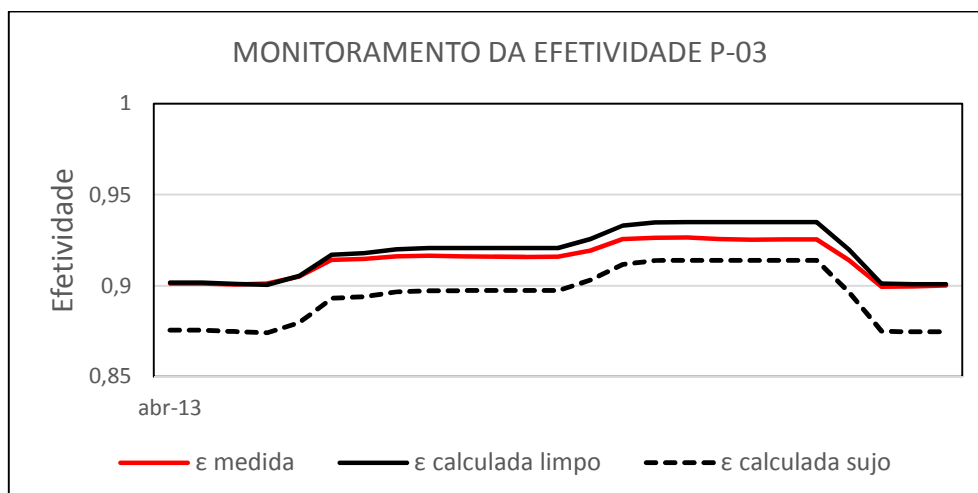


Figura 4.4: Monitoramento da efetividade abr-13

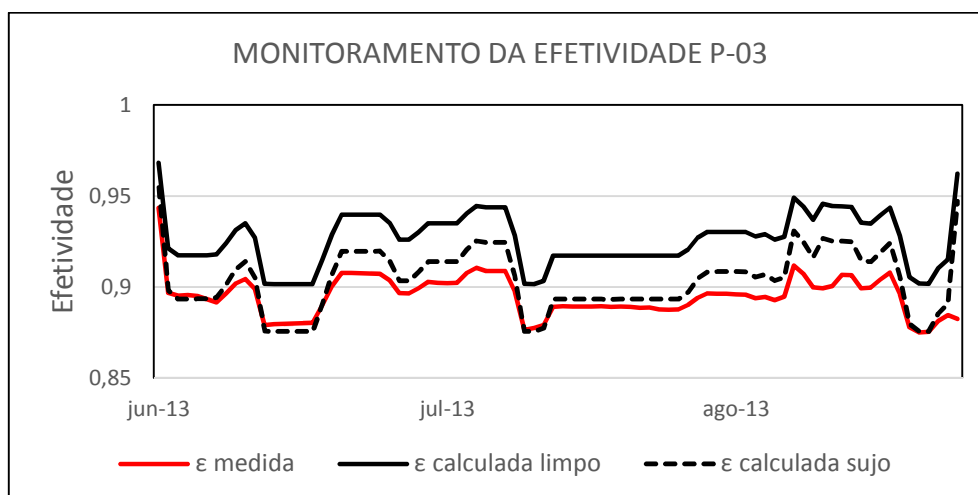


Figura 4.5: Monitoramento da efetividade jun-13

Nota-se que nos três períodos analisados, a efetividade possui um valor inicial de aproximadamente 0,9 ou maior, o que revela certo padrão constante de qualidade de limpeza.

Paralelamente, essa análise permite verificar quando a limpeza é realmente necessária. Em casos como o da Figura 4.4, a efetividade medida não ultrapassa valores inferiores a 0,9, o que poderia postergar a limpeza do trocador realizada em mai-14.

