



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



Acompanhamento Operacional de Rede de Trocadores de Calor Utilizando Estimadores de Estado

Autor: Gustavo Breitenbach Martinelli

*Orientadores: Luciane Ferreira Trierweiler
Jorge Otávio Trierweiler*

Co-orientador: Andressa Apio

Porto Alegre, julho de 19

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do Trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Conceitos básicos sobre trocadores de calor	4
2.2 Redes de trocadores de calor	6
2.3 Incrustação em trocadores de calor	7
2.4 Estimadores de Estados	8
3 Metodologia	11
3.1 Modelo	11
3.2 Filtro de Kalman estendido discreto (DEKF)	14
3.2.1 Critério de observabilidade	15
4 Estudo de Caso	16
4.1 Descrição da Planta	16
4.2 Descrição do Sistema	17
4.3 Dados de processo e equipamentos	18
4.4 Ajuste e Análise de Observabilidade do Filtro de Kalman	19
5 Resultados	21
5.1 Simulação do modelo	21
5.2 Simulação do modelo da rede de trocadores	26
5.3 Simulando o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF)	28
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	34
7 Referências	36
8 Apêndice I – Códigos da rede de trocadores	39

Agradecimentos

À minha família, pela paciência, incentivo e força, servindo de base para que eu pudesse alcançar esse objetivo.

Aos meus orientadores Jorge O. Trierweiler, Luciane Trierweiler e Andressa Apio, que, de forma muito prestativa, dedicada e qualificada, me orientaram para a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas que colaboraram de alguma forma para a minha formação.

Resumo

O desempenho de uma unidade operacional é baseado na análise da eficiência de seus equipamentos. Dentre esses equipamentos, os trocadores de calor têm grande importância, causando um impacto significativo no consumo de energia. Em refinarias de petróleo, os trocadores de calor possuem as mais variadas configurações e podem ser utilizados de forma isolada e também em redes, comumente chamadas de baterias de pré-aquecimento. Diante disso, o presente trabalho descreve um sistema de acompanhamento operacional de uma rede de trocadores de calor do tipo casco e tubos com o uso de estimadores de estado. Foi adequado um modelo matemático simplificado a fim de representar o trocador de calor e sua rede. Sabendo que esse modelo não é capaz de estimar de forma fidedigna todas as variáveis que se tem interesse e que as medições disponíveis podem conter erro, aplicou-se o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF) visando a reconciliação dinâmica dos dados medidos e o acompanhamento operacional do processo. O modelo matemático cumpriu seu papel de representar o comportamento das variáveis de interesse e o DEKF foi capaz de reconciliar, estimar e corrigir os dados. Desta forma, se obteve um analisador virtual.

Lista de Figuras

Figura 2.1 Trocadores de calor bitubulares em duas configurações: (a) Escoamento paralelo e (b) Escoamento contracorrente. Fonte: (INCROPERA et al., 2007).	4
Figura 2.2: Trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e um nos tubos e regime de operação contracorrente. Fonte: (INCROPERA et al., 2007).	5
Figura 2.3: Estrutura básica da técnica do filtro de Kalman. Fonte: (PAIM, 2009).....	9
Figura 4.1: Fluxograma simplificado do sistema de aquecimento do petróleo.....	17
Figura 4.2: Configuração da rede de trocadores de calor estudada.....	18
Figura 5.1: Simulação do modelo do trocador P-1. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).	21
Figura 5.2: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-1.	22
Figura 5.3: Simulação do modelo do trocador P-2. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).	22
Figura 5.4: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-2.	23
Figura 5.5: Simulação do modelo do trocador P-3. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).	23
Figura 5.6: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-3.	24
Figura 5.7: Simulação do modelo do trocador P-4. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).	24
Figura 5.8: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-4.	25
Figura 5.9: Simulação do modelo do trocador P-5. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).	25
Figura 5.10: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-5.	26
Figura 5.11: Conexão de rede entre o P-4 e P-2.	26
Figura 5.12: Conexão de rede entre o P-3 e P-1.	27
Figura 5.13: Conexão de rede entre o P-3 e P-5.	27
Figura 5.14: Simulação com DEKF para o trocador P-1.....	28
Figura 5.15: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-1.....	28
Figura 5.16: Simulação com DEKF para o trocador P-2.....	29
Figura 5.17: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-2.....	29
Figura 5.18: Simulação com DEKF para o trocador P-3.....	30
Figura 5.19: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-3.....	30
Figura 5.20: Simulação com DEKF para o trocador P-4.....	31
Figura 5.21: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-4.....	31

Figura 5.22: Simulação com DEKF para o trocador P-5.....	32
Figura 5.23: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-5.....	32
Figura 5.24: Fator associado à incrustação estimado com o DEKF.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Dados da rede de trocadores de calor.	19
Tabela 4.2: Propriedades físicas dos fluidos da rede de trocadores de calor.	19
Tabela 4.3: Ordem de grandeza das matrizes $P0$, $R0$ e $Q0$	20

Lista de Símbolos

- β = constante empírica, unidade variável
- ϕ_d = taxa líquida de deposição $\frac{kg}{m^3s}$
- ϕ_r = taxa líquida de remoção, $\frac{kg}{m^3s}$
- A = área de troca térmica, m^2
- A_{int} = área de escoamento dos tubos, m^2
- A_i = área de troca térmica interna, m^2
- A_{out} = área de escoamento da reação anular, m^2
- A_o = área de troca térmica da reação anular, m^2
- C_{pi} = capacidade térmica específica do fluido interno, $\frac{J}{kgK}$
- C_{po} = capacidade térmica específica do fluido externo, $\frac{J}{kgK}$
- dT_{ln} = temperatura média logarítmica, $^{\circ}C$
- d_i = diâmetro interno dos tubos, m
- d_e = diâmetro externo dos tubos, m
- D_e = diâmetro equivalente do casco, m
- D_i = diâmetro interno do casco, m
- E = energia interna, kcal
- E_i = energia interna do fluido interno, kcal
- E_o = energia interna do fluido externo, kcal
- $H_{i,in}$ = entalpia de entrada do fluido interno, J
- $H_{i,out}$ = entalpia de saída do fluido interno, J
- $H_{o,in}$ = entalpia de entrada do fluido externo, J
- $H_{o,out}$ = entalpia de saída do fluido externo, J
- F = fator de correção da temperatura média logarítmica, (-)
- h_i = coeficiente de troca de calor convectiva interno, $\frac{W}{m^2K}$
- h_o = coeficiente de troca de calor convectiva externo, $\frac{W}{m^2K}$
- k = condutividade térmica da parede, $\frac{W}{mK}$
- k_i = condutividade térmica do fluido interno, $\frac{W}{mK}$
- k_o = condutividade térmica do fluido externo, $\frac{W}{mK}$

l = comprimento dos tubos, m

L = comprimentos do casco, m

\dot{m} = vazão massica do fluido, $\frac{kg}{s}$

\dot{m}_i = vazão massica do fluido interno, $\frac{kg}{s}$

\dot{m}_o = vazão massica do fluido externo, $\frac{kg}{s}$

Nu_i = numero de Nusselt para o fluido interno, (-)

Nu_o = numero de Nusselt para o fluido externo, (-)

N = número de chicanas

n = número de tubos

Pr_i = numero de Prandtl para o fluido interno, (-)

Pr_o = numero de Prandtl para o fluido externo, (-)

P_t = Passo do trocador, m

Re_i = numero de Reynlolds para o fluido interno, (-)

Re_o = numero de Reynlolds para o fluido externo, (-)

R_f^+ = resistência térmica associada da incrustação, $\frac{sm^4K}{J}$

R_f = resistência térmica da incrustação, $\frac{sm^2K}{J}$

$R_{f\infty}$ = valor limitrofe para a resistência térmica da incrustação, $\frac{sm^2K}{J}$

R_{fi} = resistência térmica da incrustação interna, $\frac{sm^2K}{J}$

R_{fo} = resistência térmica da incrustação externa, $\frac{sm^2K}{J}$

R_{fwall} = resistência térmica associada da incrustação na parede, $\frac{sK}{J}$

t = tempo, s

$T_{i,in}$ = temperatura de entrada do fluido interno, K

$T_{o,in}$ = temperatura de entrada do fluido externo, K

$T_{i,out}$ = temperatura de saída do fluido interno, K

$T_{o,out}$ = temperatura de saída do fluido externo, K

U = coeficiente global de troca térmica, $\frac{W}{m^2K}$

U_o = coeficiente global de troca térmica para o trocador limpo, $\frac{W}{m^2K}$

V = volume de reação de escoamento dos fluidos, m^3

β = relação dos coeficientes de transferência de calor entre o lado casco e tubos, (-)

ρ_i = massa específica do fluido em escoamento, $\frac{kg}{m^3}$

ρ_o = massa específica do fluido em escoamento, $\frac{kg}{m^3}$

μ_i = viscosidade do fluido interno, $\frac{kg}{ms}$

μ_o = viscosidade do fluido externo, $\frac{kg}{ms}$

Lista de Abreviaturas e Siglas

KF - Filtro de Kalman (Kalman Filter)

EKF - Filtro de Kalman estendido

DEKF - Filtro de Kalman estendido discreto

CEKF - Filtro de Kalman estendido com restrições

BPA - Bateria de Pré-aquecimento

Destilado A - Produto intermediário de destilação

Destilado B - Produto pesado de destilação

MHE - Estimação de horizonte móvel

1 Introdução

Diante da elevada competitividade presente na indústria, a escassez e consequente aumento dos custos dos recursos energéticos e as reformulações nas leis ambientais, a criação de processos mais sustentáveis e rentáveis torna-se um grande desafio. Quando se pensa em otimização de plantas antigas, projetadas para atender às demandas em um outro cenário econômico, esse desafio se torna ainda mais complexo. Equipamentos que proporcionam otimização energética tornam-se indispensáveis para alcançar esses objetivos. Entretanto, não só a etapa de projeto é importante, mas também o acompanhamento de sua eficiência durante a operação. Esse acompanhamento, além de ser fundamental na manutenção de sua vida útil, pode servir de base para o desenvolvimento de novos projetos.

O trocador de calor é o equipamento usado para promover a troca de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida. Suas aplicações específicas podem ser encontradas no aquecimento de ambientes e no condicionamento de ar, na produção de potência, na recuperação de calor em processos e no processamento químico (INCROPERA et al., 2007). Quando esses equipamentos são associados para promover a troca de calor entre uma série de correntes provenientes de um processo, dá-se o nome de rede de trocadores de calor. Esta pode assumir as mais variadas configurações, desde uma simples associação em série, até um complexo conjunto de ramais.

As redes de trocadores de calor têm como finalidade a otimização energética de uma planta industrial. Ao fazer a integração entre correntes que se deseja resfriar com as correntes que se deseja aquecer, é possível economizar utilidades quentes e frias que teriam única e exclusivamente essa função, poupando assim recursos energéticos. Uma importante aplicação das redes de trocadores de calor ocorre na indústria de refino de petróleo. Em unidades de destilação, as baterias de pré-aquecimento (como são denominadas as primeiras redes de trocadores que têm a finalidade de aquecer a carga) desempenham um papel fundamental na economia de energia, visto o grande consumo energético relacionado a estas unidades.

Um problema que afeta significativamente a eficiência dos trocadores de calor e suas redes, é a incrustação. A incrustação consiste na deposição de material indesejado sobre superfícies de troca térmica, acarretando uma série de problemas operacionais,

como o aumento da perda de carga e a queda na transferência de calor, e de dimensionamento (SCHREIER; FRYER, 1995).

O superdimensionamento de trocadores de calor foi a forma encontrada para contornar os problemas causados pela incrustação. Porém, essa medida representa, em média, o aumento de em torno de 30% da área de troca térmica (GARRETT-PRICE, 1985), o que reflete diretamente em aumento de capital investido e espaço para instalação dos equipamentos.

Diante disto, o acompanhamento da eficiência das baterias de pré-aquecimento se torna muito importante. Porém, a indisponibilidade de informações (medidas de processo, tais como pressões, temperaturas, vazões, entre outras) torna a realização desta tarefa bastante difícil. Nem sempre há instrumentos para mensurar certas variáveis do processo. Quando se tem, os instrumentos podem estar com falha não informando ou informando com erro as medidas.

Para contornar este problema, foram criadas metodologias capazes de estimar, em tempo real, os valores das propriedades que se tem interesse. Isso é feito com o uso de um modelo matemático do processo e informações secundárias ou via um subconjunto de estados mensuráveis que tenham alguma correlação com as variáveis que se deseja determinar. Esses algoritmos recebem o nome de inferidores de propriedades (FERREIRA et al., 2002).

Quando essa metodologia trabalha com propriedades relacionadas às variáveis de estado utilizadas para representar o comportamento dinâmico do sistema, pode se utilizar estimadores de estados para estimar e inferir as grandezas de interesse, que não estariam diretamente disponíveis através de instrumentos de medição, assim como reconciliá-las com os demais valores medidos, nos casos em que as respectivas medições são disponíveis.

1.1 Objetivos

Diante da grande importância que as redes de trocadores de calor possuem para a eficiência energética de uma refinaria de petróleo, o presente trabalho tem por finalidade:

- adequar um modelo matemático baseado em equações de balanços de energia para um trocador de calor do tipo casco e tubos,

- montar a rede de troca térmica igual à que ele está inserido em uma unidade de destilação e,
- com o uso de estimadores de estado, estimar variáveis que não estão disponíveis, seja por falta de instrumento, seja por indisponibilidade dos mesmos, obtendo-se um analisador virtual.

As principais motivações do estudo se deram em função desta ser a etapa inicial para a criação de um sistema de detecção de falhas. Essa seria uma ferramenta útil para a operação de uma de uma planta de refino de petróleo, tendo em vista que indústrias deste tipo trabalham com processos altamente perigosos. Além do sistema de detecção de falhas poder agregar segurança e confiabilidade, também pode auxiliar no planejamento de manutenção dos equipamentos ao reduzir seus custos.

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro apresenta a introdução e os objetivos. No segundo, é apresentada a revisão bibliográfica abordando trocadores de calor, as redes de trocadores de calor, a incrustação (por ser um dos mais importantes problemas destes equipamentos) e os estimadores de estado.

O terceiro capítulo descreve o modelo matemático proposto para caracterização do trocador de calor, apresentando o balanço de energia utilizado e as correlações necessárias para o seu cálculo. Nesse capítulo também é detalhado o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF), técnica utilizada para estimação das variáveis não disponíveis da rede de trocadores.

O quarto capítulo apresenta o estudo de caso no qual é descrita a planta industrial onde a rede de trocadores está inserida, apresentando os sensores disponíveis. Neste capítulo também é realizada a análise de observabilidade para se determinar se as grandezas não medidas de interesse poderão ser efetivamente estimadas.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos através da simulação do modelo proposto e do filtro de Kalman para estimação das medidas não disponíveis da rede de trocadores de calor.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros evidenciando a relevância e importância da continuação deste estudo com o objetivo de desenvolver uma ferramenta capaz de ser aplicada na indústria.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos básicos sobre trocadores de calor

A classificação dos trocadores de calor se dá em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. No caso mais simples, os fluidos quente e frio se movem no mesmo sentido, configuração paralela, ou em sentidos opostos, configuração contracorrente, em uma construção com tubos concêntricos (ou bitubular) (INCROPERA et al., 2007). A Figura 2.1a apresenta a configuração paralela onde os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e deixam o equipamento também na mesma extremidade. A Figura 2.1b esquematiza a configuração contracorrente onde os fluidos entram em extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o equipamento em extremidades opostas.

