



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



Determinação da Incrustação em Trocadores de Calor através de Estimadores de Estado

Autor: Alyne dos Santos Machado

Orientador: Jorge Otávio Trierweiler

Coorientador: Leonardo Nardi Hüffner

Porto Alegre, dezembro de 16

| | |
|---|------|
| Sumário | |
| Agradecimentos | iv |
| Resumo | v |
| Lista de Figuras | vi |
| Lista de Tabelas | vii |
| Lista de Símbolos | viii |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | xi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Custos Decorrentes da Ocorrência da Incrustação | 1 |
| 1.2 Objetivo | 2 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho | 3 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1 Tipos de Incrustação | 5 |
| 2.2 Modelos de Incrustação | 6 |
| 2.3 Formas de Inclusão da Incrustação | 10 |
| 2.4 Técnicas de Reconciliação de Dados | 11 |
| 2.4.1 Reconciliação Dinâmica de Dados | 12 |
| 2.5 Monitoramento da Incrustação | 14 |
| 2.5.1 Filtro de Kalman | 14 |
| 2.5.2 Filtro de Kalman Estendido via Matriz de Riccati – DEKF_DRE | 15 |
| 2.5.3 Teste de Observabilidade | 16 |
| 3 Metodologia para Monitoramento do <i>fouling</i> | 18 |
| 3.1 Caracterização do Sistema e Análise das Variáveis Medidas | 18 |
| 3.2 Desenvolvimento do Modelo Matemático | 18 |
| 3.3 Implementação do Método da Reconciliação de Dados | 18 |
| 4 Caracterização do Sistema e Análise das Variáveis Medidas | 19 |
| 4.1 Estudo de Caso | 19 |
| 4.2 Descrição do Sistema | 19 |
| 4.3 Medidas Disponíveis | 21 |
| 4.4 Análise da Qualidade das Medidas Disponíveis | 22 |
| 5 Descrição do Modelo Matemático | 25 |
| 5.1 Balanço de Energia | 25 |
| 5.2 Abordagem Adotada para Representar a Incrustação | 26 |
| 5.3 Correlações | 27 |
| 6 Implementação do Filtro de Kalman | 29 |
| 6.1 Escolha do Método de Reconciliação de Dados | 29 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.2 | Identificação dos Estados e das Variáveis Medidas | 29 |
| 6.3 | Teste de Observabilidade | 30 |
| 6.4 | Implementação do Método de Reconciliação de Dados | 30 |
| 6.5 | Aplicação do Método de Reconciliação de Dados para Ajuste do fouling | 30 |
| 7 | Resultados e Discussões | 33 |
| 7.1 | Estimação da Incrustação | 33 |
| 7.2 | Determinação da Vazão de Gás | 35 |
| 7.3 | Modelo Incrustação | 35 |
| 8 | Conclusões e Trabalhos Futuros | 39 |
| 8.1 | Quanto ao Modelo | 39 |
| 8.2 | Quanto ao Método de Reconciliação | 39 |
| 8.3 | Quanto ao Modelo de Incrustação | 39 |
| 8.4 | Quanto aos Objetivos | 39 |
| 9 | Referências | 41 |
| 10 | Apêndice I – Propriedades Físico-Químicas dos Fluidos | 45 |
| 10.1 | Fluido Interno | 45 |
| 10.2 | Fluido Externo | 46 |
| 11 | Apêndice II - Análise da Qualidade das Medidas Disponíveis | 47 |
| 12 | Apêndice III – Resultados Testes Ajuste dos Parâmetros | 48 |
| 13 | Apêndice IV – Resultados Testes Estimação da Incrustação | 49 |
| 14 | Apêndice V – Resultados Testes Modelo de Incrustação | 52 |
| 15 | Apêndice VI – Código Modelo | 55 |
| 16 | Apêndice VII – Código em Python | 57 |
| 16.1 | Definição das Bibliotecas | 57 |
| 16.2 | Importando Dados para Leitura | 57 |
| 16.3 | Organizando os Dados Importados | 57 |
| 16.4 | Determinação das Variáveis pelo CoolProp | 57 |
| 16.5 | Cálculo da Densidade do Fluido Interno | 58 |
| 16.6 | Concatenando Dados de Entrada do Modelo | 58 |
| 16.7 | Definição do Modelo | 58 |
| 16.8 | Carregando o Modelo | 58 |
| 16.9 | Implementação Método do Filtro de Kalman | 58 |
| 16.10 | Definição dos Parâmetros Ajustáveis do Filtro | 59 |
| 16.11 | Criação dos Gráficos | 60 |
| 16.12 | Teste de Observabilidade | 61 |

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Química e seu corpo docente pelos ensinamentos, oportunidades e orientações para o desenvolvimento deste estudo.

Ao meu professor orientador Jorge O. Trieweler e ao meu co-orientador, Leonardo N. Hüffner, pela orientação, dedicação e apoio durante a elaboração desta monografia.

Aos meus pais, pelo carinho, incentivo e força.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

Os trocadores de calor são utilizados nos mais diversos ramos industriais apresentando-se sob diferentes configurações e arranjos, podem ser utilizados de forma isolada ou em redes, suprimindo, assim, a necessidade de diversas aplicações. Apesar da vasta literatura encontrada, o *fouling* permanece, ainda, como um fator desconhecido no dimensionamento e monitoramento de trocadores. Este fenômeno causa redução da eficiência de troca térmica e aumento da queda de pressão. Com o objetivo de aumentar a confiabilidade destes equipamentos, utilizou-se uma modelagem associada ao filtro de Kalman estendido em tempo discreto. O emprego desta técnica permitiu a estimação do *fouling* e o refinamento do modelo proposto por dois meios: através da inserção do valor do próprio fator de incrustação estimado no modelo ou da adição de uma equação proposta para o fator de incrustação.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Presença de incrustação em diferentes tipos de trocadores de calor..... | 2 |
| Figura 2.1: Curvas típicas de resistência associada à incrustação | 7 |
| Figura 2.2: Técnicas de Reconciliação de Dados | 12 |
| Figura 2.3: Etapas constituintes da técnica de Filtro de Kalman | 15 |
| Figura 4.1: Configuração do trocador de calor estudado | 20 |
| Figura 6.1: Teste Ajuste de Parâmetros..... | 32 |
| Figura 7.2: Relação vazão mássica de gás e incrustação | 35 |
| Figura 7.3: Modelo de Incrustação – D5..... | 37 |
| Figura 11.1: Análise da variabilidade das medidas disponíveis | 47 |
| Figura 12.1: Temperatura Gás (°C) – Ajuste Parâmetro Q..... | 48 |
| Figura 13.2: Estimção <i>Fouling</i> – D4..... | 50 |
| Figura 14.2: Modelo de Incrustação – D3..... | 53 |
| Figura 14.3: Modelo de Incrustação – D4..... | 54 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1: Parâmetros trocador de calor | 21 |
| Tabela 4.2: Variáveis medidas..... | 21 |
| Tabela 4.3: Desvio padrão das variáveis medidas..... | 22 |
| Tabela 6.1: Identificação dos Estados e Variáveis Medidas para o Estudo de Caso | 29 |
| Tabela 6.2: Classificação dos testes de ajuste de parâmetros..... | 31 |

Lista de Símbolos

a_1, a_2 - constantes empíricas, unidades variáveis

A – área de troca térmica, m^2

A_{int} - área de escoamento tubo interno, m^2

A_i - área de troca térmica tubo interno, m^2

A_{out} - área de escoamento região anular, m^2

A_o - área de troca térmica região anular, m^2

C_b – concentração do reagente precursor da incrustação, $\frac{kg}{m^3}$

C_i – concentração do reagente incrustante, $\frac{kg}{m^3}$

C_p – capacidade térmica específica do fluido a pressão constante, $\frac{kcal}{kg^\circ C}$

C_{pi} - capacidade térmica específica do fluido interno, $\frac{kcal}{kg^\circ C}$

C_{po} - capacidade térmica específica do fluido interno, $\frac{kcal}{kg^\circ C}$

C_v - capacidade térmica específica do fluido a volume constante, $\frac{kcal}{kg^\circ C}$

c – constante empírica, (-)

dT_{ln} – temperatura média logarítmica, $^\circ C$

d_i – diâmetro interno do tubo interno, m

d_{oe} – diâmetro externo do tubo interno, m

D_h – diâmetro hidráulico da região anular, m

D_i – diâmetro interno do tubo externo, m

E_a – energia de ativação, $\frac{kcal}{kmol}$

E – energia interna, kcal

E_i – energia interna do fluido interno, kcal

E_o – energia interna do fluido externo, kcal

E – energia de ativação, $\frac{kcal}{kmol}$

f – fator de atrito, (-)