Em determinados casos, o trocador inicia a operação com valores de efetividade medida muito próximos dos da calculada suja mesmo estando limpo. Com o objetivo de justificar esse comportamento, Jerónimo *et al.* (1997) afirmam que, apesar dos efeitos de variação de carga serem levados em consideração, em alguns casos a efetividade calculada (limpa ou suja) não possui o mesmo comportamento da efetividade medida, não somente os valores absolutos como o próprio comportamento da curva. Segundo o autor, isso pode ser explicado por uma estimativa de incrustação não condizente à severidade de trabalho do trocador.

Outro fato importante a ser destacado a respeito da limpeza é que por ser um trocador do tipo espelho fixo, a limpeza no casco não é realizada o que pode ser um dos motivos do trocador iniciar a operação em set-13 (Figura 4.1) com um índice de incrustação diferente de zero. Para analisar o impacto da não limpeza do casco no monitoramento da efetividade, estudou-se o período de jul-11 que coincide com período de troca do P-03, ou seja, a Figura 4.6 reflete as condições de incrustação de um equipamento novo.

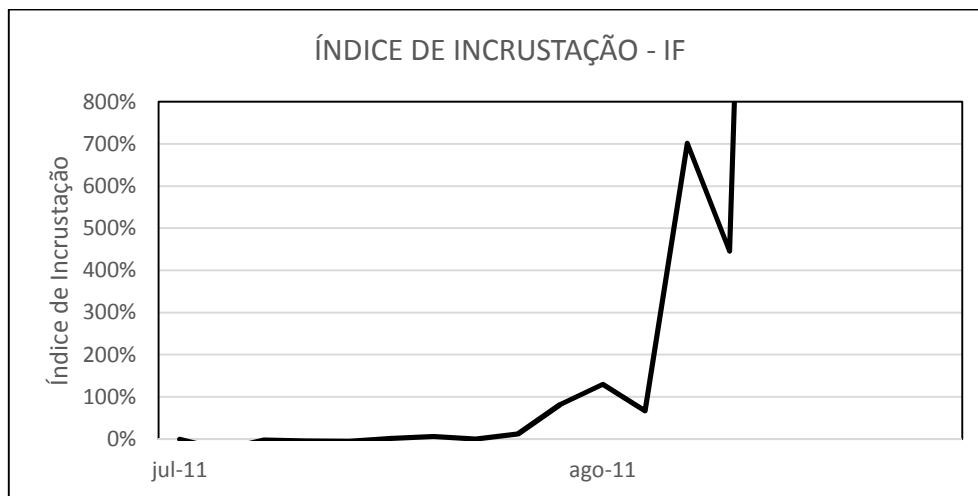


Figura 4.6: Índice de incrustação jul-11.

Como esperado, o trocador inicia a operação com um IF igual a zero já que está livre de incrustações, tanto no lado do casco, como nos tubos. Tal constatação permite confirmar a praticidade e a confiabilidade da metodologia utilizada.

4.1.2 Efeito de Furos nos Tubos do P-03

Furos nos tubos de trocadores de calor, como mostrado de forma genérica na Figura 4.7, ocorrem com frequência em indústrias, seja pelo aumento da incrustação, degradação de material ou aumento excessivo de pressão e carga de processo.