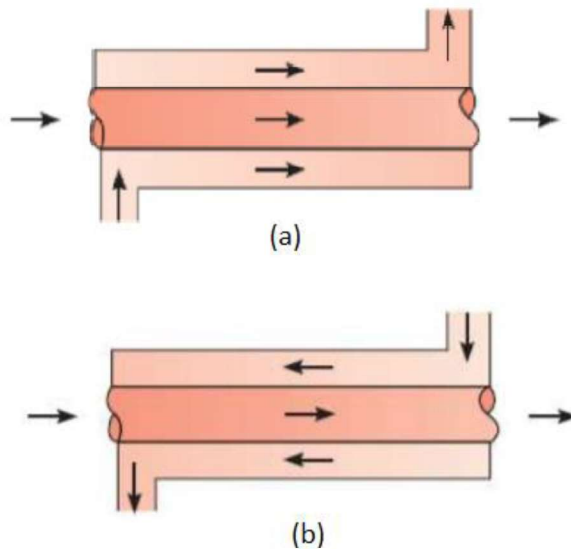


Figura 2.1 Trocadores de calor bitubulares em duas configurações: (a) Escoamento paralelo e (b) Escoamento contracorrente. **Fonte:** (INCROPERA et al., 2007).

Outro tipo de trocador existente é o casco e tubos. Devido às suas características de fabricação e flexibilidade de adaptação a diferentes condições de operação, são os equipamentos de transferência de calor mais utilizados em indústrias. As variações desse tipo de trocador de calor se caracterizam em função dos números de passes no casco e nos tubos. A forma mais simples tem um único passe nos tubos e no casco e está representada na Figura 2.2. As chicanas geram turbulência e um componente de velocidade na direção do escoamento cruzado, assim promovem um aumento no coeficiente convectivo no fluido no lado do casco. Além disso, as chicanas apoiam fisicamente os tubos, reduzindo a vibração dos mesmos induzida pelo escoamento (INCROPERA et al., 2007).

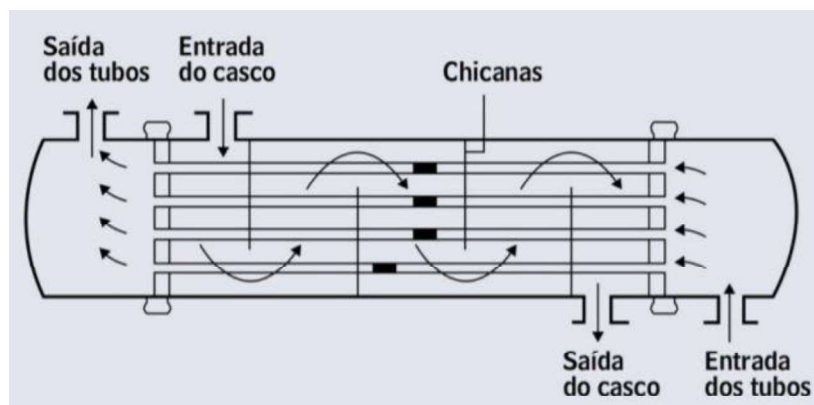


Figura 2.2: Trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e um nos tubos e regime de operação contracorrente. **Fonte:** (INCROPERA et al., 2007).

O dimensionamento de trocadores de calor é uma etapa muito importante no projeto de uma planta industrial e esbarra em algumas dificuldades causadas pela grande e complexa quantidade de problemas operacionais envolvidos. A redução na taxa de transferência de calor e o aumento da perda de carga fazem parte desses problemas e estão relacionados à incrustação ou *fouling*, como é chamada em inglês (SCHREIER; FRYER, 1995).

Segundo SADOUK, (2009) incrustação é o acúmulo de material indesejado sobre superfícies que realizam troca térmica e compromete significativamente a capacidade de transferência de calor. Essa deposição é um fenômeno extremamente complexo e consiste em um dos problemas mais importantes em trocadores de calor.

Uma medida amplamente adotada para contornar o problema da incrustação é o superdimensionamento dos trocadores de calor. Além de aumentar em 30% a área de troca térmica que seria necessária (GARRETT-PRICE, 1985), essa medida provoca um custo adicional de capital de até 25% (STEINHAGEN; MÜLLER-STEINHAGEN; MAANI, 1993).

Dentre os métodos de projeto e verificação de trocadores de calor que utilizam parâmetros superestimados está o método de Kern. O método permite verificar a queda de pressão e a incrustação de um trocador já existente. As correlações propostas são baseadas no diâmetro equivalente, para o lado do casco (KERN, 1965).

Outro método que se apresenta como alternativa ao método de Kern para o cálculo de coeficientes de transferência de calor para o lado do casco é o método de Bell-Delaware. O método se baseia em detalhes mecânicos apresentando resultados para o coeficiente de transferência de calor e queda de pressão mais coerentes com a realidade (TABOREK, 1983).

2.2 Redes de trocadores de calor

As redes de trocadores de calor têm como objetivo minimizar o consumo de energia de uma planta industrial. Para alcançar tal objetivo, a rede aproveita o excesso de calor proveniente das correntes que se deseja resfriar para suprir a necessidade das correntes que se deseja aquecer ao invés de realizar esse aquecimento e resfriamento por meio de utilidades quentes e frias, respectivamente (SILVA, 2009).

A tarefa básica no desenvolvimento de redes de trocadores de calor consiste em encontrar uma sequência de troca térmica em que os pares de correntes (quente e fria) são combinados de forma a tornar a rede ótima em relação ao custo. Esta é a grande complexidade do desenvolvimento, uma vez que para um dado número de correntes existe uma grande quantidade de combinações possíveis (RAVAGNANI et al., 2003).

O custo avaliado no desenvolvimento de redes de trocadores de calor deve considerar tanto os gastos com energia, quanto gastos de capital. Nesse último há forte influência do número de trocadores de calor, pois nele agrega-se os custos de fundações, maior demanda de espaço, válvulas, tubulações, mão-de-obra e manutenção (RAVAGNANI et al., 2003).

Os trabalhos sobre a síntese de redes de trocadores de calor podem ser divididos em dois grupos principais: métodos sequenciais e métodos simultâneos (FURMAN; SAHINIDIS, 2002). Porém, a grande maioria dos trabalhos disponíveis considera a configuração em contracorrente para todas as trocas térmicas. Sendo os trocadores de calor do tipo casco e tubos os equipamentos mais utilizados para transferência de calor na indústria, utilizar somente esta configuração para calcular a área de troca térmica pode gerar resultados não ótimos da área total da rede ou afastados da realidade industrial (SILVA, 2009).

Segundo (FURMAN; SAHINIDIS, 2002) os métodos sequenciais consistem na decomposição do problema em subproblemas mais simples que são resolvidos sucessiva e sequencialmente, podendo ainda ser divididos em duas subcategorias: a primeira baseia-se em conceitos termodinâmicos somados à regras heurísticas, também conhecida como Análise Pinch, e a segunda utiliza métodos de programação matemática, que são baseados na solução sequencial de subproblemas, lineares e não lineares, para o mínimo custo global. As metas dos subproblemas recebem uma ordem de importância que geralmente começa com mínimo consumo de utilidades, segue para o menor número de unidades de troca térmica e então vai para o mínimo custo de área, ou seja, mínimo custo

fixo da rede. Uma característica desta heurística é que ela não garante a síntese de uma rede com o mínimo custo total anual, pois a rede final será a soma de todas as sub-redes ótimas, o que não garante como resultado uma rede global ótima. Outra característica destes métodos é a necessidade da definição de um diferencial mínimo de temperatura (ΔT_{\min}) devido ao fato da divisão em intervalos, sendo este mais um parâmetro a ser determinado já que o custo global depende do mesmo.

2.3 Incrustação em trocadores de calor

Como foi mencionado anteriormente, a incrustação é o acúmulo de material indesejável (produtos de corrosão, partículas inorgânicas, macromoléculas e microrganismos) sobre superfícies de troca térmica. Sendo um dos problemas mais importantes em trocadores de calor, acaba comprometendo significativamente o desempenho operacional e gerando custos industriais adicionais. Diante desses fatos, estão sendo realizados diversos estudos para a caracterização e mitigação desse fenômeno (SMAILI; VASSILIADIS; WILSON, 2001).

A deposição de material pode se dar sob a forma de seis diferentes mecanismos, sendo que muitos processos que ocorrem na indústria envolvem possivelmente uma combinação de dois ou mais destes (BOTT, 1993). São eles:

- 1) *Corrosão*: deposição de produtos de corrosão formados localmente por reações químicas ou eletroquímicas envolvendo o fluido e a superfície metálica;
- 2) *Particulada*: substâncias sólidas suspensas na corrente de fluido se acumulam na superfície metálica devido influência das forças gravitacionais. Observada em interface gás-sólido;
- 3) *Reação Química*: deposição provocadas por reações químicas. Em equipamentos que trabalham com elevada temperatura pode haver a carbonização destes depósitos, formando coque e dificultando ainda mais a remoção de tais materiais;
- 4) *Precipitação ou cristalização*: substâncias dissolvidas no fluido cristalizam ou precipitam devido a variação na solubilidade causada pela diferença de temperatura entre o seio do fluido e a superfície ao longo do equipamento;
- 5) *Biológico*: fixação e crescimento de micro e macrorganismos sobre a superfície de troca térmica. Incomum ocorrer em interfaces gás-sólido, porém altamente presente em equipamentos que utilizam água como fluido térmico;

6) *Congelamento ou solidificação*: ocorre em superfícies resfriadas devido à solidificação de líquidos puros ou de constituintes de alto ponto de fusão de misturas.

De forma geral, os mecanismos de deposição são influenciados por duas etapas: a formação do depósito e a remoção do depósito. A formação do depósito tem início no seio do fluido, passa pelo transporte de massa até a superfície e termina pela fixação da partícula à superfície do equipamento ou em outras partículas já depositadas. A remoção do depósito pode ocorrer por dissolução, onde o material sai da camada de depósito na forma iônica ou molecular, erosão, quando o material sai da camada de depósito na forma particulada, e descamação, quando o material é removido sob a forma de pedaços ou fragmentos. A ocorrência ou não de deposição dependerá de qual etapa tem caráter mandatário (TABOREK, 1983).

Diante do exposto acima, as tentativas de se reproduzir um modelo matemático que represente o processo de incrustação têm se baseado no seguinte balanço material (TABOREK et al., 1972):

$$\frac{dR_f}{dt} = \Phi_d - \Phi_r \quad (2.1)$$

Na equação acima, $\frac{dR_f}{dt}$ é a taxa líquida de deposição da incrustação, Φ_d é a taxa de deposição, que depende do mecanismo de incrustação, Φ_r é a taxa de remoção, que depende da força e da tensão de cisalhamento do depósito, e R_f é a resistência térmica da incrustação. As grandes incertezas associadas aos mecanismos responsáveis pela formação da incrustação resultam em uma grande variedade de modelos (ZUBAIR et al., 2000).

2.4 Estimadores de Estados

A maioria dos problemas reais de engenharia são não-lineares, porém os recursos matemáticos que estão disponíveis para resolução desses problemas são muito mais compreendidos e acessíveis para sistemas lineares. A fim de se resolver algoritmos de sistemas não-lineares, faz-se a aproximação destes a sistemas lineares para então serem utilizadas as ferramentas desenvolvidas para estes últimos (SIMON, 2006).

Das estratégias encontradas para se desenvolver estimadores de estado projetadas para processos lineares que foram adaptadas para sistemas não lineares pode-se citar: Filtro de Kalman, Estimador Batelada, Estimador de Horizonte Móvel e Observador de

Luenberger. Muitas destas são empíricas e não levam em consideração de forma rigorosa a não-linearidade do sistema, perturbações e ruídos nos sensores (FINDEISEN, 1997).

O estimador de estado mais difundido é o Filtro de Kalman (KF). Esse método de estimação de estados foi desenvolvido em 1960 por Rudolf E. Kalman, tendo o objetivo de resolver problemas de tempo discretos lineares (BISHOP; WELCH, 2006). A técnica KF consiste em um processo matemático iterativo que utiliza um conjunto de dados medidos ao longo do tempo, provindos do processo real, para estimar ou corrigir o valor dos estados simulados ou de um parâmetro desejado do modelo matemático. A estrutura básica da técnica KF pode ser vista na Figura 2.3.

KALMAN (1960) promoveu um intenso interesse na teoria do filtro, pois esta superava as suposições estacionárias restritivas da teoria de Wiener-Kolmogorov do filtro linear, abrindo novas perspectivas. Surge, na sequência, o Filtro de Kalman estendido (EKF), técnica de estimação mais utilizada para solução de problemas não-lineares. Suas formulações usam linearização para utilizar o Filtro de Kalman em problemas não lineares. Como vantagens da formulação do EKF, pode-se citar a simplicidade, recursividade dos algoritmos e baixa carga computacional, sendo estas formulações adequadas para aplicação em tempo real em escala industrial (BECERRA; GRIFFITHS; ROBERTS, 2001).

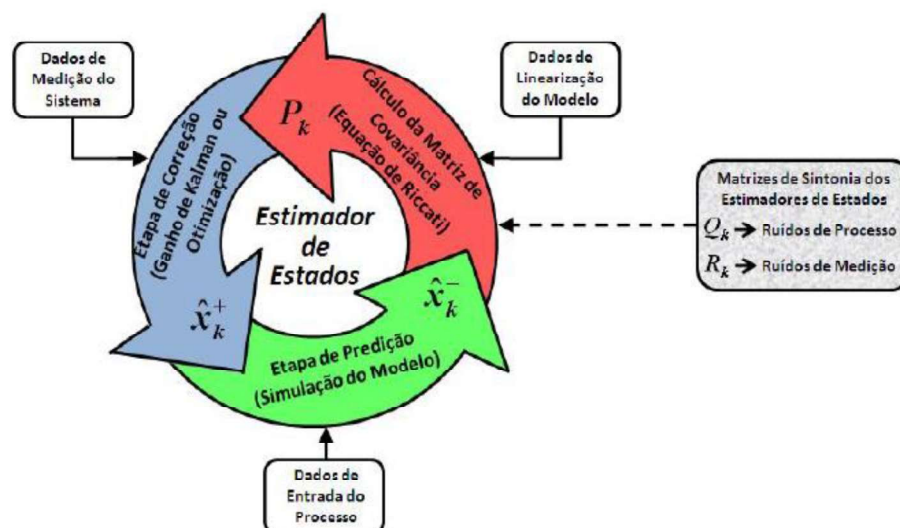


Figura 2.3: Estrutura básica da técnica do filtro de Kalman.

Fonte: (PAIM, 2009).

Em casos onde o sistema apresenta alto grau de não-linearidade, o EKF pode apresentar resultados não confiáveis. Com o desenvolvimento de *solvers* eficazes para

problemas de otimização não-linear, surgiram estimadores baseados em otimização, tais como a estimação de horizonte móvel (MHE) (MUSKE; RAWLINGS, 1995) e o filtro de Kalman estendido com restrições (CEKF) (GESTHUISEN; KLAT; ENGELL, 2001). Porém, a não-linearidade introduz uma alta complexidade matemática e um alto custo computacional.

Como aplicações dos estimadores de estado, pode-se citar:

- Controle avançado, através da retroalimentação da condição operacional mediante atualização da condição inicial do modelo dinâmico empregado para se efetuar as previsões do comportamento dinâmico futuro frente as ações de controle que estão sendo otimizadas em uma estratégia de controle chamada de horizonte móvel de controle (FROISY, 2006);
- Reconciliação dinâmica de dados: são utilizados para filtragem de uma variável medida, bem como sua compatibilização com as demais grandezas medidas respeitando as suas interrelações decorrentes da modelagem matemática (FARIAS, 2009);
- *Digital twin*: termo adotado atualmente, quando se utiliza um modelo matemático para criar uma réplica digital de produtos e processos industriais. Nestes casos, os estimadores de estado permitem que os modelos dinâmicos com base fenomenológica, possam manter uma aderência ao comportamento efetivamente apresentado pela planta, ou seja, é realizada a realimentação operacional do modelo empregado (SCHLEICH et al., 2017);
- Analisador virtual: foco deste trabalho, o analisador virtual consiste em uma ferramenta capaz de fornecer em tempo real variáveis de estados não-medidas (FERREIRA et al., 2002);
- Detecção de falhas: a detecção de falhas é feita através da interpretação da variável estimada. Mudanças significativas nesta variável são indícios de possíveis falhas (PRAKASH; PATWARDHAN; NARASIMHAN, 2002).