F – fator de correção da temperatura média logarítmica, (-)

$H_{o,in}$ – entalpia de entrada do fluido externo, $\frac{kcal}{s}$

$H_{o,out}$ – entalpia de saída do fluido externo, $\frac{kcal}{s}$

$H_{i,in}$ – entalpia de entrada do fluido interno, $\frac{kcal}{s}$

$H_{i,out}$ – entalpia de saída do fluido interno, $\frac{kcal}{s}$

h_i – coeficiente convectivo interno, $\frac{kcal}{sm^2\text{°C}}$

h_o – coeficiente convectivo externo, $\frac{kcal}{sm^2\text{°C}}$

k – condutividade térmica da parede, $\frac{kcal}{sm\text{°C}}$

k_{diff} – constante de difusão de primeira ordem, s^{-1}

k_{diff2} – constante de difusão do processo de remoção de incrustação, s^{-1}

k_i – condutividade térmica do fluido interno, $\frac{kcal}{sm\text{°C}}$

k_o – condutividade térmica do fluido externo, $\frac{kcal}{sm\text{°C}}$

k_r – constante de reação de primeira ordem, s^{-1}

l – comprimento correspondente a seção de um passe do trocador, m

L – comprimento total do trocador

M – massa do fluido, kg

\dot{M}_o – vazão mássica de água correspondente a uma seção do trocador, kg

\dot{m} – vazão mássica do fluido, $\frac{kg}{s}$

\dot{m}_i – vazão mássica do fluido interno, $\frac{kg}{s}$

\dot{m}_o – vazão mássica do fluido externo, $\frac{kg}{s}$

Nu_i – número de Nusselt para o fluido interno, (-)

Nu_o – número de Nusselt para o fluido externo, (-)

P – pressão, Pa

Pr_i – número de Prandtl para o fluido interno, (-)

Pr_o – número de Prandtl para o fluido externo, (-)

R – constante dos gases ideal, unidade ajustável

Re_i – número de Reynolds para o fluido interno, (-)

Re_o – número de Reynolds para o fluido iexterno, (-)

R_f^+ – resistência associada à incrustação, $\frac{sm^4\text{°C}}{kcal}$

R_f – resistência à incrustação, $\frac{sm^2\text{°C}}{kcal}$

R_f^* – valor limítrofe para a resistência a incrustação, $\frac{sm^2\text{°C}}{kcal}$

R_{fi} – resistência associada à incrustação interna, $\frac{sm^2\text{°C}}{kcal}$

R_{fo} – resistência associada à incrustação externa, $\frac{sm^2\text{°C}}{kcal}$

R_{fwall} – resistência associada à parede, $\frac{s\text{°C}}{kcal}$

t – tempo, s

T_f, T_e, T_s – temperatura da parede, °C

T_{in1} – temperatura de entrada do fluido interno, °C

T_{in2} – temperatura de entrada do fluido externo, °C

T_{out1} – temperatura de saída do fluido interno, °C

T_{out2} – temperatura de saída do fluido externo, °C

u – velocidade do fluido, $\frac{m}{s}$

U – coeficiente global de troca térmica, $\frac{kcal}{sm^2°C}$

U_0 – coeficiente global de troca térmica para o trocador limpo, $\frac{kcal}{sm^2°C}$

V – volume de reação, (-)

V_T – volume do trocador de calor, m^3

y – constante empírica, (-)

α – coeficiente estequiométrico, (-)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ – parâmetros empíricos, unidades variáveis

β – correlação dos coeficientes de transferência de calor entre o lado caco e tubos, (-)

ρ_{di} – massa específica do material incrustado, $\frac{kg}{m^3}$

ρ – densidade do fluido em escoamento, $\frac{kg}{m^3}$

λ_{di} – condutividade térmica do material incrustado, $\frac{kcal}{sm°C}$

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

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

\forall - parâmetro de probabilidade, (-)

Lista de Abreviaturas e Siglas

CEKF - Filtro de Kalman Estendido com Restrição (*Constrained Extended Kalman Filter*)

CKF - Filtro de Kalman com Restrição (*Constrained Kalman Filter*)

DEKF_DRE - Filtro de Kalman discreto estendido via equação da matriz de Riccati (*Extended Kalman Filter via Discrete-Time Riccati Equation*)

EKF - Filtro de Kalman Estendido (*Extended Kalman Filter*)

KF - Filtro de Kalman (*Kalman Filter*)

MHE - Estimacão de horizonte móvel (*Moving Horizon Estimation*)

MLR - Método da Verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation*)

NLP - Programaco não Linear (*Non Linear Programming*)

TEMA - *Standards of The Tubular Exchangers Manufactures Association*

UKF - Filtro de Kalman *Unscented* (*Unscented Kalman Filter*)

1 Introdução

Empregado nos mais diversos processos industriais e com múltiplas finalidades, os trocadores de calor se apresentam em diferentes geometrias e configurações. Atualmente, podem ser utilizados em sistemas de integração energética, para recuperação de matéria prima, para separação de fases, para remoção do calor residual de correntes, em sistemas de pré-aquecimento e até mesmo em associação com outros equipamentos para controle de temperatura (SADOUK, 2009).

Dada a vasta utilização em indústrias de diferentes ramos, incluindo refinarias, de papel/celulose, dessalinização da água, alimentícia, de laticínios e derivados, sua manutenção e eficiência são assuntos de notoriedade em estudos e análises (SADOUK, 2009). Dentre os diversos estudos presentes na literatura destacam-se aqueles que tratam do problema de incrustações em superfícies sólidas através das quais se processa a transferência de calor.

A incrustação, chamada em inglês de *fouling*, consiste na deposição de material sobre superfícies de troca térmica, e leva a inúmeros problemas operacionais e de dimensionamento. Dentre estes, encontram-se a redução da transferência de calor e a perda de carga no equipamento decorrente da redução da área transversal de escoamento e da superfície de troca térmica (SCHREIER; FRYER, 1995).

Apesar da experiência acumulada ao longo dos anos sobre operação e manutenção de trocadores de calor, a incrustação é considerada ainda o fator de menor previsibilidade devido à complexidade associada a este fenômeno (SADOUK, 2009).

1.1 Custos Decorrentes da Ocorrência da Incrustação

Estudos mostram que mais de 90% dos trocadores de calor industriais apresentam redução da capacidade de troca térmica devido à deposição de materiais (STEINHAGEN et al., 1993 p. 28).

Esse fato também pode ser evidenciado pela Figura 1.1, a qual mostra que, dos 1942 trocadores de calor analisados, mais de 90% apresentaram problemas de incrustação (STEINHAGEN et al., 1993 p. 22).

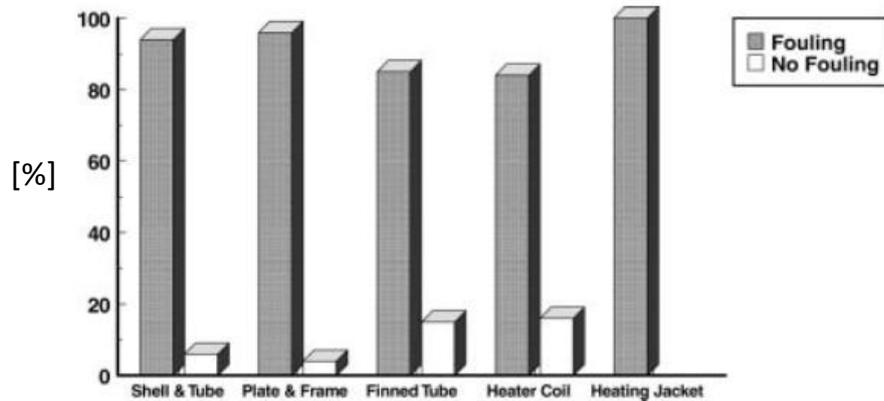


Figura 1.1: Presença de incrustação em diferentes tipos de trocadores de calor

Fonte: (STEINHAGEN et al., 1993 p. 22)

De forma a compensar os efeitos provocados pela incrustação, o superdimensionamento de trocadores de calor se tornou uma medida amplamente difundida. Pesquisas mostram que este superdimensionamento representa, em média, 30% a mais do valor de área requerida para realizar a troca térmica (GARRETT-PRICE, 1985), e que esse excesso pode corresponder a até 25% de custo de capital adicional (PRITCHARD, 1987 apud. STEINHAGEN et al., 1993).

Custos adicionais com fundações, espaço extra, transporte, instalação, manutenção, limpeza e perda de produção também devem ser considerados. Segundo Woods *et al.* (1976) custos de instalações tendem a crescer cerca de duas a três vezes com o tamanho do equipamento.