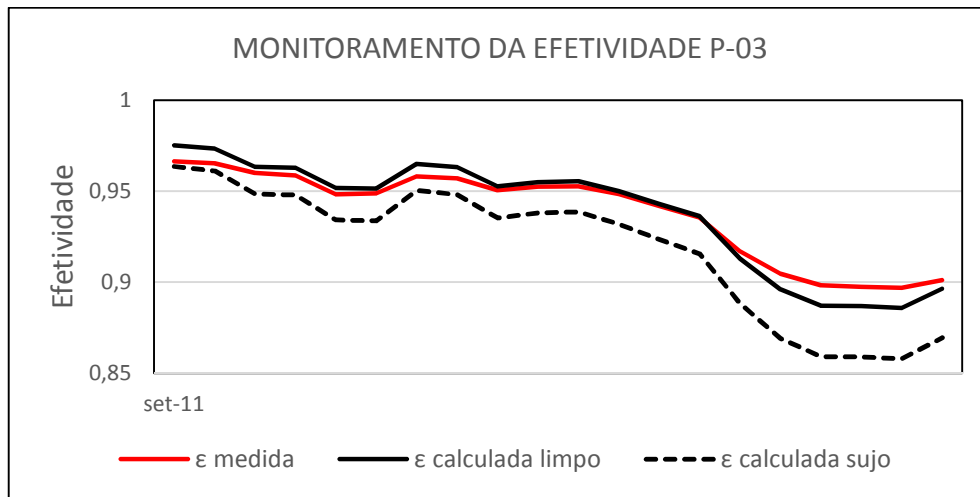


Figura 4.10: Monitoramento da efetividade set-11 (depois dos furos)

Um ponto importante a ser discutido é que no final de jul-11 a efetividade medida sofre um decaimento abrupto que, para esse caso, coincide com o evento de furos nos tubos do trocador. Em contrapartida, esse decaimento não é percebido para as efetividades calculadas que, por serem obtidas através da medição da carga de processo, possuem uma sensibilidade de medida menor que a temperatura. Isso permite enfatizar outro ponto importante de se monitorar três efetividades térmicas, pois possibilita explicar e identificar falhas de processo como essa.

Se compararmos as efetividades medidas dos gráficos antes e depois dos furos nos tubos, percebemos que o valor é praticamente o mesmo. É evidente que acontecimentos como esse impactam diretamente na efetividade térmica do trocador, pois quando os tubos são plugados, tem-se uma diminuição de área de troca térmica. Nesse caso, a quantidade de tubos furados não foi suficiente para afetar consideravelmente o desempenho do trocador, pois o mesmo, assim como grande parte dos equipamentos industriais, é dimensionado e projetado com uma determinada folga de projeto.

4.1.3 Efeito da Carga de Processo

Com o objetivo de avaliar a influência da variação de carga de operação no monitoramento da efetividade, alinhou-se com a operação da planta para simular condições que a planta não opere com 100 % da capacidade. Os resultados são exibidos nas Figuras 4.11 e 4.12.