O presente trabalho utiliza o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF). Seu equacionamento é apresentado no capítulo 3.

3 Metodologia

O modelo matemático construído para os trocadores de calor e para a rede deve ser feito da maneira mais simples possível, porém, que seja capaz de representar as características de construção e operação dos equipamentos, e assim, possa simular de forma satisfatória o comportamento da variável de interesse. Utiliza-se um modelo simples porque sabe-se que o mesmo não teria a capacidade de representar todas as variações sofridas pelo equipamento durante operação no processo real (como a perda de calor para o ambiente). Diante disto, faz-se necessário o uso de uma ferramenta capaz de estimar as variáveis que faltam (seja por falha ou ausência de instrumento) através de variáveis disponíveis no processo. A ferramenta utilizada neste trabalho foi o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF).

3.1 Modelo

Os balanços de energia para os fluidos interno e externo, que são a base para a construção do modelo matemático do trocador, se baseiam no estudo de caso de um trocador bitubular, tema do trabalho realizado por (MACHADO, 2016). A notação utilizada para representar o fluido interno, fluido dos tubos, foi o subscrito “i” e a notação utilizada para representar o fluido externo, fluido do casco, foi o subscrito “o”. Já os subscritos “in” e “out” correspondem à entrada e saída, respectivamente, do trocador de calor. As equações que seguem apresentam o balanço de energia na forma dinâmica:

$$\frac{dE_i}{dt} = \dot{H}_{i,in} - \dot{H}_{i,out} + UA_i F dT_{ln} \quad (3.1)$$

$$\frac{dE_o}{dt} = \dot{H}_{o,in} - \dot{H}_{o,out} - UA_o F dT_{ln} \quad (3.2)$$

onde H representa a entalpia do fluido; U , o coeficiente global de troca térmica; A , a área superficial de troca térmica; dT_{ln} , a média logarítmica de temperatura entre os fluidos; F , o fator de correção da média logarítmica que depende da configuração do trocador de calor.

Sabendo que os fluidos que escoam no casco e nos tubos são líquidos sem mudança de fase, foi utilizada a seguinte simplificação no equacionamento:

$$\Delta \dot{H} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (3.3)$$

sendo \dot{m} , C_p e T respectivamente a vazão mássica, o calor específico médio e a temperatura do fluido.

De posse da geometria do trocador, as duas equações a seguir determinam as temperaturas de saída dos fluidos interno e externo com relação ao tempo:

$$\frac{dT_{i,out}}{dt} = \frac{[\dot{m}_i C p_i (T_{i,in} - T_{i,out}) + U A_i F d T_{ln}]}{\rho_i V_i C p_i} \quad (3.4)$$

$$\frac{dT_{o,out}}{dt} = \frac{[\dot{m}_o C p_o (T_{o,in} - T_{o,out}) - U A_o F d T_{ln}]}{\rho_o V_o C p_o} \quad (3.5)$$

ρ corresponde à massa específica do fluido, U é o coeficiente global de troca térmica e V o volume por onde escoam os fluidos.

Aplicando a equação da diferença de temperatura média logarítmica para configuração contracorrente, obtém-se a seguinte expressão:

$$dT_{ln} = \frac{(T_{i,in} - T_{o,out}) - (T_{i,out} - T_{o,in})}{\ln\left(\frac{(T_{i,in} - T_{o,out})}{(T_{i,out} - T_{o,in})}\right)} \quad (3.6)$$

A fim de evitar problemas de convergência e de singularidades matemáticas, utilizou-se a correlação modificada por Chen (1987 apud Zavala et al. 2005 p. 202 V. 4) para o cálculo da diferença média logarítmica, a qual é dada por:

$$dT_{ln} = \frac{(T_{i,in} - T_{o,out}) + (T_{i,out} - T_{o,in})}{2} - \frac{[(T_{i,in} - T_{o,out}) - (T_{i,out} - T_{o,in})]^2}{6 [(T_{i,in} - T_{o,out}) + (T_{i,out} - T_{o,in})]} \quad (3.7)$$

O coeficiente global de troca térmica foi calculado através de uma adaptação do cálculo utilizado para um trocador bitubular, através da seguinte equação:

$$\frac{1}{UA} = \left(\left(\frac{1}{h_i} + R_{fi} \right) \frac{1}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_i}{d_e}\right)}{2\pi k l} + \left(\frac{1}{h_o} + R_{fo} \right) \frac{1}{A_o} \right) \quad (3.8)$$

Rearranjando a equação 3.8 e agrupando os parâmetros da incrustação à resistência da parede, dado por R_{wall} , obtêm-se as seguintes expressões:

$$R_{wall} = \frac{\ln\left(\frac{d_i}{d_e}\right)}{2\pi k l} \quad (3.9)$$

$$h_o A_o h_i A_i = UA [h_o A_o + h_i A_i + h_o h_i (R_{fi} A_o + R_{fo} A_i + R_{wall} A_i A_o)] \quad (3.10)$$

$$h_o A_o h_i A_i = UA [h_o A_o + h_i A_i + h_o h_i (R_f^+)] \quad (3.11)$$

onde h corresponde ao coeficiente de transferência de calor convectiva; A , a área de troca térmica; d_i , o diâmetro interno dos tubos; d_e , o diâmetro externo dos tubos; k , a condutividade térmica do material da tubulação interna; l , o comprimento do trocador; R_f , a resistência térmica da incrustação; e R_f^+ , a resistência térmica associada da incrustação.

Para se estimar a resistência térmica associada da incrustação foi adicionada ao sistema de equações que descreve o balanço de energia do trocador de calor a equação

3.12. No Apêndice I o modelo completo implementado na linguagem MODELICA é devidamente apresentado.

$$\frac{dRf^+}{dt} = 0 \quad (3.12)$$

Através do número adimensional Nusselt, são determinados os coeficientes de troca convectiva h . Estas equações são apresentadas a seguir.

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (3.13)$$

$$Nu_o = \frac{h_o D_e}{k_o} \quad (3.14)$$

sendo k_i e k_o as condutividades térmicas dos fluidos e D_e o diâmetro equivalente do casco, calculado pela seguinte expressão:

$$D_e = \frac{(4P_T^2 - \pi d_e^2)}{\pi d_e} \quad (3.15)$$

onde P_T representa o passo do trocador de calor.

Os números adimensionais de Reynolds e Prandtl para o fluido interno e externo, respectivamente, são dados pelas seguintes expressões:

$$Re_i = \frac{\dot{m}_i d_i}{A_{int} \mu_i} \quad (3.16)$$

$$Re_o = \frac{\dot{m}_o D_e}{A_{out} \mu_o} \quad (3.17)$$

$$Pr_i = \frac{c_{pi} \mu_i}{k_i} \quad (3.18)$$

$$Pr_o = \frac{c_{po} \mu_o}{k_o} \quad (3.19)$$

As áreas de escoamento e superficial são descritas por:

$$A_{int} = \frac{\pi d_i^2}{4P} n \quad (3.20)$$

$$A_{out} = \frac{Di(P_T - d_e) \frac{L_e}{(N+1)}}{P_T} \quad (3.21)$$

$$A_i = \pi d_i l n \quad (3.22)$$

$$A_o = \pi d_e L_e n \quad (3.23)$$

O fator μ representa a viscosidade dos fluidos em escoamento; \dot{m} , as vazões mássicas; n , o número de tubos do trocador; P , o número de passagens nos tubos; Di , o diâmetro interno do casco; L_e , o comprimento do casco; N , o número de chicanas; l , o comprimento dos tubos.

O número adimensional Nusselt interno foi calculado pela seguinte equação (VDI Heat Atlas, 2010 Seção B1 - Fundamentals of Heat Transfer p. 26):

$$Nu_i = 0.024Re_i^{0.8}Pr_i^{0.3} \quad (3.24)$$

A equação 3.23 é válida para as seguintes faixas de Reynolds e Prandtl, respectivamente: $10^4 < Re < 10^5$ e $0.5 < Pr < 100$

Já o Nusselt externo foi determinado utilizando-se a equação de Petukhov's modificada por Gnielinski, (1958 apud VDI Heat Atlas, 2010 Seção G1 - Heat Transfer in Pipe Flow p. 696):

$$Nu_o = \frac{Re_o Pr_o E_o}{1 + 12.7 \sqrt{E_o} \left(Pr_o^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left[1 + \left(\frac{D_e}{L_e} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (3.25)$$

$$E_o = 0.125(0.78 \ln(Re_o) - 1.5)^{-2} \quad (3.26)$$

A equação 3.24 compreende uma faixa mais ampla de Reynolds e Prandtl, dadas por: $10^4 < Re < 10^6$ e $0.6 < Pr < 1000$.

As propriedades dos fluidos interno e externo foram obtidas das folhas de dados dos equipamentos, uma vez que estas foram utilizadas para o projeto dos equipamentos.

3.2 Filtro de Kalman estendido discreto (DEKF)

Como mencionado anteriormente na revisão bibliográfica, o filtro de Kalman usa medidas observadas ao longo do tempo (contendo ruído e outras discrepâncias) para estimar variáveis desconhecidas. O filtro de Kalman estendido (EKF) é baseado em linearização de primeira ordem das equações de estado em cada passo e no uso da teoria de estimação linear, sendo filtro aproximado para sistemas não lineares (LJUNG, 1979).

No presente trabalho foi utilizado o EKF em tempo discreto (DEKF), o qual considera tempos e medidas em tempos discretos. A seguir, é apresentado o sistema de equações não-lineares (SIMON, 2006):

$$\dot{x} = f(x, u, t) + \omega(t) \quad (3.27)$$

$$y_k = h_x(x_k, t_k) + v_k \quad (3.28)$$

onde \dot{x} é o vetor de estados; f , a função do modelo; ω , o vetor dos ruídos de processo; y , o vetor de saída; h , a função que relaciona os estados com as saídas; v , o vetor dos ruídos de medida; e k , representa o passo considerado no tempo discreto.

Linearizando o sistema:

$$F(t) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{\hat{x}} \quad (3.29)$$

$$\varphi_{k-1} = e^{F(t_k - t_{k-1})} \quad (3.30)$$

$$H_k = \left(\frac{\partial h_k}{\partial x} \right)_{\hat{x}_{k|k-1}} \quad (3.31)$$

sendo F , a Jacobiana de f em relação aos estados; φ , a matriz de transição de um estado para outro estado; H , a Jacobiana de h em relação aos estados.

A covariância dos estados é dada por:

$$P_{k|k-1} = \varphi_{k-1} P_{k-1|k-1} \varphi_{k-1}^T + Q_{k=1} \quad (3.32)$$

Sendo P , a matriz de covariância dos estados; e Q , a matriz de covariância do ruído de processo.

Dado o passo de correção

$$K_k = P_{k-1|k-1} H_k^T [H_k P_{k-1|k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (3.33)$$

onde K , é o ganho de Kalman; e R , a matriz de covariância do ruído de medida.

Os estados são atualizados como:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k [y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}, t_k)] \quad (3.34)$$

sendo a covariância dos novos estados:

$$P_{k|k} = [I_n - K_k H_k] P_{k|k-1} \quad (3.35)$$

com I , sendo a matriz identidade (APIO et al., 2018).

3.2.1 Critério de observabilidade

O teste de observabilidade determina se é possível ou não reconstruir os estados ou calcular parâmetros a partir das medidas disponíveis (Oliveira Junior, 2006). Neste trabalho, realizou-se o teste de observabilidade para verificar a viabilidade da determinação das medidas de temperatura indisponíveis do sistema a partir das medidas disponíveis. O teste foi realizado através do critério de *Hautus*, o qual define que o sistema linear formado pelas matrizes jacobianas F e H (definidas nas equações 3.29 e 3.31) será observável se o posto da matriz M é igual ao número de estados do sistema para todos os valores característicos da matriz F (SALAU, 2009).

Sendo M dada pela equação (3.36), em que $\lambda(i)$ são os autovalores da atriz F .

$$M(i) = \begin{bmatrix} \lambda(i)I - F \\ H \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

4 Estudo de Caso

4.1 Descrição da Planta

O presente trabalho de conclusão de curso utilizou como estudo de caso uma rede de trocadores de calor localizada na unidade de destilação de uma refinaria de petróleo. A refinaria tem por objetivo transformar o petróleo bruto, extraído dos campos de produção, em diversos produtos como óleo diesel, gasolina, GLP, óleo combustível, querosene de aviação, solventes, asfalto, coque, enxofre e propeno.

A transformação do petróleo em derivados se inicia na separação física de suas frações pelo processo de destilação e, de acordo com as faixas de temperatura de ebulição das mesmas, estas são encaminhadas para tanques de estocagem, onde compõe os derivados finais, podendo ser misturadas a outras frações, ou são enviadas a tanques intermediários, de onde seguem para outros processos de separação, transformação ou acabamento (BRASIL; ARAÚJO, 2011). Para esse processo acontecer, o petróleo é aquecido em altas temperaturas até evaporar. O aquecimento é promovido por trocadores de calor e fornos.

O petróleo bruto (carga) entra na unidade de destilação com um percentual de água, sais e sedimentos que precisam ser removidos para evitar corrosão e incrustação nos equipamentos e aumentar a estabilidade do processo. Tais impurezas são removidas através do processo de dessalgação do petróleo em equipamentos chamados dessalgadoras. Estas realizam a desestabilização da emulsão óleo e água, por enfraquecimento da película de agentes emulsificantes através de: campo elétrico de alta intensidade, temperatura alcançada no pré-aquecimento (reduz a viscosidade do óleo e a coesão do filme emulsificante formado entre o mesmo e a água), água de diluição adicionada antes da entrada da dessalgadora e adição de agente químico desemulsificante.

O aumento gradual da temperatura do petróleo é obtido por meio de uma série de trocadores de calor, comumente chamada de bateria de pré-aquecimento (BPA). As baterias de pré-aquecimento promovem o aumento de temperatura da carga utilizando o calor dos produtos que saem da torre de destilação. São duas as baterias de pré-aquecimento: a primeira bateria fica antes da dessalgadora e a segunda depois. Após esta última, o petróleo ganha ainda mais carga térmica no forno, para então ir para a torre de destilação onde será separado em derivados. A Figura 4.1 apresenta, de forma simplificada, esse sistema de aquecimento.

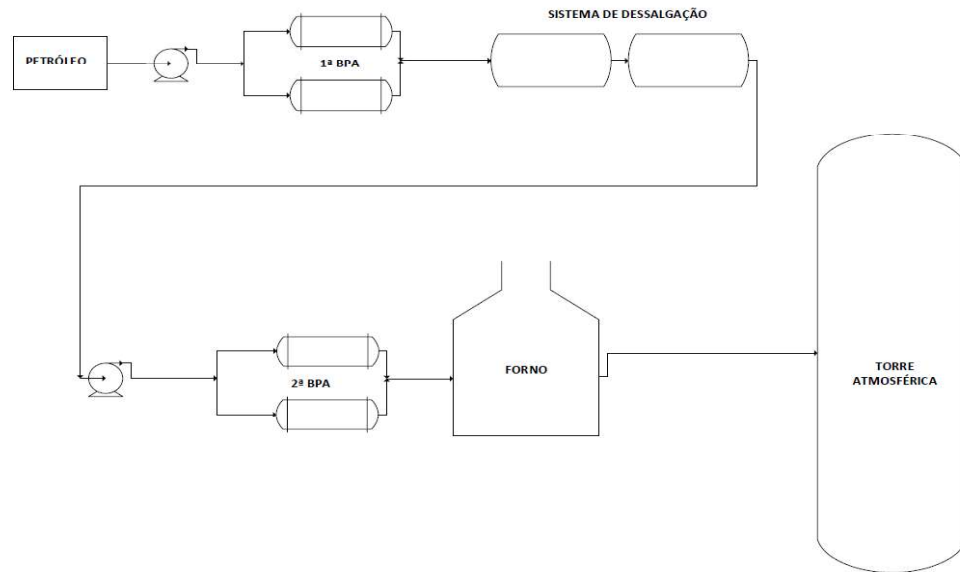


Figura 4.1: Fluxograma simplificado do sistema de aquecimento do petróleo.