A detecção e a caracterização da incrustação tornaram-se ferramentas poderosas para redução de custos e aumento da confiabilidade de unidades industriais e de equipamentos.

1.2 Objetivo

Considerando os problemas ocasionados pela presença de incrustações sobre superfícies de troca térmica, o presente trabalho tem por finalidade associar um modelo matemático baseado em equações de balanços de energia com técnicas de reconciliação dinâmica de dados, de forma a desenvolver uma ferramenta para estimação da incrustação em trocadores de calor.

As principais motivações do estudo consistem em fornecer uma ferramenta capaz de verificar a eficiência de redes de trocadores de calor, auxiliar na determinação de

paradas programadas para manutenção dos equipamentos, bem como permitir a simulação de estratégias operacionais.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta monografia está dividida em sete capítulos. No primeiro, são definidos o fenômeno de incrustação e seus diferentes mecanismos de ocorrência; e também é apresentada uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos existentes na literatura para a sua caracterização e de técnicas de reconciliação de dados utilizadas para o monitoramento do processo de incrustação, bem como o equacionamento do método do Filtro de Kalman utilizado neste estudo.

No segundo capítulo é apresentada de forma esquemática e resumida um passo a passo para realização do monitoramento *on-line* da incrustação, este inclui uma etapa de caracterização do sistema e identificação das variáveis medidas, o equacionamento do modelo proposto e a forma de implementação do monitoramento da incrustação.

Em seguida, descreve-se o estudo de caso e o sistema a ser analisado. Também são apresentadas as variáveis utilizadas do trocador de calor, bem como as medidas disponíveis do sistema e a análise de qualidade das mesmas.

O modelo proposto para o trocador de calor encontra-se no quarto capítulo, assim como as hipóteses e considerações realizadas. Neste são identificados os balanços de energia utilizados e correlações necessárias para estruturação do modelo, bem como a abordagem utilizada para a inclusão do *fouling*.

A implementação do método de reconciliação de dados para realização do monitoramento da incrustação é discutida no quinto capítulo. Neste são apresentados o teste de observabilidade para o sistema e o ajuste de parâmetros realizado para o método do Filtro de Kalman estendido em tempo discreto via matriz de Ricatti.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos pela aplicação de técnica de reconciliação, assim como a proposição de uma melhoria no modelo e a análise da relação entre a vazão mássica de fluido e o fator de incrustação.

Por fim são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros evidenciando a relevância e importância deste estudo no domínio acadêmico, por meio da aplicação dos métodos de reconciliação em problemas de engenharia, como no campo industrial, através da criação de uma ferramenta que possibilite o monitoramento de redes e unidades reais.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tipos de Incrustação

A incrustação é o fenômeno que provoca o acúmulo de material indesejado sobre superfícies que realizam troca térmica, acabando por comprometer a capacidade de transferência de calor. Essa deposição consiste em um dos problemas mais importantes em trocadores de calor, além de ser um fenômeno extremamente complexo (SADOUK, 2009).

A ocorrência de incrustação pode ser classificada segundo sua natureza físico-química em seis diferentes mecanismos (SADOUK, 2009) (LANEZ; KHADER, 2015).

- **Particulada:** consiste na deposição de partículas suspensas no fluido sobre uma superfície. Esse tipo de deposição é fortemente influenciada por fatores como concentração de partículas, velocidade de escoamento e temperatura do fluido;
- **Cristalização ou precipitação:** consiste na dissolução de cristais em fluidos saturados, devido às variações de solubilidade e subsequente precipitação sobre a superfície. Esse processo geralmente ocorre quando um dos fluidos de troca térmica é a água ou outro líquido que apresenta sais dissolvidos naturalmente;
- **Químico:** a deposição, neste caso, está atrelada a reações químicas entre os diferentes componentes que constituem o fluido em escoamento, neste caso, a superfície não participa como um reagente. Entretanto, a superfície de troca térmica pode servir como um catalisador, como ocorre nas reações de craqueamento, polimerização e auto-oxidação. Este tipo de deposição está presente em inúmeras indústrias, tais como petroquímicas no resfriamento de gases e óleos;
- **Corrosão:** esta envolve reações químicas ou eletroquímicas entre a superfície de troca térmica e o fluido em escoamento, as quais levam à corrosão do material, causando alterações nas características térmicas do mesmo, além de favorecer a formação de incrustações;
- **Biológica:** consiste na fixação e crescimento de microrganismos sobre a superfície de troca térmica. Altamente presente, quando um dos fluidos de troca térmica é a água;

- **Solidificação:** é o congelamento de um líquido puro ou do componente de maior ponto de solidificação. A separação de ceras de correntes quentes, quando em contato com superfícies frias consiste em um exemplo típico deste tipo de deposição. Tal mecanismo ocorre em processos com operação de temperaturas baixas ou próximas à temperatura ambiente.

2.2 Modelos de Incrustação

A deposição de material sobre superfícies de troca térmica ocasiona uma série de problemas operacionais e custos adicionais industriais, por isso a caracterização e mitigação desse fenômeno, obtiveram notoriedade no campo científico.

O desenvolvimento de equações que caracterizassem o fenômeno de incrustação passou por diversas abordagens. Inicialmente, foi caracterizado por equações que relacionavam a variação da incrustação com o tempo por meio de constantes empíricas, em seguida, por meio dos ditos modelos mecanicistas, sendo sua formulação mais completa a proposta por Epstein (1983).

McCabe e Robinson (1924 p. 479 v. 16) foram pioneiros no estudo de caracterização e predição do fenômeno conhecido como *fouling* e por meio de análises da taxa de deposição em evaporadores de fluxo de calor constante. Os autores propuseram a seguinte equação:

$$R_f = \frac{\left[\left(1 + a_1 \frac{1}{U_o^2} t \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]}{U_o} \quad (2.1)$$

Nessa equação, a_1 corresponde à constante empírica, a ser determinada de acordo com o problema; U_o ao coeficiente global de transferência de calor para o trocador limpo; R_f , o fator de resistência associada ao fenômeno de incrustação; e t , o tempo.

O início dos anos 1950 foi marcado pela publicação de inúmeros estudos que buscaram correlacionar o fenômeno de incrustação com a redução de troca térmica, estes foram publicados no “Standards of The Tubular Exchangers Manufactures Association”, ou TEMA, os quais, posteriormente, foram revisados por Chenoweth (1990 apud Müller-Steinhagen, 2011). Esses estudos permitiram, com base em dados experimentais, a determinação de curvas típicas para a incrustação, apresentadas na Figura 2.1, as quais serviram de base para formulação de diversos trabalhos, contribuindo, assim, para o desenvolvimento de novos modelos e abordagens.

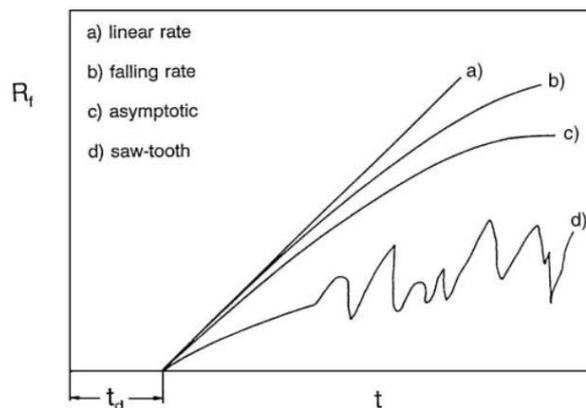


Figura 2.1: Curvas típicas de resistência associada à incrustação

Fonte: (Müller-Steinhagen, 2011 pg 3)

Kern e Seaton (1959 apud Rmiews, 1977) aprimoraram o modelo de caracterização da incrustação ao propor que esse fenômeno era composto por, além do termo de deposição, um termo de remoção, conforme apresentado na equação seguinte. Essa nova consideração remodelou a forma da equação de caracterização da incrustação, através da incorporação de um valor limítrofe para a mesma.

$$R_f = R_f^* [1 - e^{(-a_2 t)}] \quad (2.2)$$

Em que, a_2 corresponde à constante empírica, a ser determinada de acordo com o problema e R_f^* , o valor limítrofe da incrustação.

Hasson e Zahavi (1970) contribuíram para uma melhor compreensão sobre o mecanismo de incrustação ao estudar a deposição de sulfato de cálcio, CaSO_4 , sobre geometrias anulares. Durante os experimentos, concluíram que o fenômeno de deposição é composto de duas etapas: uma etapa inicial, de nucleação, e uma segunda, de crescimento dos cristais.