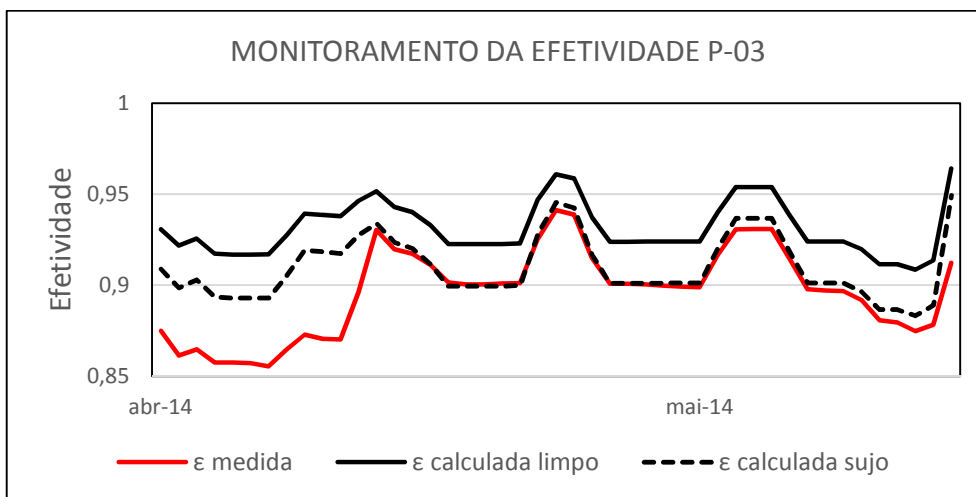


Figura 4.11: Monitoramento da efetividade abr-14

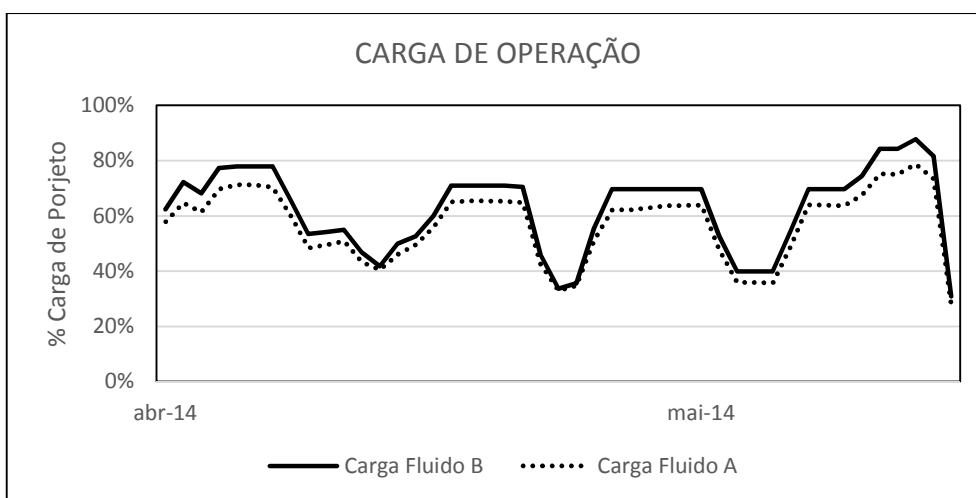


Figura 4.12: Monitoramento da carga de processo abr-14

Observa-se nitidamente que as efetividades possuem um comportamento oposto à razão de carga: quando a carga aumenta, a efetividade diminui. O motivo desse efeito pode ser explicado pelo fato do aumento de carga implicar em o trocador trabalhar sempre cheio e, além disso, diminuir o tempo de residência dos fluidos no equipamento proporcionando um menor tempo de contato para a troca térmica.

4.2 Impacto financeiro

Com o intuito de compensar a perda de efetividade do P-03 ao longo da operação, o P-04 vaporiza o fluido A do vaso utilizando vapor de média pressão (VM). Dessa forma, é possível associar o decaimento da efetividade do P-03 com o aumento de consumo de VM, cujo preço é regulado de acordo com a matriz energética utilizada nas caldeiras. Para o presente trabalho, o preço do VM considerado será de R\$70,00 para cada tonelada de VM utilizada, cujo valor tem como referência determinada Petroquímica.

A Figura 4.13 apresenta o custo relativo ao consumo de VM no P-04 para o mesmo período do gráfico apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.13: Custo associado ao consumo de VM no P-04

Como já explicado e discutido anteriormente, constata-se, na Figura 4.13, um aumento no consumo de VM ao longo de cada período de operação, com exceção de alguns períodos caracterizados por picos associados a vazões extremamente baixas.

Para facilitar a compreensão e visualização do impacto econômico será feita uma média da carga de VM em cada período de operação retratado no gráfico acima. Além disso, considerar-se-á esse valor como constante durante cada período de operação. Assim, podemos resumir o gráfico da Figura 4.13 através da tabela abaixo:

Tabela 4.1: Quantidade de VM consumida no P-04

Período	Carga Média de VM (ton/h)	Custo médio de VM (R\$/ton)	Custo total de VM (R\$/dia)
Set-13 a Dez-13	7,06	70,00	11.860,80
Jan-14 a Fev-14	7,55	70,00	12.684,00
Fev-14 a Mar-14	10,13	70,00	17.018,40
Abr-14 a Mai-14	6,91	70,00	11.608,80

Quando se comparam os valores de custo relativo ao consumo de VM nos períodos de máxima limpeza (Set-13) e máxima sujeira (Jan-14), conclui-se que, a perda de efetividade no P-03 implica num gasto excessivo médio de, aproximadamente, R\$ 5.200,00 por dia de operação. Além disso, um trocador sujo aumenta a perda de carga do sistema e elevam as chances da ocorrência de furos nos tubos, seja pela degradação do material do trocador através da elevação da temperatura, seja pelo aumento de pressão nos tubos devido à perda de área interior.