A utilização das baterias de pré-aquecimento implica em aumento da eficiência energética das unidades pois promove economia de combustível consumido no forno, reduzindo seu tamanho e custos operacionais, melhores condições de operação da planta e um menor consumo de água de resfriamento necessária para resfriar os produtos que saem da torre de destilação.

4.2 Descrição do Sistema

Como mencionado na seção anterior, as baterias de pré-aquecimento da carga da unidade são divididas em primeira bateria, a montante da dessalgadora, e segunda bateria, a jusante da dessalgadora. O presente trabalho irá analisar trocadores de calor que fazem parte da segunda bateria de pré-aquecimento.

A segunda bateria de pré-aquecimento se divide em dois ramais. Um ramal é o espelho do outro, possuindo assim o mesmo número de trocadores de calor com as mesmas características. Para fins de estudo, foi analisado apenas um ramal da segunda BPA. Este ramal possui cinco trocadores de calor do tipo casco e tubos em série. No lado dos tubos passa o petróleo, fluido para o qual se deseja obter o aumento de temperatura (fluido frio), e no lado das carcaças passam dois produtos que saem da torre de destilação, chamados, neste trabalho, de destilado A e destilado B. Os fluidos quentes (lado das carcaças) passam de forma intercalada pelos trocadores de calor, configuração essa que tem como objetivo maior aproveitamento energético e consequente eficiência térmica da bateria. A disposição dos trocadores de calor do ramal analisado da segunda

bateria de pré-aquecimento pode ser visualizada na Figura 4.2. Em preto tem-se a representação do fluxo de petróleo, em azul o destilado A e em vermelho o destilado B.

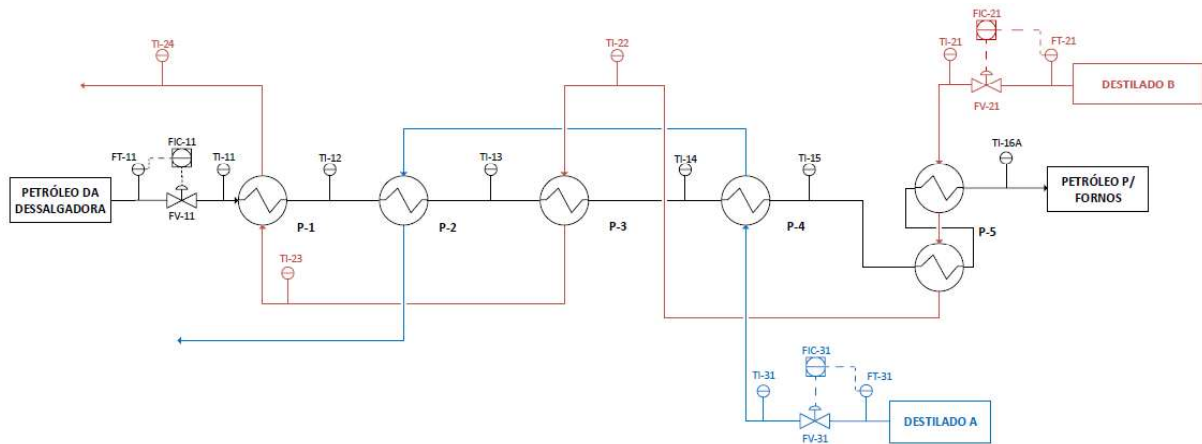


Figura 4.2: Configuração da rede de trocadores de calor estudada.

Nos quatro primeiros trocadores da BPA, são quatro passes nos tubos e um no casco. No último trocador, P-5, tem-se duas passagens pela carcaça e oito nos tubos.

4.3 Dados de processo e equipamentos

Para formulação do modelo foram utilizados dados do processo, coletados com o software PI *processbook*, e dados dos trocadores de calor, coletados nas folhas de dados dos equipamentos.

Os dados de processo coletados englobam temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio e vazões, também de ambos os fluidos. Foram coletados em um período de uma semana com as medidas atualizadas minuto a minuto. Essa forma de coleta pôde trazer uma representatividade do comportamento dinâmico da planta.

Como pode ser visto na figura 4.2, não há informação de temperatura na saída do casco do P-4 (que corresponde a temperatura de entrada do casco do P-2) e na saída do casco do P-2. Estas temperaturas foram estimadas pelo modelo e pelo filtro DEKF e os resultados são apresentados no capítulo 5. No capítulo 5 também serão apresentados os resultados das temperaturas estimadas pelo modelo e pelo filtro em comparação com as temperaturas medidas pelos instrumentos, desta forma é possível comparar se o modelo está conseguindo representar o comportamento do equipamento e identificar possíveis erros de medida dos instrumentos.

A vazão, uma variável bastante importante e que pode ser uma grande fonte de erro, foi obtida através dos medidores de vazão que estão instalados na entrada dos tubos e dos cascos.

Já os parâmetros referentes aos trocadores de calor, coletados nas folhas de dados, englobam a área de troca térmica, diâmetro interno e externo dos tubos, diâmetro interno do casco, comprimento dos tubos, comprimento do casco, número de tubos, passo, número de chicanas, número de passagens nos tubos e número de passagens no casco. Esses dados podem ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados da rede de trocadores de calor.

	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
Área de troca (m²)	593,4	804,2	593,4	804,2	785,2
Diâmetro interno dos tubos - di (m)	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148
Diâmetro externo dos tubos - de(m)	0,01905	0,01905	0,01905	0,01905	0,01905
Diâmetro interno do casco - Di (m)	1,3	1,528	1,3	1,528	1,522
Comprimento dos tubos - l (m)	6,096	6,096	6,096	6,096	6,096
Comprimento do casco - Le (m)	5,496	5,319	5,496	5,319	5,313
N° de tubos	1804	2460	1804	2460	2416
Passo - Pt (m)	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254
Chicanas - N (ou defletores)	17	13	17	13	29
Passagens tubos (P)	4	4	4	4	8

As propriedades físicas dos fluidos do casco e dos tubos, utilizadas no modelo, foram obtidas também das folhas de dados dos trocadores de calor, trabalhando com valores constantes para fins de simplificação. Essas propriedades são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades físicas dos fluidos da rede de trocadores de calor.

	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
Massa específica Tubos (kg/cm³)	755	755	755	755	755
Massa específica Casco (kg/cm³)	795	648	795	648	770
Viscosidade média Tubos (Pa.s)	0,00101	0,00101	0,00101	0,00101	0,00101
Viscosidade média Casco (Pa.s)	0,00126	0,00126	0,00126	0,00126	0,00126
Condutividade térmica tubos (W/m.K)	0,121917	0,121917	0,121917	0,121917	0,121917
Condutividade térmica casco (W/m.K)	0,110306	0,110306	0,110306	0,110306	0,110306
Calor específico dos tubos (J/kg.K)	2550,4	2550,4	2550,4	2550,4	2550,4
Calor específico do casco (J/kg.K)	2633,4	2633,4	2633,4	2633,4	2633,4

O modelo equacionado foi formulado de modo a trabalhar com todas as medidas disponíveis da planta e estimar as medidas que estão faltando, que são a temperatura de entrada do P-2 e as temperaturas de saída do casco do P-4 e P-2.

4.4 Ajuste e Análise de Observabilidade do Filtro de Kalman

O teste de observabilidade foi realizado por meio da aplicação do critério de *Hautus*, através do qual verificou-se que o sistema é observável ao retornar um valor de

posto para a matriz M , dada pela equação (3.36), igual ao número de estados, para todos os autovalores do modelo linearizado.

O ajuste dos parâmetros do filtro foi escolhido a partir da ordem de grandeza dos estados. No entanto, para as temperaturas, considerou-se mais confiabilidade nas medidas ($Q0$ maior), e para o fator de resistência térmica da incrustação, maior confiabilidade no modelo ($Q0$ menor)

As matrizes $P0$, $R0$ e $Q0$ são apresentadas na Tabela 4.3, sendo Rf o fator de resistência térmica da incrustação, $TTout$ a temperatura de saída dos tubos para inicialização, e $TCout$ a temperatura de saída do casco para inicialização.

Tabela 4.3: Ordem de grandeza das matrizes $P0$, $R0$ e $Q0$.

	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
$P0$	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02
$R0$	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02
$Q0$ para Rf	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02
$Q0$ para $TTout$	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04
$Q0$ para $TCout$	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04	1,00E+04

5 Resultados

5.1 Simulação do modelo

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com as simulações dos modelos dos trocadores de calor. As variáveis simuladas são as temperaturas de saída, tanto do lado dos tubos quanto do lado do casco.

Nas figuras, as linhas contínuas representam as variáveis medidas (variáveis que foram obtidas através dos instrumentos de campo) e as linhas tracejadas representam as variáveis simuladas pelo modelo. Em azul são apresentadas as temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos) e em vermelho as temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).

A Figura 5.1 apresenta os valores da simulação para o primeiro trocador da BPA (P-1). Pode-se notar que o modelo conseguiu representar o comportamento do trocador P-1, sendo o comportamento do lado do casco (linhas vermelhas) representado de forma mais adequada. Porém, nota-se que o modelo apresentou uma predição com um delta de temperatura praticamente constante em relação aos valores medidos de temperatura. O desvio entre os valores medidos e simulados pode ser visto na figura 5.2. Para o lado dos tubos (linhas azuis), o desvio médio foi de 17,18°C, e para o lado do casco, foi ainda maior, 33,77°C.

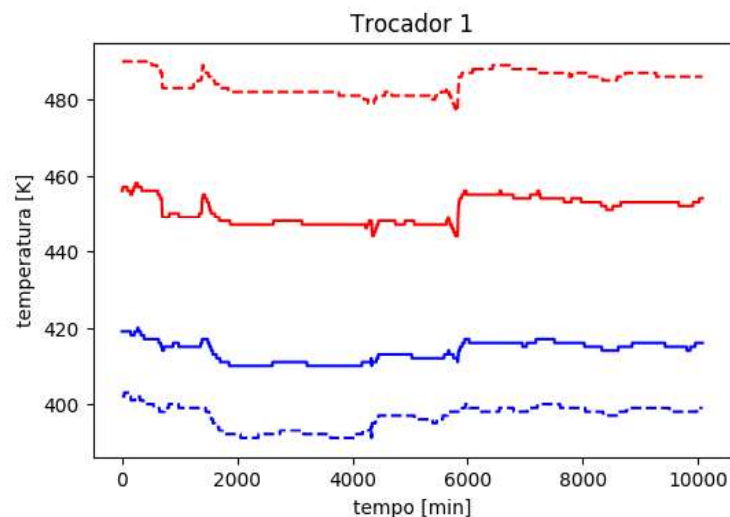


Figura 5.1: Simulação do modelo do trocador P-1. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).

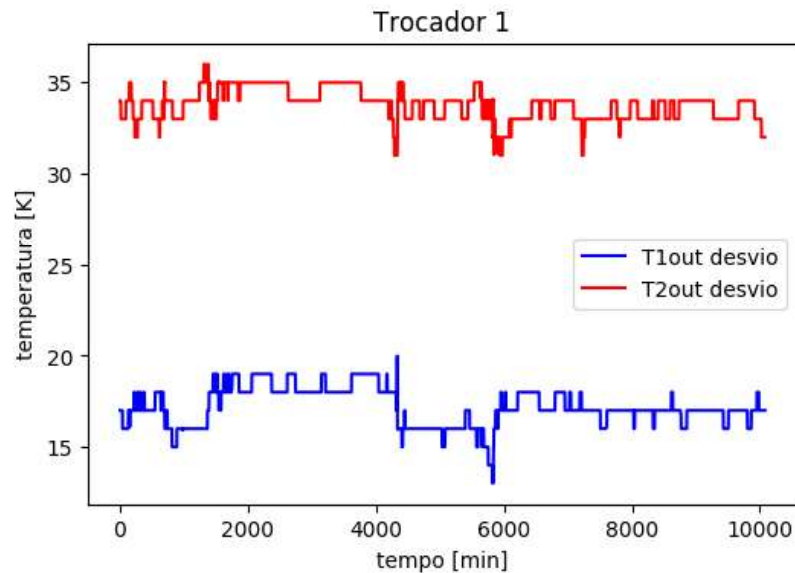


Figura 5.2: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-1.

A Figura 5.3 apresenta o resultado da simulação para o modelo do P-2.

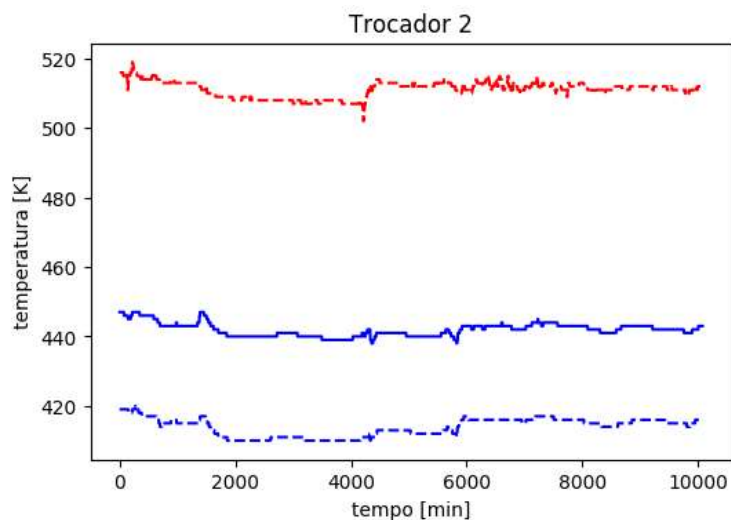


Figura 5.3: Simulação do modelo do trocador P-2. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).

No caso do trocador P-2, Figura 5.3, não se tem a medida da temperatura de saída do casco, não sendo possível fazer o comparativo com a variável simulada (linha pontilhada vermelha) e verificar se o modelo representou bem o comportamento desta. Para o lado dos tubos (linhas em azul), percebe-se uma boa representação do comportamento, porém, com um desvio médio de 28,04°C entre a variável medida e a simulada. O desvio entre os valores medidos e simulados pode ser visto na figura 5.4.

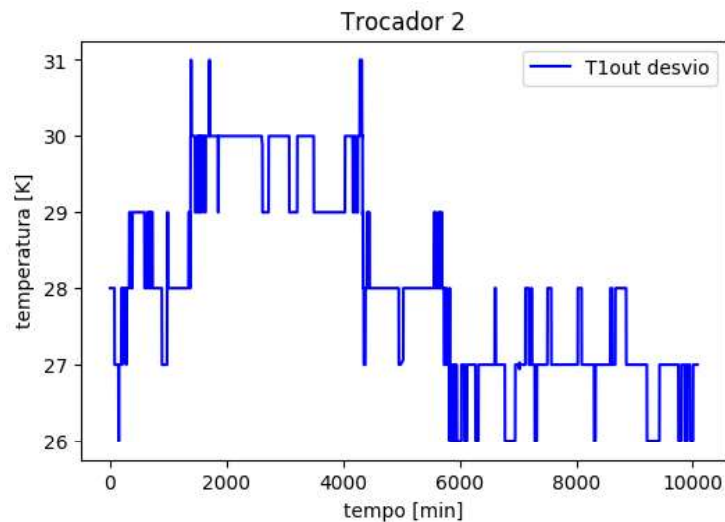


Figura 5.4: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-2.