Apesar de o modelo de Kern-Seaton e das pesquisas sobre os mecanismos de incrustação representarem um importante avanço para a compreensão do processo físico de deposição e remoção de partículas sobre superfícies de troca térmica, foi somente em 1972 que Taborek *et al.* (1972 apud. RMIEWS, 1977) mapearam a correlação entre os diferentes mecanismos de incrustação e as diferentes condições de operação (MÜLLER-STEINHAGEN, 2011). Taborek *et al.* (1972 apud. RMIEWS, 1977) utilizaram a concepção de deposição e remoção proposta por Kern-Seaton para postular um modelo que englobava as características químicas da água e os seus efeitos sobre a resistência de incrustação.

A equação proposta por Taborek *et al.* (1972 apud. RMIEWS, 1977) apresenta dois termos: um associado à deposição de material, sendo função da temperatura na superfície, sob a forma da expressão de Arrhenius e de parâmetros químicos da água; e outro, à remoção, dado por uma função da tensão de cisalhamento e da camada de material incrustado.

Após os estudos realizados por Taborek *et al.* (1972 apud. RMIEWS, 1977), uma nova abordagem de caracterização da incrustação passou a ser utilizada pelos pesquisadores. Nesta nova concepção, os modelos propostos passaram a ser denominados de “modelos mecanicistas”. Baseando-se em quatro mecanismos básicos, o fenômeno de incrustação, desde então, passou a ser dividido em reação química, transferência de massa, deposição e evaporação, que podem ocorrer simultaneamente, em combinações ou de forma individual (BOMBARDELLI *et al.*, 2005).

Dentro dessa nova metodologia, Fernandez-Baujin e Solomon (1976) propuseram um modelo simplificado aplicado somente para superfícies planas, no qual são considerados os mecanismos de transferência de massa e de reação química. O modelo proposto apresenta a seguinte forma:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\alpha}{\rho_{di}\lambda_{di}} \left(\frac{C_b}{\frac{1}{k_{diff}} + \frac{1}{k_r}} \right) \quad (2.3)$$

Esse modelo compreende dois termos: um relativo à difusão; outro, à reação química sendo a velocidade de incrustação determinada pela etapa mais lenta. Em que, α é o coeficiente estequiométrico; C_b , a concentração do agente precursor da incrustação; λ_{di} e ρ_{di} , a condutividade térmica e a massa específica do material depositado respectivamente; e k_{diff} e k_r são, respectivamente, as constantes de difusão e de reação química, ambas de primeira ordem.

Reduzindo a contribuição difusiva a um parâmetro de probabilidade “ Ψ ”, dada a sua complexidade de determinação, e dado que reações químicas são dependentes da temperatura, e podem ser relacionadas pela expressão de Arrhenius, obtém-se a seguinte equação, proposta por Paterson e Fryer (1988):

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\alpha}{\rho_{di}\lambda_{di}} \Psi V k_r C_b \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2.4)$$

Na expressão acima, T corresponde à temperatura da superfície de troca térmica; R , à constante dos gases ideais; V , ao volume de reação; e E_a , à energia de ativação da reação que leva à formação de material sobre a superfície.

Crittenden e Kolaczkowski (1979 apud BOMBARDELLI et al., 2005) propuseram uma melhoria ao inserir um termo relativo ao mecanismo de remoção da incrustação; a equação que descreve o modelo de incrustação é dada por:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\alpha}{\rho_{di}\lambda_{di}} \left(\frac{C_b}{\frac{1}{k_{diff}} + \frac{1}{k_r}} - k_{diff} C_i \right) \quad (2.5)$$

Na equação (2.5) o fator C_i corresponde à concentração de agente incrustante e k_{diff} é o fator de difusão associado ao fenômeno de remoção.

Epstein (1983) consolidou as diferentes etapas da incrustação e seus diferentes mecanismos de deposição. A partir de então, a incrustação passou a ser modelada como um processo constituído de quatro etapas: transporte, reação, fixação e remoção. Esse novo modelo permitiu uma abordagem mais sistemática sobre a investigação e a mitigação da incrustação em trocadores de calor (MÜLLER-STEINHAGEN, 2011).

Em 1995, Ebert e Panchal (1995) propuseram o denominado “*threshold model*”, o modelo “limítrofe” equacionado por:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha_1 Re^\beta \exp\left(\frac{-E_a}{RT_\varepsilon}\right) - \alpha_2 \frac{f}{2} \rho u^2 \quad (2.6)$$

Na equação (2.6), α_1 e α_2 são constantes empíricas da equação; β , a relação entre o coeficiente de transferência de calor entre o lado do casco e o dos tubos; Re , o número de Reynolds.

Da equação proposta por Ebert e Panchal (1995), o primeiro termo mostra que a formação da incrustação depende da reação química e da temperatura na superfície, T_ε , na forma de Arrhenius, e o segundo termo corresponde ao mecanismo de remoção, sendo função da velocidade do fluido, u , e do fator de atrito, f , o qual é dado de acordo com o tipo do regime de escoamento (YEAP et al., 2004).

Após a consolidação realizada por Epstein (1983) e o modelo proposto por Ebert-Panchal (1995), diversos estudos foram publicados com base nos modelos desenvolvidos por esses autores.

Saleh *et al.* (2003) propuseram um modelo para a resistência da incrustação dado por:

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha_4 P^y u^c \exp\left(\frac{-E_a}{RT_s}\right) \quad (2.7)$$

Em que, α_4 , y e c correspondem às constantes empíricas determinadas de acordo com o problema, e P , à pressão do sistema.

Por fim, Nasr e Givi (2006) propuseram um modelo baseado no de Ebert-Panchal (1995), dado pela equação a seguir. Em que α_5 e α_6 são constantes empíricas do modelo, e T_f , a temperatura do fluido

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha_5 Re^{-0.8} \exp\left(\frac{-E_a}{RT_f}\right) - \alpha_6 Re^{0.4} \quad (2.8)$$

Apesar das melhorias e descobertas realizadas no campo científico, ao longo dos anos, estes modelos ainda são dependentes de constantes empíricas o que torna cada estudo de caso único e específico.

A definição da equação de caracterização da incrustação consiste em uma etapa fundamental e de criticidade, visto que a mesma deve predizer de forma satisfatória seu comportamento, englobando todos os mecanismos e etapas presentes, além de necessitar a determinação dos fatores empíricos, quando necessário.

2.3 Formas de Inclusão da Incrustação

Dentre os diversos estudos de caracterização da incrustação existentes na literatura, observa-se que a abordagem do fator de deposição no equacionamento do modelo pode ser feita de diferentes maneiras, sendo a formulação mais completa descrita pela equação (2.9). Esta equação é normalmente utilizada para o dimensionamento de trocadores de calor. É importante observar que já estão incluídos os fatores de incrustações tanto para parte interna, quanto para a parte externa do trocador (MÜLLER-STEINHAGEN, 2011).

$$\frac{1}{UA} = \left(\frac{1}{h_i} + R_{fi}\right) \frac{1}{A_i} + R_{wall} + \left(\frac{1}{h_o} + R_{fo}\right) \frac{1}{A_o} \quad (2.9)$$

As variáveis A , R_f e h correspondem respectivamente à área de troca térmica, ao fator de incrustação e ao coeficiente de transferência de calor convectivo, sendo os subscritos “i” e “o” utilizados para identificar a parte interna e externa, respectivamente, do trocador. E, ainda R_{wall} a resistência associada à parede.

Rearranjando os termos h_i , h_o e R_{wall} da equação (2.9) em um único termo, pode-se obter a seguinte equação, na qual U_o corresponde ao coeficiente de transferência de calor do trocador limpo.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_o} + R_{fi} + R_{fo} \quad (2.10)$$

Baraldi (2011) utilizou uma abordagem similar para realizar um estudo de otimização do processo de limpeza em trocadores de calor em uma empresa do ramo petroquímico.

Petermeier *et al.* (2002) realizaram estudos sobre o processo de incrustação em indústrias de laticínios, em seu equacionamento eles utilizaram uma simplificação da expressão anterior, em que concatenaram a resistência à incrustação interna e externa em um único fator.

Assim, juntando os fatores de incrustação interna e externa em um único fator, obtém-se a expressão proposta por Schreier e Fryer (1995) e Changani *et al.* (1997) dada por:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_o} + R_f \quad (2.11)$$

Wallhäußer *et al.* (2012) adotaram a mesma abordagem feita por Schreier e Fryer (1995) para detecção de incrustação em trocadores de calor em indústrias alimentícias.

Dado os diversos estudos e análises presentes na literatura fica evidente que a equação associada à incrustação para formulação do modelo de trocadores de calor apresenta-se de diversas formas, ficando a critério do autor sua abordagem, dada a disponibilidade de dados e estruturação do seu estudo.

Entretanto, escolher o modelo que descreve o comportamento da incrustação consiste em uma tarefa de análise crítica, visto que o mesmo dependerá dos mecanismos associados ao fenômeno de deposição presentes.