Por isso, para completar a análise econômica, é importante levar em consideração custos associados com a limpeza do trocador e eventos como a ocorrência de furos nos

tubos. Os valores de custos médios, exibidos na Tabela 4.2, foram adquiridos através da área de manutenção da planta.

Tabela 4.2: Custos Associados à manutenção do P-03

Evento	Custo Estimado de Manutenção
Limpeza	R\$ 35.000,00
Furo nos tubos	R\$ 150.000,00

Comparando os valores apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, conclui-se que em, aproximadamente, seis dias de operação com o trocador sujo, equivalem ao montante gasto para limpeza do mesmo. Além disso, é de fundamental importância destacar o impacto tanto econômico, como operacional, quando furam os tubos do trocador, pois além de possuir um custo de manutenção de cerca de quatro vezes maior que a limpeza, esse evento ocasiona perda de produção, contaminação de correntes de processo e perturbações nas demais variáveis planta.

5 Conclusões

Através desse estudo e da aplicação da técnica de monitoramento da efetividade foi possível acompanhar os períodos em que o trocador diminui seu desempenho térmico. Associado a isso, foi possível calcular o índice de incrustação do trocador que é importante para a decisão de parada para limpeza do equipamento.

Além disso, esse estudo permitiu que fosse possível avaliar a qualidade da limpeza realizada no trocador, pois em todos períodos analisados que foram antecidos por limpeza, a efetividade medida retornou a valores próximos da situação limpa de projeto, garantindo um padrão de limpeza. Paralelamente, foi possível analisar o efeito da incrustação no casco que não é limpo devido à dificuldade de manutenção.

Com o monitoramento das três efetividades foi possível identificar incidentes no processo, como a ocorrência de furos nos tubos, cuja perda de efetividade foi sentida somente pela efetividade medida. Do mesmo modo, observou-se a influência da variação da carga de operação na efetividade que, como esperado, possuem comportamentos opostos.

Por fim, realizou-se uma análise econômico-financeira relativa a operação, manutenção e limpeza do trocador que permitiu enfatizar a importância de se realizar o monitoramento da efetividade e ter um acompanhamento robusto sobre esses equipamentos.

5.1 Trabalhos Futuros

Dado papel fundamental dos trocadores de calor no processo de uma indústria, é de grande importância que se replique esse estudo nas demais áreas operacionais. Dessa forma, os trabalhos futuros serão concentrados em englobar os demais trocadores na metodologia estudada, bem como, desenvolver uma tela de acompanhamento no *Aspen Process Explorer*[®] que torne o monitoramento da efetividade e do índice de incrustação de acesso fácil a todos operadores e engenheiros da planta.

Além disso, para o caso do P-03 é importante que se crie uma rotina de limpeza para o lado do casco visto que, com a aplicação da metodologia do presente estudo, identificou-se formação de incrustação tanto nos tubos, como no casco do trocador.

6 Referências

- Arneth, S.; Stichlmair, J. Characteristics of thermosiphon reboilers. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 40, n. 4, p. 385-391, 4// 2001. ISSN 1290-0729. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072901012315>>.
- Incropera, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- Jerónimo, M. A. S. et al. Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchangers: A simplified method. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 14, n. 4, p. 455-463, 5// 1997. ISSN 0894-1777. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089417779600146X>>.
- Kakaç, S.; Liu, H. **Heat Exchanger: Selection, Rating and Thermal Design**. 2nd ed. New York: CRC Press, 2002.
- Tonin, P. C. **Metodologia Para Monitoramento do Desempenho Térmico de Redes de Trocadores de Calor**. 2003. 128 (Mestrado). Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET), Curitiba - PR.