A Figura 5.5 apresenta o resultado da simulação para o modelo do P-3.

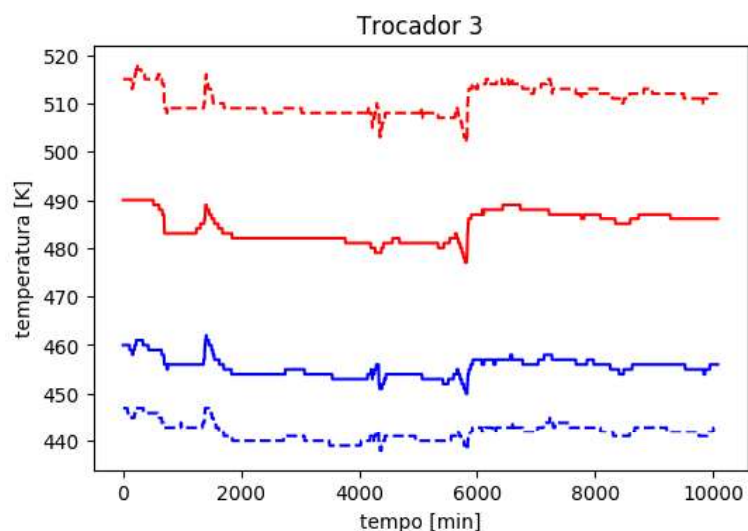


Figura 5.5: Simulação do modelo do trocador P-3. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).

Nota-se na Figura 5.5, trocador P-3, uma boa representação do comportamento da temperatura de saída para ambos os fluidos, fluido frio (linhas em azul) e fluido quente (linhas em vermelho). O desvio médio entre as temperaturas medidas e simuladas foi maior para o lado do casco, 26,05°C, contra 13,53°C para o lado dos tubos. A figura 5.6 apresenta os valores do desvio para o P-3.

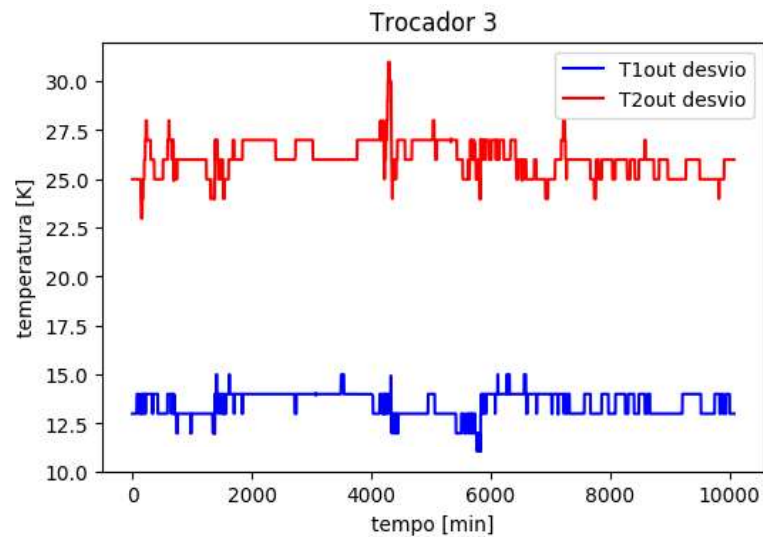


Figura 5.6: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-3.

A Figura 5.7 apresenta o resultado da simulação para o modelo do P-4. O trocador de calor P-4 também não possui a medida da temperatura de saída do casco, logo, não foi possível analisar o comportamento da variável simulada frente à medida. No lado dos tubos, linhas em azul, nota-se uma boa representação do comportamento da variável. O desvio médio entre os valores foi de aproximadamente 17,28°C. A figura 5.8 apresenta os valores do desvio para o lado dos tubos do P-4.

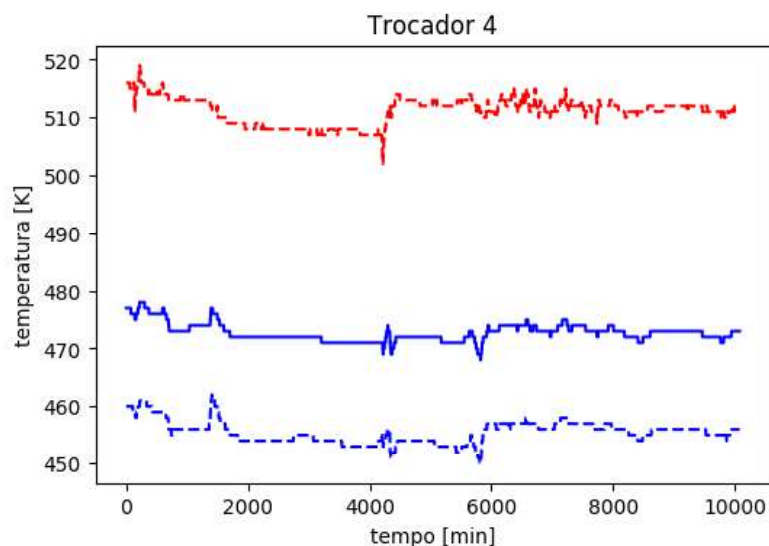


Figura 5.7: Simulação do modelo do trocador P-4. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).

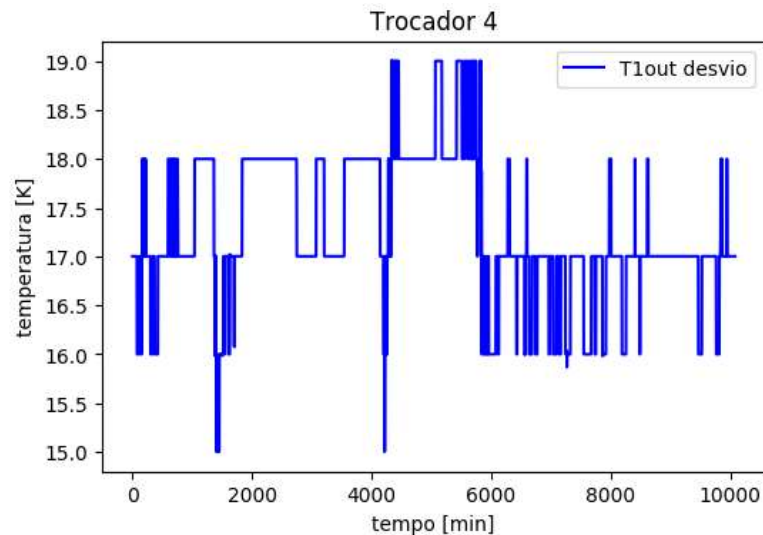


Figura 5.8: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-4.

A Figura 5.9 apresenta o resultado da simulação para o modelo do P-5.

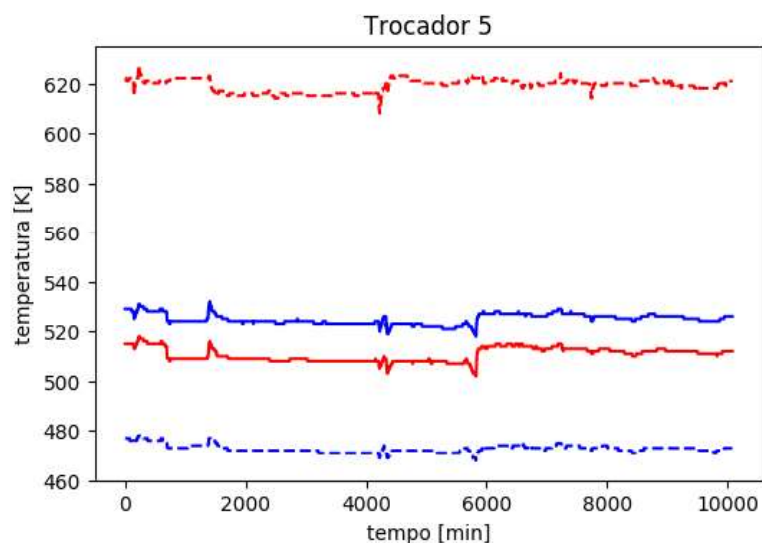


Figura 5.9: Simulação do modelo do trocador P-5. Linha contínua: variáveis medidas. Linha tracejada: variáveis estimadas. Cor azul: temperaturas para o fluido frio (fluido dos tubos). Cor vermelha: temperaturas para o fluido do casco (fluido quente).

O modelo do trocador P-5 foi o que apresentou os piores resultados. Para o fluido frio (linhas azuis), tem-se um comportamento semelhante ao experimental. No entanto, para o fluido quente (linhas vermelhas), nota-se que o comportamento da variável medida não é tão bem representado pela simulada. Para o fluido frio tem-se um desvio médio de 52,13°C. Já para o fluido quente, o desvio médio é de 108,47°C. O desvio entre os valores medidos e simulados pode ser visto na figura 5.10.

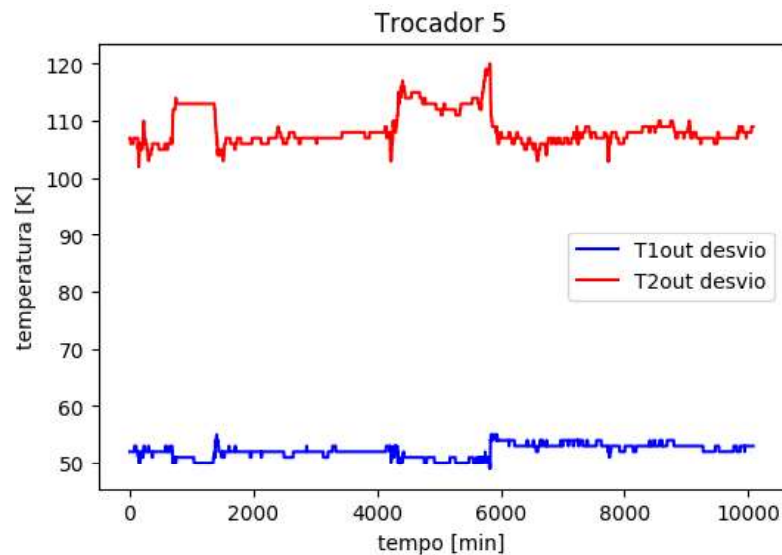


Figura 5.10: desvio entre os valores medidos e simulados para o P-5.

5.2 Simulação do modelo da rede de trocadores

A configuração da rede de trocadores foi apresentada na seção 4.2. Como pode ser visto na Figura 4.1, não existe instrumento de medida de temperatura na saída do casco do P-4 e na saída do casco do P-2. Observando a Figura 4.1, percebe-se que a saída do casco do P-4 é a entrada do casco do P-2. Como o modelo simula as temperaturas de saída dos equipamentos, o trocador P-2 só pôde ser simulado através da seguinte conexão de rede, apresentada na figura 5.11: temperatura de saída do casco do P-4 (HE4 Tout.C) é igual à temperatura de entrada do casco do P-2 (HE2 Tin.C).

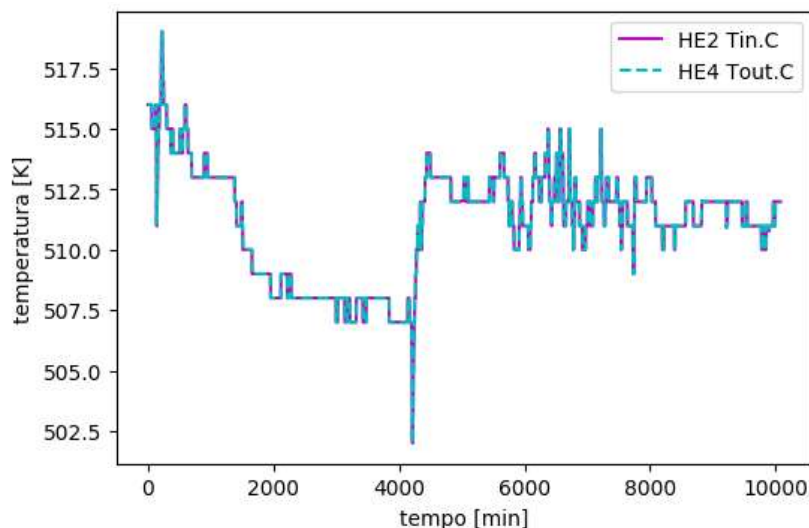


Figura 5.11: Conexão de rede entre o P-4 e P-2.

Utilizando esta conexão, foi possível simular as temperaturas de saída do P-2, apresentadas anteriormente na figura 5.3.

Se a rede de trocadores de calor não possuísse informações de outros trocadores, estas também poderiam ser simuladas. A Figura 5.12 mostra o resultado da simulação para a conexão de rede entre o P-3 e o P-1 em uma possível indisponibilidade de informações no P-1, juntamente com as indisponibilidades do P-2.

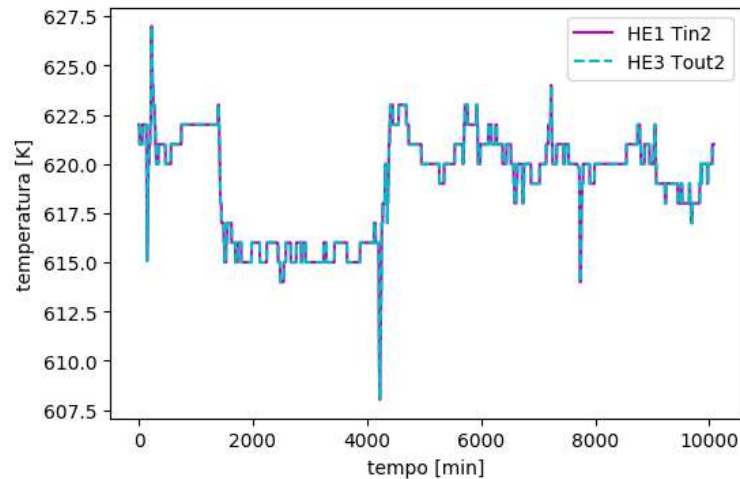


Figura 5.12: Conexão de rede entre o P-3 e P-1.

A temperatura de saída do casco do P-3 (HE3 Tout.C) e de entrada do casco do P-1 (HE1 Tin.C) devem ser iguais e isso pode ser verificado na Figura 5.12.

Testando uma outra possível conexão de rede, desta vez entre o P-3 e P-5 também se verifica que o modelo de rede é capaz de simular essa variável (Figura 5.13).

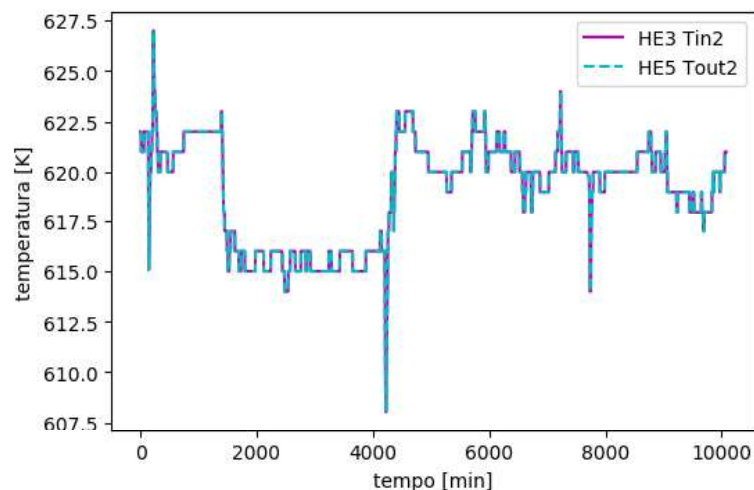


Figura 5.13: Conexão de rede entre o P-3 e P-5.