De forma a não prejudicar a precisão do modelo, neste estudo adotou-se a seguinte abordagem: O modelo desenvolvido para o trocador de calor baseou-se em uma equação geral na qual o termo de resistência não assume qualquer expressão, posteriormente analisou-se o resultado obtido e verificou-se a adequação de um dos modelos propostos existentes na literatura.

Assim, a abordagem escolhida para determinação da incrustação, no presente estudo, é similar a equação (2.9) a partir da qual agrupou-se os fatores de resistência interna e externa associados à incrustação ao da parede do trocador em um único fator.

2.4 Técnicas de Reconciliação de Dados

A reconciliação de dados permite melhorar a confiabilidade das medições de uma planta, uma vez que distribui os erros entre as diferentes medições respeitando a relação entre as grandezas decorrentes da modelagem matemática que descreve o sistema. Os diversos métodos existentes consistem basicamente na resolução de problemas de otimização através da minimização do erro quadrático entre as medidas lidas e as estimadas por modelos. Os diferentes métodos de reconciliação apresentam restrições

baseadas nos modelos do processo e, portanto, podem ser: lineares, bilineares, não lineares, estáticos ou dinâmicos (FARIAS, 2009).

A Figura 2.2 mostra um panorama das diferentes técnicas de reconciliação de dados, assim como métodos de resolução dos problemas de otimização.

| Problema | Estacionário | | | Dinâmico | |
|-----------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| Restrição | Linear | Bilinear | Não-linear | Linear | Não-linear |
| Técnicas | Solução Analítica | Matriz de Projeção | QP | Filtros de Kalman | Filtros de Kalman estendidos |
| | QP | Solução aproximada | SQP | MHE | Solução Bayesiana |
| | SQP | Decomposição QR | Linearização | Redes Neurais | Redes Neurais |
| | Reconciliação Robusta | Linearização | $MINLP$ | Solução Bayesiana | $NDDR$ |
| | Matriz de Projeção | QP | Redes Neurais | Reconciliação Robusta | Filtros Particulados |
| | Decomposição QR | SQP | Reconciliação Robusta | <i>Wavelets</i> | |
| | $MILP$ | $MILP$ | Algoritmos Genéticos | | |
| | <i>Error in Variables</i> | Reconciliação Robusta | | DDR | |

Figura 2.2: Técnicas de Reconciliação de Dados

Fonte: (FARIAS, 2009)

Apesar da vasta literatura encontrada para o tratamento de reconciliação estática de dados, grande parte dos problemas de engenharia se apresentam como problemas não lineares e dinâmicos, tornando, assim, as técnicas de reconciliação estática ineficientes para o tratamento destes problemas.

2.4.1 Reconciliação Dinâmica de Dados

Avanços na resolução de problemas de reconciliação dinâmica foram feitos por Gelb (1974 apud Prata, 2009), que utilizou o método atualmente conhecido como Filtro de Kalman (KF) para redução do ruído em medidas e determinação de parâmetros. Esse método foi desenvolvido em 1960 por Rudolf E. Kalman (1960) para auxiliar no projeto de sistemas de controladores lineares.

Stanley e Mah (1977 apud Prata, 2009) adaptaram o método de Filtro de Kalman discreto para a condição de estado quase estacionário; a aplicação do método permitiu a determinação de vazões e temperaturas em uma refinaria.

A técnica de KF acabou sendo amplamente utilizada e, em 1995, Makni *et al.* (1995 apud Prata, 2009) aplicaram a técnica para determinar vazões e concentrações em um circuito de beneficiamento de minério.

Schmidt *et al.* (1962) aprimoraram o método de filtro de Kalman ao trabalhar com problemas não lineares para estimação da posição e velocidades de naves espaciais. Eles desenvolveram o denominado filtro de Kalman estendido (EKF) o qual foi amplamente utilizado. Dhaouadi *et al.* (1991) utilizaram EKF na estimação da posição e velocidade do rotor de um motor de ímã permanente, e Wang e Papageorgiou (2005), para estimação do tráfego em estradas.

Apesar de as técnicas de filtro de Kalman e do filtro de Kalman estendido terem ganhado popularidade e terem sido amplamente utilizados em problemas acadêmicos e em algumas aplicações práticas, como em Muske e Edgar (1998 apud Prata, 2009), elas apresentam deficiência quanto a problemas com restrições de igualdade e desigualdade.

Modificações nos métodos de KF e EKF foram realizadas de forma a contornar as dificuldades relativas às restrições: Gesthuisen *et al.* (2001 apud Salau, 2009) propuseram o CEKF, filtro de Kalman estendido com restrições para problemas não lineares, e Simon e Chia (2001 apud Prata, 2009), o filtro de Kalman com restrição para sistemas lineares, CKF.

Jang *et al.* (1986) compararam os métodos de EKF e NLP, ou “*Non-Linear Programming*” em inglês, em problemas de estimação de parâmetros não lineares, e observaram que a programação não linear apresenta-se superior. No entanto, apesar de sua robustez, os métodos baseados na programação não linear apresentam um elevado custo computacional, o que compromete o desempenho em tempo real do método.

Dadas as dificuldades observadas para solução de problemas de reconciliação dinâmica, Liebman *et al.* (1992 apud Prata, 2009) propuseram um novo método para reconciliação de dados não lineares com restrições de desigualdade. Eles utilizaram o método da programação não linear para minimização da função objetivo de quadrados ponderados, além de discretizar as equações diferenciais e utilizar a programação quadrática sucessiva para resolução do problema de otimização.

Dada a grande utilização da técnica de EKF e observada suas limitações na aplicação de problemas de engenharia, Julier *et al.* (2000) propuseram um novo método que também se baseia na técnica recursiva do filtro de Kalman estendido, o UKF, “*Unscented Kalman Filter*” em que, diferentemente do EKF, não lineariza o modelo para resolução do

problema, o que o torna uma ferramenta mais precisa na resolução de sistemas não lineares, tornando-se, também, uma alternativa no caso de problemas fortemente não lineares.

O MHE, “Moving Horizon Estimation” (ROBERTSON et al., 1996) e (MUSKE e RAWLINGS, 1995) contorna de forma satisfatória os problemas de restrições encontradas pelo EKF, uma vez que inclui em sua formulação, além de restrições físicas para os estados, como o CEKF, um horizonte de predição maior e móvel ao longo da trajetória.

Benjamin *et al.* (2010) realizaram um estudo comparativo entre as técnicas de EKF, MHE e UKF para o monitoramento de trocadores de calor. A análise evidenciou que o EKF mostrou-se incapaz de resolver o problema proposto e os outros métodos mostraram-se competitivos entre si, sendo o MHE o que apresentou melhores resultados.

2.5 Monitoramento da Incrustação

Considerando as diversas técnicas de reconciliação de dados existentes na literatura, observa-se que o método de redes neurais e os do filtro de Kalman são as mais utilizadas para realização de estudos de monitoramento de incrustação em indústrias.

Navvab *et al.* (1988) realizaram o monitoramento de incrustação em refinarias, por meio da utilização do método de redes neurais em trocadores bi-tubulares e casco tubo. Em 2005, Riverol e Napolitano (2005) também fizeram uso de técnicas de rede neural para realizar o monitoramento e determinação de incrustação em trocadores de placa em processos de pasteurização de leite.

Gudmundur *et al.* (2007) aplicaram a técnica de filtro de Kalman estendido, EKF, no monitoramento da incrustação em trocadores duplo tubo para um sistema de recuperação de calor em que ambos os fluidos consistiam em água. Os resultados obtidos mostraram que o método utilizado se apresentou como uma boa ferramenta para o monitoramento *on-line* do fator de incrustação, visto que o mesmo se mostrou sensível a mudanças e permitiu, também, estimar os estados de forma satisfatória.