Desta forma, este modelo de rede nesta configuração é observável, sendo capaz de estimar outras temperaturas que pudessem ficar indisponíveis.

5.3 Simulando o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF)

Diante do fato que o modelo não conseguiu simular com acuracidade as variáveis de interesse, foi utilizado o filtro de Kalman estendido discreto (DEKF). Os resultados são apresentados a seguir.

A Figura 5.14 apresenta o resultado da simulação com DEKF para o trocador P-1.

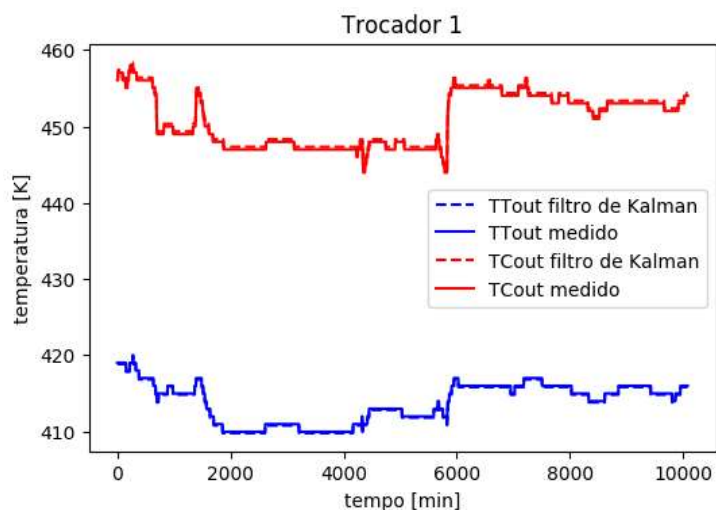


Figura 5.14: Simulação com DEKF para o trocador P-1.

Como pode ser visto na Figura 5.14 a linha tracejada, que representa as variáveis estimadas pelo filtro, ficou muito próxima da linha contínua, que representa as variáveis medidas. Ou seja, o filtro conseguiu estimar com boa precisão as temperaturas de saída dos tubos (TTout) e do casco (TCout) para o trocador P-1. Os valores do desvio entre as variáveis medidas e estimadas podem ser verificados na figura 5.15.

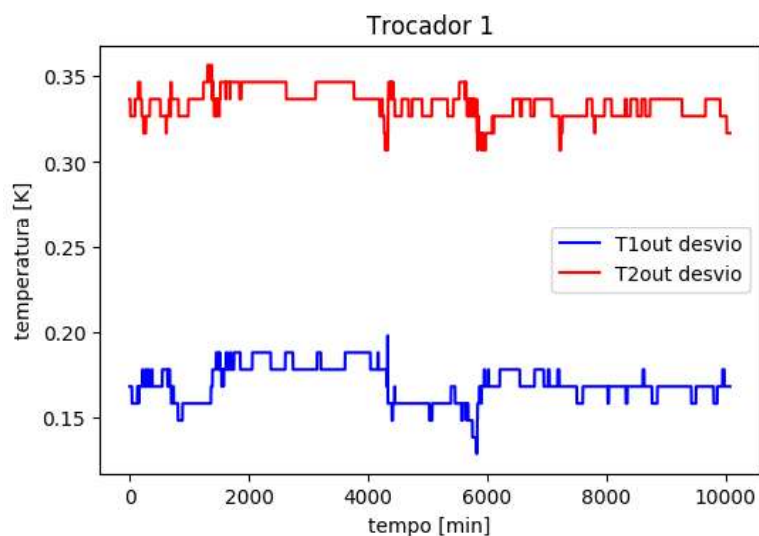


Figura 5.15: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-1

A Figura 5.16 apresenta o resultado da simulação com DEKF para o trocador P-2.

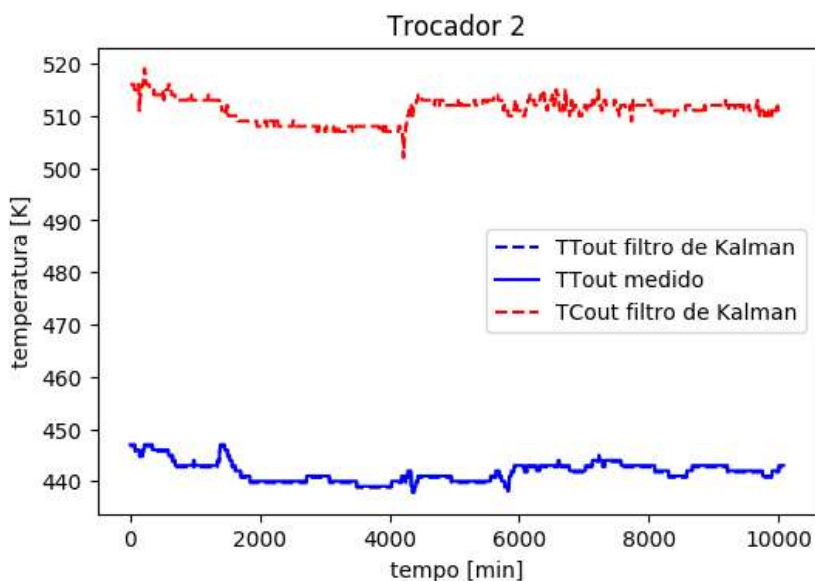


Figura 5.16: Simulação com DEKF para o trocador P-2.

O trocador de calor P-2, figura 5.16, não possui a medida da temperatura de saída do casco, não sendo possível realizar a comparação desta com a medida estimada pelo filtro (TCout filtro de Kalman). Já para o fluido frio, linhas em azul, a temperatura estimada pelo filtro (TTout filtro Kalman) apresentou valor muito próximo da temperatura medida (TTout medido). O valor do desvio entre as variáveis medidas e estimadas para o P-2 pode ser visto na figura 5.17

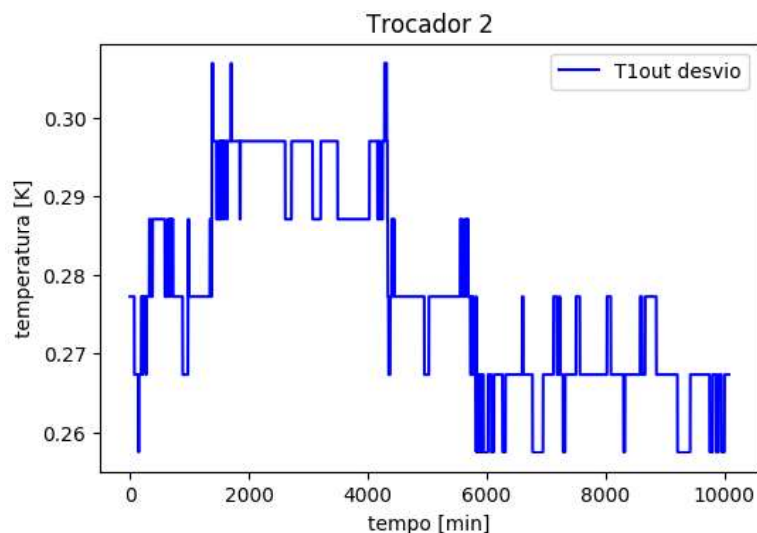


Figura 5.17: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-2

A Figura 5.18 apresenta o resultado da simulação com DEKF para o trocador P-3.

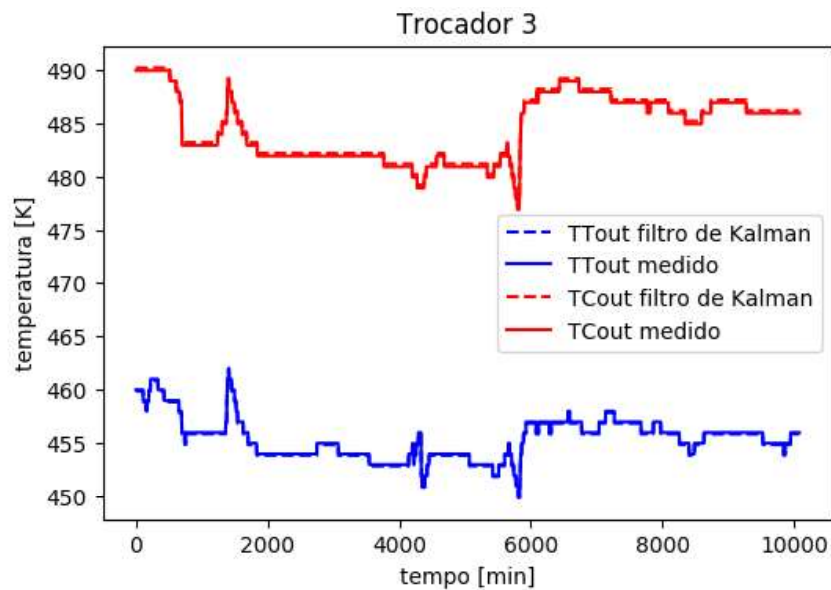


Figura 5.18: Simulação com DEKF para o trocador P-3.

Como pode ser visto na Figura 5.18, o filtro de Kalman estendido discreto estimou, mais uma vez, com boa precisão as temperaturas dos fluidos frio (linhas em azul) e quente (linhas em vermelho) do trocador P-3. Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e estimadas podem ser verificados na figura 5.19

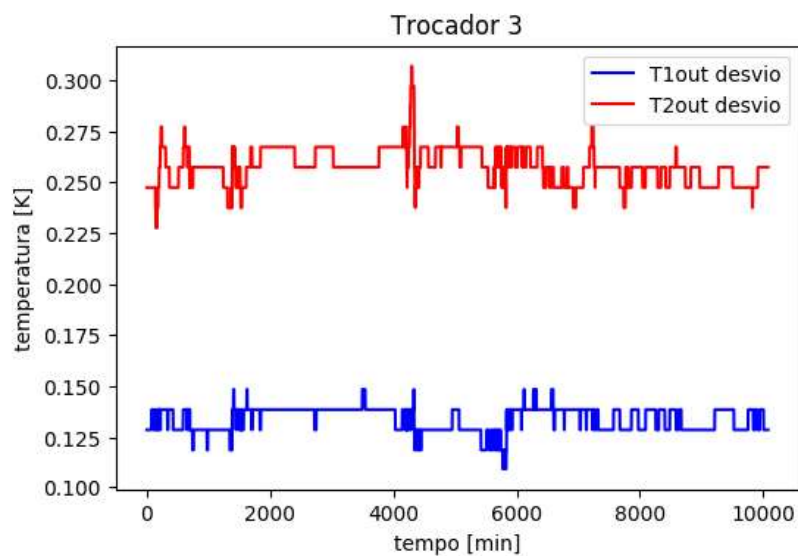


Figura 5.19: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-3

A Figura 5.20 apresenta o resultado da simulação com DEKF para o trocador P-4.

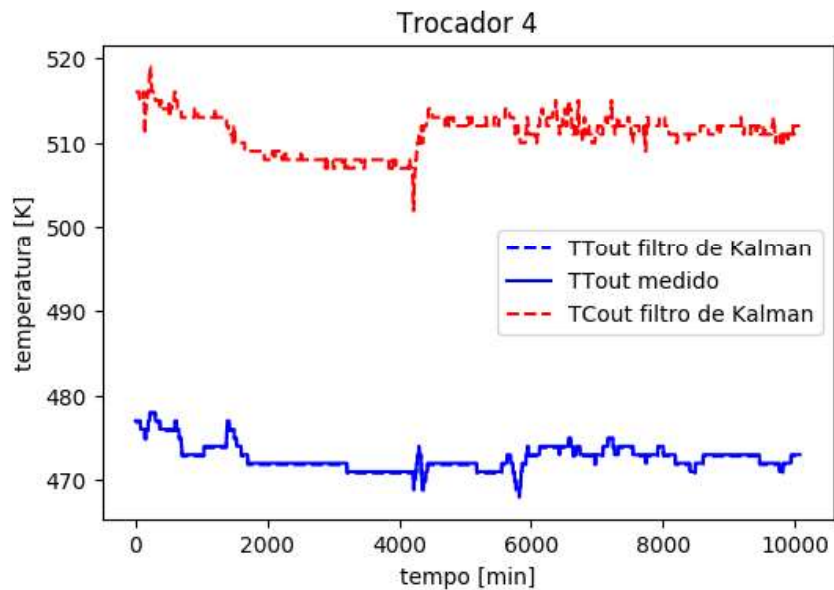


Figura 5.20: Simulação com DEKF para o trocador P-4.

O trocador de calor P-4, Figura 5.20, também não possui medida da temperatura de saída do casco. Desta forma não pôde ser feito um comparativo com o valor da variável estimada pelo filtro. Já para o fluido dos tubos, linhas em azul, o filtro estimou com boa precisão o valor das temperaturas de saída. O valor do desvio entre as variáveis medidas e estimadas para o P-4 pode ser visto na figura 5.21

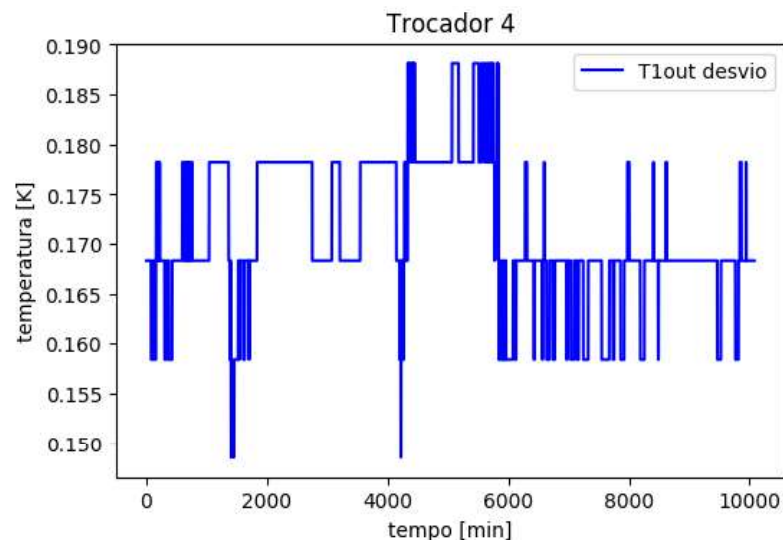


Figura 5.21: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-4.

A Figura 5.22 apresenta o resultado da simulação com DEKF para o trocador P-5. Comparando o resultado da simulação com o com o resultado obtido simulando o modelo (Figura 5.9), observa-se uma grande melhora com o DEKF. Os valores dos desvios entre as variáveis medidas e estimadas podem ser verificados na figura 5.23

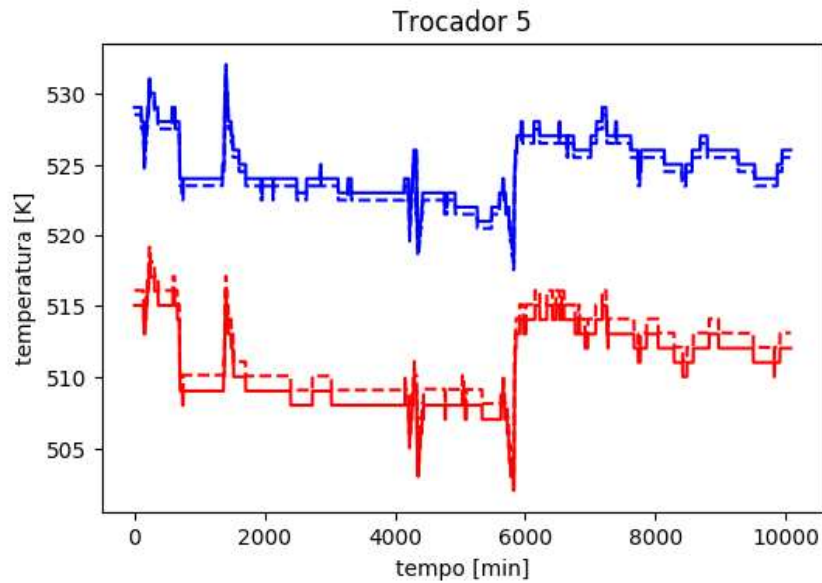


Figura 5.22: Simulação com DEKF para o trocador P-5.