2.5.1 Filtro de Kalman

O método do filtro de Kalman consiste, basicamente, em um processo matemático iterativo que utiliza um conjunto de dados medidos provindos do processo real para estimar ou corrigir o valor dos estados simulados ou de um parâmetro desejado do modelo matemático. A figura a seguir exemplifica de forma ilustrativa a técnica:

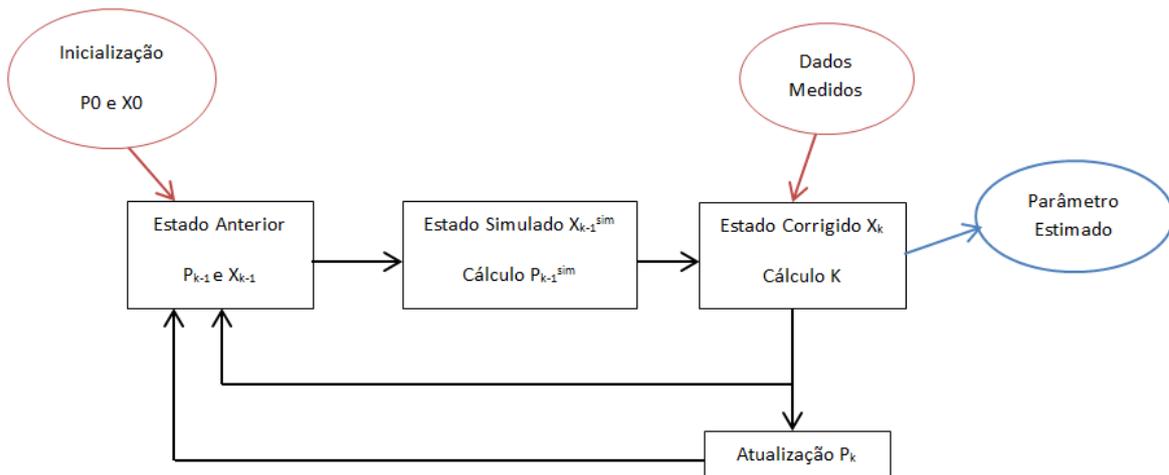


Figura 2.3: Etapas constituintes da técnica de Filtro de Kalman

2.5.2 Filtro de Kalman Estendido via Matriz de Riccati – DEKF_DRE

A Figura 2.3 apresenta de forma esquemática o funcionamento da técnica, sendo x o vetor de estados governado por equações diferenciais não lineares e contínuas no tempo, y o vetor discreto para medidas.

$$\dot{x} = n(x, u, t) + w(t) \quad (2.12)$$

$$y_k = g_k(x_k, t_k) + v_k \quad (2.13)$$

Considerando que w e v correspondem aos ruídos do processo e das medidas, respectivamente, os quais apresentam uma distribuição branca Gaussiana, de média zero e matrizes de covariância Q e R :

$$w(t) = (0, Q) \quad (2.14)$$

$$v_k = (0, R_k) \quad (2.15)$$

A técnica do filtro de Kalman pode ser dividida em três etapas: a predição dos estados, que leva em consideração o modelo desprezando-se os distúrbios; o cálculo da matriz de covariância do processo, matriz P ; e a correção dos estados, através da distribuição da imprecisão entre as medidas e o modelo, por meio do ganho de Kalman. (SCHWEINBERGER, 2009)

A técnica DEKF_DRE consiste em uma variação do DEKF, Filtro de Kalman Estendido em tempo Discreto, na qual se faz o uso da equação da matriz de Riccati para representação da matriz de covariância do processo, matriz P (SALAU, 2009).

Predição

$$x_k^{sim} = n(x_{k-1}^{corr}, u) \quad (2.16)$$

Em que x e y representam os vetores de estados e medidas do problema, w e v os vetores do ruído associado ao processo e as medidas, e u as entradas do sistema. O subscrito “ k ” corresponde ao passo atual de iteração da técnica e o “ $k-1$ ” o passo anterior, ou dito passado.

Correção

Nessa etapa calcula-se, também, o dito ganho de Kalman K_k , responsável pela distribuição das incertezas dos estados estimados.

$$K_k = P_{k-1}G_k(G_kP_{k-1}G_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.17)$$

$$x_k^{corr} = x_k^{sim} + K_k(y_k - Gx_{k-1}) \quad (2.18)$$

Calculo da matriz P

Como citado anteriormente, nesta abordagem utilizou-se a equação da matriz de Riccati para o cálculo da matriz de covariância do processo, assim a mesma é calculada e atualizada simultaneamente ao final de cada passo de iteração.

$$P_k = \varphi_{k-1}P_{k-1}\varphi_{k-1}^T - (\varphi_{k-1}P_{k-1}G_k^T)(G_kP_{k-1}G_k^T + R_k)^{-1}(G_kP_{k-1}\varphi_{k-1}^T) + Q_{k-1} \quad (2.19)$$

Em que

$$N_k = \left(\frac{\partial n}{\partial x} \right)_{(\hat{x}_k/x_{k-1})} \quad (2.20)$$

$$G_k = \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)_{(\hat{x}_k/x_{k-1})} \quad (2.21)$$

$$\varphi_k = e^{N_k(t_k - t_{k-1})} \quad (2.22)$$

Sendo φ a matriz de transição dos estados no passo k ; N , a matriz jacobiana do sistema com relação aos estados; e G , a matriz jacobiana das medidas com relação aos estados.

2.5.3 Teste de Observabilidade

Para aplicação de métodos de reconciliação de dados, alguns testes são realizados, tais como o teste de redundância, no qual se identifica quais variáveis são ou não necessárias para observabilidade do sistema, e, ainda, o próprio teste de observabilidade, através do qual se determina se é possível ou não reconstruir os estados ou calcular parâmetros a partir das medidas disponíveis (Oliveira Junior, 2006).

Este teste pode ser realizado através do critério de Hautus, o qual define que sendo o sistema linear formado pelas matrizes jacobianas N e G , descritas pelas equações (2.20)

e (2.21) o mesmo é dito observável se o posto da matriz M é igual ao número de estados do sistema para todos os valores característicos da matriz N (SALAU, 2009).

Sendo M dada pela equação (2.23), em que $\lambda(i)$ são os autovalores da matriz N .

$$M(i) = \begin{bmatrix} \lambda(i)I - N \\ G \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

3 Metodologia para Monitoramento do *fouling*

O monitoramento *on-line* da incrustação de trocadores de calor é feito através de três etapas: caracterização do problema e análise da qualidade das variáveis medidas; desenvolvimento do modelo matemático; e implementação do método de reconciliação de dados, sendo esta equacionada pelo método do Filtro de Kalman Estendido em tempo Discreto via Equação da Matriz de Ricatti.

3.1 Caracterização do Sistema e Análise das Variáveis Medidas

Esta etapa consiste na descrição do sistema a ser estudado, bem como a caracterização do problema e das variáveis disponíveis que poderão ser utilizadas como constantes e parâmetros no equacionamento, bem como variáveis de entrada para o método do Filtro de Kalman.

3.2 Desenvolvimento do Modelo Matemático

A construção de um modelo matemático para o trocador deve ser feita da forma mais fidedigna possível aos fenômenos associados à transferência de calor. Entretanto, sua capacidade de representação do processo real acaba por ser comprometida devido à falta de informações ou devido às simplificações e hipóteses adotadas para construção do modelo, de modo a torná-lo mais rápido visando à aplicação *on-line* da metodologia.

O equacionamento pode ser realizado seguindo os passos descritos abaixo:

- 1) Identificação do Volume de Controle;
- 2) Identificação das Simplificações e Hipóteses Adotadas;
- 3) Determinação do método do equacionamento: balanços mássicos, energéticos, método de NUT;
- 4) Abordagem do Fator de Incrustação Adotada;
- 5) Correlações utilizadas e Equações Auxiliares

3.3 Implementação do Método da Reconciliação de Dados

A implementação do método pode ser feita por meio dos seguintes passos:

- 1) Escolha do Método de Reconciliação de Dados
- 2) Identificação dos Estados e das Variáveis Medidas
- 3) Teste de Observabilidade
- 4) Implementação do Método de Reconciliação de Dados
- 5) Aplicação do Método de Reconciliação de Dados para Ajuste do *fouling*

4 Caracterização do Sistema e Análise das Variáveis Medidas

4.1 Estudo de Caso

O trocador analisado integra uma rede de trocadores de calor inserida em uma etapa do processo produtivo de polietileno de baixa densidade, PEBD. Essa tecnologia de produção que se baseia na reação de polimerização é do tipo radical livre tendo como iniciadores oxigênio e peróxidos, e o monômero em sua fase gasosa, podendo ser processada em diferentes reatores: tubular e autoclave.

O processo é composto por diferentes etapas: primeiramente o gás passa por um processo de compressão e resfriamento, até que se encontre em condições ideais de pressão e temperatura; em seguida é enviado para o reator, no qual se processa a reação de polimerização. Essa reação é altamente exotérmica e, portanto, uma grande quantidade de calor deve ser removida de forma a favorecer a reação e evitar riscos de decomposição, ou seja, de descontrole da reação de polimerização (BUCELLI et al., 2004).

Após a expansão, a mistura de gás e polímero segue para a primeira etapa de separação em alta pressão. Ao entrar no separador, a mistura se divide em duas fases, uma líquida extremamente rica em polímero e outra gasosa (BUCELLI et al., 2004).