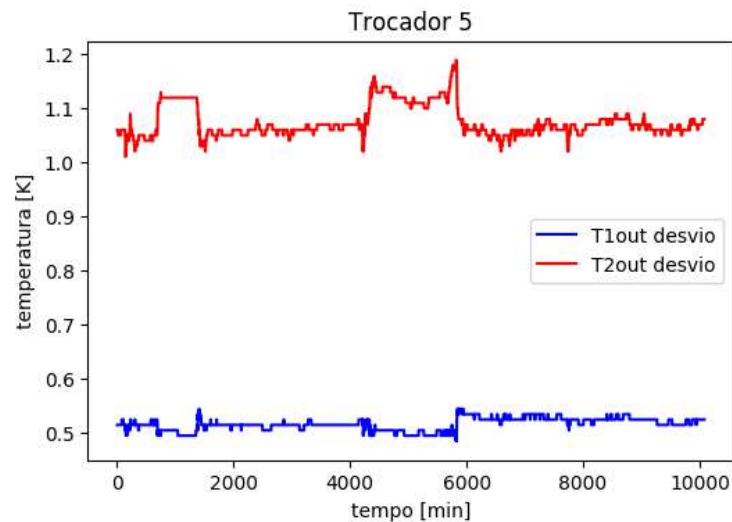


Figura 5.23: desvio entre os valores medidos e estimados para o P-5.

O filtro também se mostrou capaz de estimar os valores das resistências térmicas associadas da incrustação dos cinco trocadores. A Figura 5.24 apresenta estes valores. A unidade da resistência térmica associada da incrustação é $[s.m^4.K/J]$. Note que este não é o valor da resistência térmica da incrustação, R_f , e sim um valor da associação das resistências térmicas da incrustação, R_f^+ , como mostra a equação 3.11. Este fator é utilizado para determinar o coeficiente global de troca térmica e, por consequência, pode ajudar no acompanhamento da incrustação. O tempo de avaliação é muito pequeno (apenas uma semana), assim, não é possível afirmar se os trocadores estão realmente sendo afetados pela incrustação.

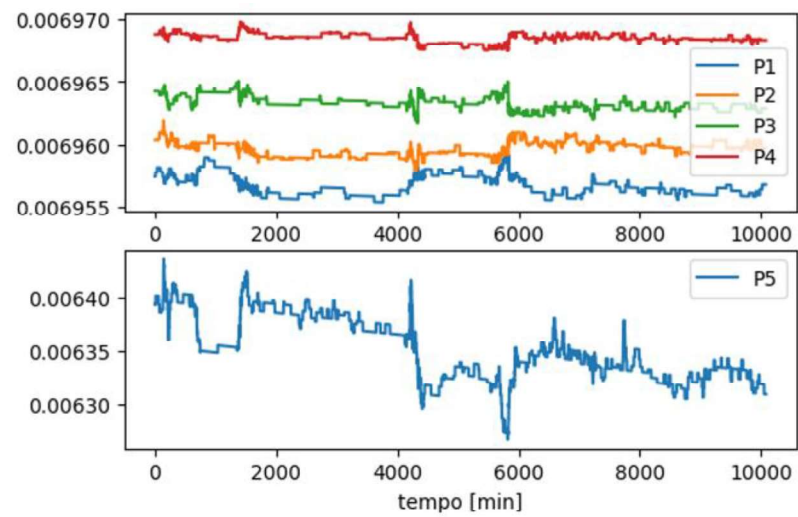


Figura 5.24: Fator associado à incrustação estimado com o DEKF.

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O modelo matemático conseguiu representar de forma satisfatória o comportamento das temperaturas, tanto do fluido quente, quanto do fluido frio. Também se mostrou capaz de estimar os valores de temperatura indisponíveis, quando inserido na rede.

As diferenças entre as variáveis medidas e as estimadas pelo modelo já eram esperadas. Sabe-se que o mesmo é uma abstração simplificada da realidade, não sendo capaz de representar perfeitamente todas as variáveis do sistema durante a operação dos trocadores de calor, como por exemplo a perda de calor para o ambiente. Há também a possibilidade de as variáveis medidas conterem erros, consequência da falta de calibração ou falhas nos instrumentos de medição.

O trocador P-5 apresentou a maior desvio entre as variáveis medidas e as estimadas. Uma possível causa de erro para isto é o fator F (fator de correção da temperatura média logarítmica). Foi considerado um fator igual para todos os trocadores, porém, este trocador tem maior número de passagens pelo casco e pelos tubos, logo, o fator não pode ser igual ao dos demais. Outra causa de erro pode ser o modelo. Este pode não ser o modelo ideal para o trocador em questão, necessitando de mais ajustes. Somado a isso há também os erros de medição.

O modelo matemático da rede de trocadores cumpriu o seu objetivo. Conseguiu simular as duas variáveis que faltavam (temperatura de saída do casco do P-4 e do P-2). E, caso outras variáveis ficassem indisponíveis, seria capaz de simulá-las também, por se tratar de um sistema observável.

O filtro de Kalman estendido discreto se mostrou uma ferramenta adequada para esse caso. Foi capaz de reconciliar, estimar e corrigir os dados. O filtro também foi capaz de estimar o fator da resistência térmica associada da incrustação dos cinco trocadores de calor.

Dos objetivos definidos para o presente trabalho, conclui-se que foi possível acompanhar a operação da rede de trocadores de calor e estimar variáveis desconhecidas com o uso de estimadores de estado. Através da adequação de um modelo matemático para um trocador de calor casco e tubos, foi possível criar um analisador virtual.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se mencionar:

- Replicação do modelo para outras redes de trocadores de calor;
- Testar outros filtros de Kalman;

-
- Estudar a melhor forma de representar a evolução do fator de incrustação ao longo do tempo, permitindo que se insira informações como a que o seu valor só aumenta. Assim se evitaria as flutuações encontradas nos gráficos, decorrentes da utilização deste fator, para fazer com que os modelos viessem a representar as variáveis medidas da melhor forma possível;
 - Desenvolver um sistema de detecção de falhas para agregar mais segurança e confiabilidade aos processos de plantas de refino de petróleo, tendo em vista os altos riscos atrelados a estes.

7 Referências

- APIO, Andressa et al. **COMPARAÇÃO ENTRE FILTROS DE KALMAN PARA ESTIMAÇÃO DA PRESSÃO DE FUNDO (PDG) NA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE**. 2018. [s. l.], 2018.
- BECERRA, M.; GRIFFITHS, W.; ROBERTS, D. **Applying the extended Kalman filter to systems described by nonlinear differential algebraic equations**. [s.l: s.n.]. v. v. 9
- BISHOP, G.; WELCH, G. **An introduction to the Kalman filter**. [s. l.], n. Chapel Hill, North Carolina, 2006.
- BOTT, T. T. **Fouling of Heat Exchangers**. [s.l: s.n.]. v. 1st. ed.
- BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S. **Processamento de Petróleo e Gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente**. [s.l: s.n.]. v. 7ª ed.
- FARIAS, Andrea Cabral. **Avaliação de Estratégias para Reconciliação de Dados e Detecção de Erros Grosseiros**. 2009. [s. l.], 2009.
- FERREIRA, L. S. et al. **Desenvolvimento de um software de analisador virtual para bioprocessos**. 2002. [s. l.], 2002.
- FINDEISEN, P. K. **“Moving horizon state estimation of discrete time systems”**,. 1997. [s. l.], 1997.
- FROISY, J. B. **Model Predictive Control - Building a Bridge between Theory and Practice**. **Computers and Chemical Engineering**, [s. l.], v. v. 30, p. 1426–1435, 2006.
- FURMAN, Kevin C.; SAHINIDIS, Nikolaos V. **Computational complexity of heat exchanger network synthesis**. In: **Computers and Chemical Engineering**., 2002.
- GARRETT-PRICE, B. **Fouling of heat exchangers: Characteristics, costs, prevention, control and removal**. **Noyes Publications**, [s. l.], v. 20, n. July, p. 417, 1985.
- GESTHUISEN, R.; KLAT, K. U.; ENGELL, S. **Optimization-based state estimation - a comparative study for the batch polycondensation of PET**. In: **In: ECC, 2001.**, 2001.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition**. In: **Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition**. [s.l: s.n.].
- KALMAN, R. E. **A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems**, Transactions of the ASME. **Journal of Basic Engineering**, [s. l.], v. v. 82, n. 1, p. 35–45, 1960.
- KERN, Donald Q. **Process Heat Transfer.Pdf**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://sv.20file.org/up1/423_0.pdf>
- LJUNG, L. **Asymptotic behavior of the extended Kalman filter as a parameter estimator for**

- linear systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 36–50, 1979.
- MACHADO, Alyne. **Determinação da Incrustação em Trocadores de Calor através de Estimadores de Estado**. [s.l: s.n.].
- MUSKE, K. R.; RAWLINGS, J. B. Nonlinear Moving Horizon State Estimation. **Methods of Model-Based Control: Kluwer Academic Publishers**, [s. l.], v. 293, p. 349–365, 1995.
- OLIVEIRA JUNIOR, Antonio Martins De. **ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS EM MODELOS DE PROCESSO USANDO DADOS INDUSTRIAIS E TÉCNICA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS**. Antonio. 2006. [s. l.], 2006.
- PAIM, Anderson Campos. **Controle Preditivo Retroalimentado por Estados Estimados , Aplicado a Uma Planta Laboratorial**. 2009. [s. l.], 2009.
- PRAKASH, J.; PATWARDHAN, S. C.; NARASIMHAN, S. A Supervisory Approach to Fault-Tolerant Control of Linear Multivariable Systems. In: **Industrial & Engineering Chemistry Research**. [s.l: s.n.]. p. 2270–2281.
- RAVAGNANI, Mauro et al. Síntese de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Análise Pinch em Conjunto com Algoritmos Genéticos. [s. l.], 2003.
- SADOUK, Hamza Chérif. **Modélisation de l' encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois Modélisation de l' encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement**. 2009. Université Paris-Est, [s. l.], 2009.
- SALAU, Nina P. G. **Abordagem Sistemática para Construção e Sintonia de Estimadores de Estados Não-Lineares**. 2009. [s. l.], 2009.
- SCHLEICH, B. et al. **Shaping the digital twin for design and production engineering**. 2017. [s. l.], 2017.
- SCHREIER, P. J. R.; FRYER, P. J. Heat exchanger fouling: A model study of the scaleup of laboratory data. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 1311–1321, 1995.
- SILVA, Aline Priscila. Projeto Ótimo de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Técnicas Não Determinísticas. [s. l.], 2009.
- SIMON, D. **"Optimal state estimation - Kalman, H, and nonlinear approaches**. 2006. [s. l.], 2006.
- SMAILI, F.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. "Mitigation of fouling in refinery heat exchanger networks by optimal management of cleaning". **Energy & Fuels**, [s. l.], v. v. 15, p. 1038–1056, 2001.
- STEINHAGEN, Renate; MÜLLER-STEINHAGEN, Hans; MAANI, Kambiz. Problems and Costs

due to Heat Exchanger Fouling in New Zealand Industries. **Heat Transfer Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 19–30, 1993.

TABOREK, J. et al. Predictive methods for fouling behavior. *Chemical Engineering Progress*. [s. l.], v. v. 68, p. 68–78, 1972.

TABOREK, J. “Shell and tubo Heat Exchangers: Single Phase Flow”. In: **Heat Exchanger Design Handbook Section 3.3, Hemisphere Publishing Corporation**. [s.l: s.n.].

TOBERGTE, David R.; CURTIS, Shirley. **VDI Heat Atlas**. [s.l: s.n.]. v. 53

ZAVALA-RIO, A.; FEMAT, R.; SANTIESTEBAN-COS, R. An analytical study of the logarithmic mean temperature difference. **Revista Mexicana De Ingeniería Química**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 201–212, 2005.

ZUBAIR, M. S. et al. A risk based heat exchanger analysis subject to fouling. Part I: Performance evaluation. **Energy**, [s. l.], v. v. 25, p. 427–443, 2000.

8 Apêndice I – Códigos da rede de trocadores

Código do modelo da rede de trocadores

model HEModel

```

//COSNANTES (O VALOR NÃO MUDA AO LONGO DA SIMULAÇÃO)
parameter Real A = 593.4; // area de troca térmica(m2)
parameter Real di = 0.0148; // diâmetro interno dos tubos (m)
parameter Real de = 0.01905; // diametro externo dos tubos (m)
parameter Real Di = 1.3; // diametro interno do casco(m)
parameter Real Le = 5.496; // comprimento do Casco(m)
parameter Real l = 6.096; // comprimento dos tubos(m)
parameter Real F = 0.7; // fator correção média logaritmica
parameter Real n = 1804; // numero de tubos
parameter Real Pt = 0.0254; // passo (m)
parameter Real N = 17; // numero de chicanas
//parameter Real doe = 0.10160; // diametro externo do tubo interno(m)

//PARAMETROS (O VALOR PODE MUDAR AO LONGO DA SIMULAÇÃO)
parameter Real rhoo=795; // densidade RAT (kg/m3)
parameter Real rhoi=755; // densidade petroleo (kg/m3)
parameter Real Cpo=2633.4; // calor especifico RAT (J/kg.K)
parameter Real Cpi=2550.4; // calor especifico petroleo (J/kg.K)
parameter Real ko= 0.1103; // condutividade termica petroleo (W/m.K)
parameter Real ki= 0.1219; // condutividade termica RAT (W/m.K)
parameter Real Mo=0.00126; // viscosidade petroleo (kg/m.s)
parameter Real Mi=0.00101; // viscosidade RAT (kg/m.s)

//INICIALIZACAO
parameter Real Rf_init = 0.006973333333333333;
parameter Real Tout1_init=420; // temperatura saida petroleo (K)
parameter Real Tout2_init=450; // temperatura saida HAT (K)

//DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALGÉBRICAS
//-->Deltas Ts
Real dTln; //Temperatura média logaritmica(K)
Real dT1; //Delta T terminal quente(K)
Real dT2; //Delta T terminal frio(K)
//-->Números adimensionais e coeficientes
Real U; //Coeficiente global de troca térmica (W/m2.K)
Real Nui; //Nusselt lado tubos(-)
Real Nuo; //Nusselt lado casco(-)
Real Pri; //Prandtl lado tubos(-)
Real Pro; //Prandtl lado casco(-)
Real Rei; //Reynolds lado tubos(-)
Real Reo; //Reynolds lado casco(-)
Real Eo; //Coeficiente de arraste lado casco(m)
Real ho; //Coeficiente convectivo RAT (W/m2.K)
Real hi; //Coeficiente convectivo Petroleo (W/m2.K)
//-->Dimensionamento trocador
Real At; //Area de escoamento tubos(m2)
Real Ac; //Area de escoamento casco(m2)
Real Atsup; //Area superficial lado tubos(m2)
Real Acsup; //Area superficial lado casco(m2)
Real De; //Diâmetro equivalente do casco(m)
Real Vo; //Volume casco(m3)
Real Vi; //Volume tubos(m3)
//-->Propriedades gás

//DEFINIÇÃO DOS ESTADOS E SEUS CHUTES INICIAIS (FIXED: FORÇA O ALGORÍTMO A INICIAR O ESTADO COM O CHUTE INICIAL
INFORMADO) (START: CHUTE INICIAL)
Real Rf(fixed=true, start=Rf_init);
Real Tout1(fixed=true, start=Tout1_init);
Real Tout2(fixed=true, start=Tout2_init);

//DEFINIÇÃO DOS INPUTS (O VALOR DELES É SETADO EM FORMA DE VETOR VIA PYTHON)
//input Real dTm2; //Temperatura media RAT(°C)
input Real Tin1; //Temperatura entrada Petróleo(K)
input Real Tin2; //Temperatura entrada RAT(K)
input Real mo; //Vazão massica de RAT(kg/s)
input Real mic; //Vazão massica de petroleo(kg/s)