A fase rica em gás segue para um sistema de reciclo de alta pressão, etapa em que o gás passa por redes de trocadores de calor e vasos separadores, responsáveis pela redução de sua pressão e temperatura, permitindo, assim, a separação eficiente da cera presente. O gás é então reciclado e enviado, novamente, para etapa de compressão (BUCELLI et al., 2004).

A fase líquida, rica em polímero, proveniente do separador de alta pressão é enviada para um segundo vaso, denominado de separador de baixa pressão. Desta separação, a fase líquida é enviada para a peletização e a gasosa segue para uma segunda rede de trocadores de calor e vasos separadores, para remoção da cera residual, denominado reciclo de baixa pressão. Esta etapa de reciclo permitirá a recuperação do gás, o qual também é enviado para a etapa de compressão (BUCELLI et al., 2004).

4.2 Descrição do Sistema

Dentre as etapas do processo produtivo, o presente estudo irá analisar um trocador que compõe uma rede inserida na etapa do reciclo de alta pressão, esta é responsável

pela recuperação da maior parte da matéria prima. O sistema consiste em uma rede de trocadores de calor intercalados de vasos separadores, no qual ocorre a remoção da cera.

Cada rede é dimensionada para operar em determinadas condições de processo, de forma a minimizar o escoamento em duas fases nos trocadores de calor, reduzindo a incidência de incrustação e permitindo máxima separação do gás em fase condensante nos vasos.

Entretanto, trabalhar dentro das condições especificadas pelo projeto é, muitas vezes, uma tarefa difícil, visto que, dentro do processo fabril, inúmeros eventos podem levar a não conformidade operacional do mesmo, atingindo um novo patamar estacionário. Dentre estes eventos estão: aumento da produtividade sem aumento da capacidade dos equipamentos, falta de equipamentos originais, substituições de equipamentos, modificação nas especificações do produto, entre outros.

O trocador de calor, objeto de estudo, é do tipo duplo-tubo Hairpin. O fluido interno consiste em uma mistura de gás e cera, enquanto o externo, em água na forma líquida. A figura a seguir representa de forma esquemática a configuração do trocador, nesta configuração têm-se quatro seções de água, assim a vazão de fluido refrigerante é dividida igualmente entre as seções, sendo que cada uma apresenta a mesma área de troca térmica.

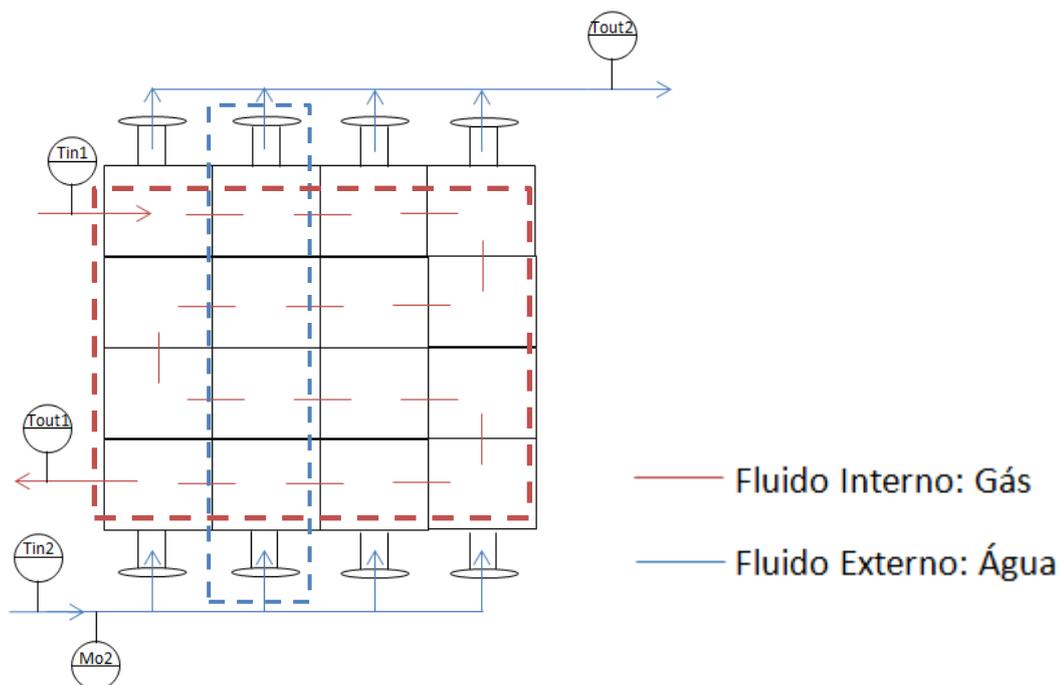


Figura 4.1: Configuração do trocador de calor estudado

4.3 Medidas Disponíveis

O modelo equacionado foi formulado de modo a trabalhar com todas as medidas e variáveis conhecidas disponíveis pela planta. Os parâmetros relativos ao trocador de calor foram obtidos através da folha de dados do equipamento, os quais foram de extrema importância para construção do modelo e para validação dos testes. As medidas disponíveis *on-line* foram coletadas através do programa Aspen Explorer integrado a base de dados infoPlus da AspenTech (2000).

Tabela 4.1: Parâmetros trocador de calor

| Parâmetros Trocador de Calor | Símbolo |
|---|----------------|
| Comprimento dos tubos | L |
| Número de passes do lado água e do gás | - , - |
| Diâmetros interno e externo do tubo interno | di, doe |
| Diâmetros interno e externo do tubo externo | Di, Do |
| coeficiente global de troca térmica para o trocador limpo | U |
| os fatores de resistência de incrustação interno e externo | Rfi, Rfo |
| Número de tubos | - |
| Área de troca térmica | A |
| Fator de correção de temperatura | F |

Tabela 4.2: Variáveis medidas

| Variáveis Medidas | Símbolo |
|---|----------------|
| Temperaturas de entrada fluido interno | Tin1 |
| Temperaturas de saída fluido interno | Tout1 |
| Temperaturas de entrada fluido externo | Tin2 |
| Temperaturas de saída fluido externo | Tout2 |
| Vazão de água total | Mo |
| Pressão a montante do trocador | Pin1 |

É importante ressaltar que essas medidas disponíveis irão definir a forma do equacionamento do modelo bem como irão interferir na precisão do método de reconciliação de dados. Assim, para trocadores que não apresentam os mesmos dados disponíveis, o método pode apresentar-se ineficaz para estimação de variáveis ou até mesmo não aplicável.

4.4 Análise da Qualidade das Medidas Disponíveis

Como se pode observar pela Figura 2.3, as medidas disponíveis são utilizadas como entradas na etapa de atualização dos estados pelo método do filtro de Kalman e, sabendo que este apresenta parâmetros ajustáveis que permitem a distribuição da imprecisão da estimação dos estados sobre o modelo ou as medidas, faz-se necessária a realização de uma análise estatística de dados de forma a verificar sua qualidade e, assim, possibilitar a definição da ordem de grandeza desses parâmetros ajustáveis.

Coletaram-se cinco diferentes dados períodos de operação da planta para realizar a análise estatística das variáveis medidas. A Tabela 4.3 mostra o desvio padrão de cada variável para os diferentes períodos de coleta.

Para os três primeiros conjuntos de dados, variações de processo devido às paradas/partidas da unidade foram eliminadas, assim como variações de condições devido às diferentes especificações dos produtos. Para estes observa-se um desvio padrão médio de 1.5 - 2.0 para as leituras de temperatura. A fim de melhor avaliar a real confiabilidade dos leitores de campo, reduziu-se o período de amostragem para cerca de três dias, colunas D e E, de modo a minimizar variações provenientes de outras unidades do processo. Assim, o valor médio do desvio padrão dessas variáveis reduziu-se para 0.5 - 1.0.

Tabela 4.3: Desvio padrão das variáveis medidas

| Variável/Coleta | Coleta A | Coleta B | Coleta C | Coleta D | Coleta E |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tin1 | 2,0 | 1,9 | 3,0 | 2,4 | 1,6 |
| Tout1 | 1,7 | 1,2 | 1,7 | 0,5 | 0,5 |
| Tin2 | 1,2 | 1,9 | 2,4 | 0,6 | 0,8 |
| Tout2 | 2,1 | 1,6 | 3,1 | 0,8 | 0,8 |
| Mo | 6,8 | 1,4 | 20,4 | 2,9 | 8,6 |
| Pin1 | 5,4 | 5,8 | 1,0 | 0,5 | 0,8 |

Em que, *Tin* e *Tout* correspondem, respectivamente, às temperaturas de entrada e saída do fluido; *Pin* é a pressão a montante do trocador; e *M*, a vazão mássica do fluido. Sendo que os subscritos “1” e “2” são utilizados para definir se o fluido é o interno ou externo, respectivamente.