```

```
//DEFINIÇÃO DOS OUTPUTS (SERVE PARA INFORMAR QUAL A VARIÁVEL DE SAÍDA (MEDIDA), ÚTIL PARA CÁLCULO DAS
MATRIZES PARA ESTIMADOR DE ESTADOS)
```

```
output Real Tout1m;
output Real Tout2m;
```

```
equation
```

```
dT1=Tin1-Tout2;
dT2=Tout1-Tin2;
dTln*6*(dT1+dT2)=F*(3*((dT1+dT2)^2)-((dT1-dT2)^2));
At*4*4=3.14*(di^2)*n;
Ac*Pt=Di*(Pt-de)*(Le/(N+1));
Atsup=3.14*di*I*n;
Acsup=3.14*(de)*Le*n;
Vo=Ac*Le;
Vi=At*I;
De*(3.13*de)=(4*(Pt^2)-3.14*(de^2));
Nui*ki=hi*di;
Nuo*ko=De*ho;
Rei*At*Mic=mic*di;
Reo*Ac*Mo=mo*De;
Pri*ki=Cpi*Mic;
Pro*ko=Cpo*Mo;
Nui=(Rei^0.8)*(Pri^0.3)*0.024;
Eo*((0.78*log(Reo)-1.5)^2)=1;
Nuo*(1+12.7*((Eo/8)^0.5)*((Pro^(2/3))-1))=Reo*Pro*(1+((De/Le)^(2/3)));
hi*Atsup*ho*Acsup=U*A*(ho*Acsup+hi*Atsup+ho*hi*(Rf));

der(Rf)=0;
der(Tout1)*Vi*rhoi*Cpi = mic*Cpi*(Tin1-Tout1)-U*At*dTln;
der(Tout2)*Vo*rhoo*Cpo = mo*Cpo*(Tin2-Tout2)+U*Ac*dTln;
Tout1m=Tout1;
Tout2m=Tout2;
```

```
end HEModel;
```

```
model HENet
```

```
// Todos trocadores
HEModel HE1, HE2(A=804.2, Di=1.528, Le=5.319, n=2460, N=13), HE3, HE4(A=804.2, Di=1.528, Le=5.319, n=2460, N=13),
HE5(A=785.2, Di=1.522, Le=10.626, l=12.192, n=2416, N=29);
```

```
// Trocador 1
```

```
input Real HE1_Tin1 = HE1.Tin1;
input Real HE1_Tin2 = HE1.Tin2;
input Real HE1_mo = HE1.mo;
input Real HE1_mic = HE1.mic;
output Real HE1_Tout1m = HE1.Tout1m; // saidas que tem medidas - fornecido pro filtro
output Real HE1_Tout2m = HE1.Tout2m;
Real HE1_Tout1 = HE1.Tout1;
Real HE1_Tout2 = HE1.Tout2;
Real HE1_Rf = HE1.Rf;
parameter Real HE1_Rf_init = 450; // condicao inicial da eq diferencial
parameter Real HE1_Tout1_init = 420;
parameter Real HE1_Tout2_init = 450;
```

```
// Trocador 2 - nao tem Tin2 e Tout2
```

```
input Real HE2_Tin1 = HE2.Tin1;
//input Real HE2_Tin2 = HE2.Tin2;
input Real HE2_mo = HE2.mo;
input Real HE2_mic = HE2.mic;
output Real HE2_Tout1m = HE2.Tout1m;
Real HE2_Tout2m = HE2.Tout2m;
Real HE2_Tout1 = HE2.Tout1;
Real HE2_Tout2 = HE2.Tout2;
Real HE2_Rf = HE2.Rf;
parameter Real HE2_Rf_init = 450;
parameter Real HE2_Tout1_init = 440;
parameter Real HE2_Tout2_init = 470;
```

```
// Trocador 3
```

```
input Real HE3_Tin1 = HE3.Tin1;
input Real HE3_Tin2 = HE3.Tin2;
input Real HE3_mo = HE3.mo;
```

```

input Real HE3_mic = HE3.mic;
output Real HE3_Tout1m = HE3.Tout1m;
output Real HE3_Tout2m = HE3.Tout2m;
Real HE3_Tout1 = HE3.Tout1;
Real HE3_Tout2 = HE3.Tout2;
Real HE3_Rf = HE3.Rf;
    parameter Real HE3_Rf_init = 450;
    parameter Real HE3_Tout1_init = 455;
    parameter Real HE3_Tout2_init = 485;

// Trocador 4 - nao tem Tout2
input Real HE4_Tin1 = HE4.Tin1;
input Real HE4_Tin2 = HE4.Tin2;
input Real HE4_mo = HE4.mo;
input Real HE4_mic = HE4.mic;
output Real HE4_Tout1m = HE4.Tout1m;
Real HE4_Tout2m = HE4.Tout2m;
Real HE4_Tout1 = HE4.Tout1;
Real HE4_Tout2 = HE4.Tout2;
Real HE4_Rf = HE4.Rf;
    parameter Real HE4_Rf_init = 450;
    parameter Real HE4_Tout1_init = 470;
    parameter Real HE4_Tout2_init = 490;

// Trocador 5
input Real HE5_Tin1 = HE5.Tin1;
input Real HE5_Tin2 = HE5.Tin2;
input Real HE5_mo = HE5.mo;
input Real HE5_mic = HE5.mic;
output Real HE5_Tout1m = HE5.Tout1m;
output Real HE5_Tout2m = HE5.Tout2m;
Real HE5_Tout1 = HE5.Tout1;
Real HE5_Tout2 = HE5.Tout2;
Real HE5_Rf = HE5.Rf;
    parameter Real HE5_Rf_init = 450;
    parameter Real HE5_Tout1_init = 525;
    parameter Real HE5_Tout2_init = 510;

equation
//HE1.Tin2 = HE3.Tout2; //
HE2.Tin2 = HE4.Tout2; //
//HE3.Tin2 = HE5.Tout2; //
end HENet;

```

Código para rodar o modelo da rede de trocadores

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import numpy as np
from pymodelica import compile_fmu
from pyfmi import load_fmu
from scipy.io.matlab.mio import loadmat
import matplotlib.pyplot as plt

data = loadmat('data_redeSI.mat')
fmu_name = compile_fmu("HENet", "HENET.mo", version='2.0')
init_model = load_fmu(fmu_name) #Carregando o modelo
init_model.reset()#Reset no modelo para não ter erro

opts = init_model.simulate_options() #Opções de simulação - número de pontos, step, tolerâncias e etc..
opts['ncp'] = data['t_exp'].size - 1 #Número de pontos de amostragem

var_input = ['HE1_Tin1', 'HE1_Tin2', 'HE1_mo', 'HE1_mic',
            'HE2_Tin1', 'HE2_mo', 'HE2_mic',
            'HE3_Tin1', 'HE3_Tin2', 'HE3_mo', 'HE3_mic',
            'HE4_Tin1', 'HE4_Tin2', 'HE4_mo', 'HE4_mic',
            'HE5_Tin1', 'HE5_Tin2', 'HE5_mo', 'HE5_mic']

val_input = np.transpose(np.vstack((data['t_exp'], data['HE1_Tin1_in'], data['HE1_Tin2_in'], data['HE1_mo_in'], data['HE1_mic_in'],
data['HE2_Tin1_in'], data['HE2_mo_in'], data['HE2_mic_in'],
data['HE3_Tin1_in'], data['HE3_Tin2_in'], data['HE3_mo_in'], data['HE3_mic_in'],
data['HE4_Tin1_in'], data['HE4_Tin2_in'], data['HE4_mo_in'], data['HE4_mic_in'],
data['HE5_Tin1_in'], data['HE5_Tin2_in'], data['HE5_mo_in'], data['HE5_mic_in'])))

```

```

res = init_model.simulate(start_time=0,final_time=data['t_exp'][-1][-1], input=(var_input,val_input), options = opts)
## Trocador 1
plt.plot(res['time'][1:],res['HE1.Tout1'][1:],'b--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE1_Tout1m_exp'])[1:],'b-')
plt.plot(res['time'][1:],res['HE1.Tout2'][1:],'r--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE1_Tout2m_exp'])[1:],'r-')
plt.legend(['T1out simulado','T1out medido','T2out simulado','T2out medido'])
plt.title('Trocador 1')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

## Trocador 2
plt.plot(res['time'][1:],res['HE2.Tout1'][1:],'b--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE2_Tout1m_exp'])[1:],'b-')
plt.plot(res['time'][1:],res['HE2.Tout2'][1:],'r--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE2_Tout2m_exp'])[1:],'r-')
plt.legend(['T1out simulado','T1out medido','T2out simulado','T2out medido'])
plt.title('Trocador 2')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

## Trocador 3
plt.plot(res['time'][1:],res['HE3.Tout1'][1:],'b--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE3_Tout1m_exp'])[1:],'b-')
plt.plot(res['time'][1:],res['HE3.Tout2'][1:],'r--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE3_Tout2m_exp'])[1:],'r-')
plt.legend(['T1out simulado','T1out medido','T2out simulado','T2out medido'])
plt.title('Trocador 3')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

## Trocador 4
plt.plot(res['time'][1:],res['HE4.Tout1'][1:],'b--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE4_Tout1m_exp'])[1:],'b-')
plt.plot(res['time'][1:],res['HE4.Tout2'][1:],'r--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE4_Tout2m_exp'])[1:],'r-')
plt.legend(['T1out simulado','T1out medido','T2out simulado','T2out medido'])
plt.title('Trocador 4')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

## Trocador 5
plt.plot(res['time'][1:],res['HE5.Tout1'][1:],'b--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE5_Tout1m_exp'])[1:],'b-')
plt.plot(res['time'][1:],res['HE5.Tout2'][1:],'r--')
plt.plot(np.hstack(data['t_exp'])[1:],np.hstack(data['HE5_Tout2m_exp'])[1:],'r-')
plt.legend(['T1out simulado','T1out medido','T2out simulado','T2out medido'])
plt.title('Trocador 5')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

# Comparando as conexões da rede
plt.plot(res['HE1.Tin2'][1:],'m-'), plt.plot(res['HE3.Tout2'][1:],'c--')
plt.legend(['HE1 Tin2','HE3 Tout2'])
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

plt.plot(res['HE2.Tin2'][1:],'m-'), plt.plot(res['HE4.Tout2'][1:],'c--')
plt.legend(['HE2 Tin2','HE4 Tout2'])
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

plt.plot(res['HE3.Tin2'][1:],'m-'), plt.plot(res['HE5.Tout2'][1:],'c--')
plt.legend(['HE3 Tin2','HE5 Tout2'])
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')

```

Código para rodar o filtro de Kalman para o modelo da rede de trocadores

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
import numpy as np
import KalmanFilter28 as KF # importa o pacote
```

```
### argumentos para rodar o KalmanFilter package
```

```

model = 'HENet'
data = 'data_redeSI.mat'

states = ['HE1_Rf','HE1_Tout1','HE1_Tout2',
          'HE2_Rf','HE2_Tout1','HE2_Tout2',
          'HE3_Rf','HE3_Tout1','HE3_Tout2',
          'HE4_Rf','HE4_Tout1','HE4_Tout2',
          'HE5_Rf','HE5_Tout1','HE5_Tout2,']

measures = ['HE1_Tout1m', 'HE1_Tout2m',
            'HE2_Tout1m',
            'HE3_Tout1m', 'HE3_Tout2m',
            'HE4_Tout1m',
            'HE5_Tout1m', 'HE5_Tout2m']

inputs =  ['HE1_Tin1','HE1_Tin2','HE1_mo','HE1_mic',
          'HE2_Tin1', 'HE2_mo','HE2_mic',
          'HE3_Tin1', 'HE3_Tin2','HE3_mo','HE3_mic',
          'HE4_Tin1', 'HE4_Tin2','HE4_mo','HE4_mic',
          'HE5_Tin1', 'HE5_Tin2','HE5_mo','HE5_mic']

outputs = []

# ajuste das matrizes do filtro de Kalman
P0=np.matrix(np.eye(len(states))*1e2)
R0=np.matrix(np.eye(len(measures))*1e2)
Q0=np.matrix(np.eye(len(states))*1e4)
Q0 = np.diag([1e-3,1e4,1e4,1e-3,1e4,1e4,1e-3,1e4,1e4,1e-3,1e4,1e4,1e-3,1e4,1e4])

## roda pacote
KF.Time().tic()
#t, x, y = KF.KalmanFilter(model, data, states, measures, inputs, outputs, P0, Q0, R0).HautusCriterion()
t, x, y = KF.KalmanFilter(model, data, states, measures, inputs, outputs, P0, Q0, R0).DEKF()
tf = KF.Time().toc()

## plota resultados

import matplotlib.pyplot as plt
# carrega dado experimentais
from scipy.io.matlab.mio import loadmat
datamat = loadmat(data,appendmat=False)

# Rf plot
plt.plot(t,x[0], 'g--')

### Trocador 1
plt.plot(t[1:],x[1][1:], 'b--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE1_Tout1m_exp'])[1:],'b-')
plt.plot(t[1:],x[2][1:], 'r--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE1_Tout2m_exp'])[1:],'r-')
plt.title('Trocador 1')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')
plt.legend(['T1out filtro de Kalman','T1out medido','T2out filtro de Kalman', 'T2out medido'])

# Trocador 2
plt.plot(t[1:],x[4][1:], 'b--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE2_Tout1m_exp'])[1:], 'b-')
plt.plot(t[1:],x[5][1:], 'r--')
#plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE2_Tout2m_exp'])[1:], 'r-')
plt.title('Trocador 2')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')
plt.legend(['T1out filtro de Kalman','T1out medido','T2out filtro de Kalman', 'T2out medido'])

# Trocador 3
plt.plot(t[1:],x[7][1:], 'b--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE3_Tout1m_exp'])[1:], 'b-')
plt.plot(t[1:],x[8][1:], 'r--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE3_Tout2m_exp'])[1:], 'r-')
plt.title('Trocador 3')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')
plt.legend(['T1out filtro de Kalman','T1out medido','T2out filtro de Kalman', 'T2out medido'])

```

```
# Trocador 4
plt.plot(t[1:],x[10][1:], 'b--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE4_Tout1m_exp'])[1:], 'b-')
plt.plot(t[1:],x[11][1:], 'r--')
#plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE4_Tout2m_exp'])[1:], 'r-')
plt.title('Trocador 4')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')
plt.legend(['T1out filtro de Kalman','T1out medido','T2out filtro de Kalman', 'T2out medido'])

# Trocador 5
plt.plot(t[1:],x[13][1:], 'b--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE5_Tout1m_exp'])[1:], 'b-')
plt.plot(t[1:],x[14][1:], 'r--')
plt.plot(np.hstack(datamat['t_exp'])[1:],np.hstack(datamat['HE5_Tout2m_exp'])[1:], 'r-')
plt.title('Trocador 5')
plt.xlabel('tempo [min]')
plt.ylabel('temperatura [K]')
plt.legend(['T1out filtro de Kalman','T1out medido','T2out filtro de Kalman', 'T2out medido'])

# Fouling
plt.subplot(2,1,1)
plt.plot(t,x[0]), plt.plot(t,x[3]), plt.plot(t,x[6])
plt.title('Fator de inscrustracao dos trocadores')
plt.legend(['P1','P2','P3'])
plt.subplot(2,1,2)
plt.plot(t,x[9]), plt.plot(t,x[12])
plt.legend(['P4','P5'])
```