Dos valores apresentados, observa-se que para a medida M_o , existe uma grande variabilidade dos valores lidos; isto deve-se à alteração da vazão de fluido refrigerante que alimenta o sistema de forma a atender as necessidades da planta e não somente a imprecisão da leitura.

5 Descrição do Modelo Matemático

Para o desenvolvimento do modelo, utilizaram-se dois volumes de controle, apresentados na Figura 4.1 um para o lado interno, quadrado tracejado em vermelho; outro, para o externo, representado pelo quadrado tracejado em azul.

Para simplificação, o equacionamento a seguir foi feito de forma que os subscritos “i” e “o” correspondem ao fluido interno e externo, respectivamente, e os subscritos “in” e “out” à entrada e saída do fluido em escoamento.

5.1 Balanço de Energia

A base para a construção do modelo do trocador proposto consiste nos balanços de energia, as equações que descrevem a temperatura dos fluidos interno e externo são dadas assim:

$$\frac{dE_o}{dt} = H_{o,in} - H_{o,out} + UA_o F dT_{ln} \quad (5.1)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = H_{i,in} - H_{i,out} - UA_i F dT_{ln} \quad (5.2)$$

Em que H representa a entalpia do fluido; A , a área de troca térmica; dT_{ln} , a média logarítmica de temperatura. O fator de correção F depende da distribuição das correntes de troca térmica no trocador de calor.

Sabendo que o fluido refrigerante consiste em água, sem mudança de fase, e utilizando-se considerações de gás ideal para o fluido interno, as seguintes simplificações foram utilizadas para dar continuidade ao equacionamento.

$$H = \dot{m} C_p T \quad (5.3)$$

$$E = M C_v T \quad (5.4)$$

$$C_p = C_v \quad (5.5)$$

C_p é a capacidade calorífica específica a pressão constante; C_v , a capacidade calorífica específica a volume constante; \dot{m} , M e T são respectivamente a vazão mássica, a massa e a temperatura do fluido.

Uma vez conhecida a geometria do trocador, deduziram-se duas equações que determinam a temperatura de saída de cada fluido com relação ao tempo.

$$M = V_T \rho \quad (5.6)$$

$$\frac{dT_{out2}}{dt} = \frac{[m_o C_{p_o} (T_{in2} - T_{out2}) + UA_o F dT_{ln}]}{V_o C_{p_o} \rho_o} \quad (5.7)$$

$$\frac{dT_{out1}}{dt} = \frac{[m_i C p_i (T_{in1} - T_{out1}) - U A_i F d T_{ln}]}{V_i C p_i \rho_i} \quad (5.8)$$

Em que ρ corresponde à massa específica do fluido; T_{in} e T_{out} , às temperaturas de entrada e saída de cada fluido, sendo o subscrito “1” utilizado para o fluido interno e o “2” para o externo.

Dado o princípio da conservação de energia e desconsiderando as perdas para o ambiente, igualaram-se as equações de energia para cada fluido em escoamento de forma a determinar a vazão do fluido interno, variável desconhecida do sistema.

$$4m_o C p_o (T_{out2} - T_{in2}) = m_i C p_i (T_{in1} - T_{out1}) \quad (5.9)$$

O termo à esquerda da igualdade descreve o calor associado ao fluido refrigerante que escoo na região anular; e o da direita, ao fluido interno.

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

$$dT_{ln} = \frac{(T_{in1} - T_{out2}) - (T_{out1} - T_{in2})}{\ln\left(\frac{(T_{in1} - T_{out2})}{(T_{out1} - T_{in2})}\right)} \quad (5.10)$$

Utilizou-se, no entanto, a correlação modificada por Chen (1987 apud Zavala et al. 2005 p. 202 V. 4) para o cálculo da temperatura média logarítmica. Optou-se pela utilização desta correlação a fim de evitar problemas matemáticos e de convergência, obteve-se assim:

$$dT_{ln} = \left(\frac{(T_{in,1} - T_{out,2}) + (T_{out,1} - T_{in,2})}{2}\right)^{\frac{1}{3}} * \left((T_{in,1} - T_{out,2})(T_{out,1} - T_{in,2})\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.11)$$

5.2 Abordagem Adotada para Representar a Incrustação

Para o cálculo do coeficiente global de troca térmica, fez-se o uso da seguinte expressão:

$$\frac{1}{UA} = \left(\left(\frac{1}{h_i} + R_{fi} \right) \frac{1}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi k L} + \left(\frac{1}{h_o} + R_{fo} \right) \frac{1}{A_o} \right) \quad (5.12)$$

Em que h corresponde ao coeficiente de transferência de calor convectiva; A , a área de troca térmica; d_i , o diâmetro interno do tubo interno; d_o , o diâmetro externo do tubo interno; k , a condutividade térmica da parede; e L , o comprimento do trocador.

Rearranjando a equação acima e agrupando os parâmetros associados à incrustação à resistência da parede, o qual é dado pelo fator R_{wall} , obtêm-se as seguintes expressões:

$$h_o A_o h_i A_i = UA [h_o A_o + h_i A_i + h_o h_i (R_{fi} A_o + R_{fo} A_i + R_{wall} A_i A_o)] \quad (5.13)$$

$$h_o A_o h_i A_i = UA [h_o A_o + h_i A_i + h_o h_i (R_f^+)] \quad (5.14)$$

5.3 Correlações

As expressões utilizadas para determinar os coeficientes de troca convectiva são função do número adimensional Nusselt, definido por:

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (5.15)$$

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad (5.16)$$

Sendo o diâmetro hidráulico calculado pela seguinte expressão:

$$D_h = \frac{(D_i^2 - d_{oe}^2)}{(D_i - d_{oe})} \quad (5.17)$$

Em que, D_i representa o diâmetro interno do tubo externo.

Os números adimensionais de Reynolds e Prandtl são dados pelas seguintes equações:

$$Re_i = \frac{\dot{m}_i d_i}{A_{int} \mu_i} \quad (5.18)$$

$$Re_o = \frac{\dot{m}_o D_h}{A_{out} \mu_o} \quad (5.19)$$

$$Pr_i = \frac{C_{pi} \mu_i}{k_i} \quad (5.20)$$

$$Pr_o = \frac{C_{po} \mu_o}{k_o} \quad (5.21)$$

As áreas de escoamento e de troca de calor são descritas por:

$$A_{int} = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (5.22)$$

$$A_{out} = \frac{\pi(D_i^2 - d_o^2)}{4} \quad (5.23)$$

$$A_i = \pi d_i L \quad (5.24)$$

$$A_o = \pi d_{oe} l \quad (5.25)$$

O fator μ representa a viscosidade dos fluidos em escoamento; l , o comprimento correspondente à seção de um passe de água, \dot{m}_i , a vazão de gás; e \dot{m}_o , a quantidade de água para uma seção do trocador.

A correlação utilizada para a determinação do coeficiente convectivo interno está representada a seguir: (VDI Heat Atlas, 2010 Seção B1 - Fundamentals of Heat Transfer p. 26)

$$Nu_i = 0.024 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.3} \quad (5.26)$$

A equação (5.26) válida para as faixas de Reynolds e Prandtl dadas por: $10^4 < Re < 10^5$ e $0.5 < Pr < 100$.

Para determinação do coeficiente convectivo externo utilizou-se a equação de Petukhov's modificada por Gnielinski (1958 apud VDI Heat Atlas, 2010 Seção G1 - Heat Transfer in Pipe Flow p. 696), a qual compreende uma faixa mais ampla de Reynolds e Prandtl, dadas por: $10^4 < Re < 10^6$ e $0.6 < Pr < 1000$.

$$Nu_o = \frac{Re_o Pr_o E_o}{1 + 12.7 \sqrt{E_o} \left(Pr_o^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left[1 + \left(\frac{d_h}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (5.27)$$

$$E_o = 0.125(0.78 \ln(Re_o) - 1.5)^{-2} \quad (5.28)$$

As propriedades do fluido interno foram calculadas através de expressões, dependentes da temperatura e/ou pressão, encontradas no Chemical Properties Handbook (YAWS, 1999) e estão descritas no Apêndice I.

As propriedades do fluido refrigerante foram determinadas com base em equações de estado através da energia livre de Helmholtz por meio do pacote CoolProp (Bell et al., 2014), o qual consiste em uma biblioteca do Python, interface utilizada para implementação do programa. Mais detalhes deste pacote encontram-se no Apêndice I.

Neste anexo, também, é apresentado o comportamento de algumas propriedades do fluido refrigerante para uma faixa de temperatura e pressão. Essa análise foi realizada com o objetivo de verificar a possibilidade de se trabalhar com a temperatura média do fluido para quantificação das suas propriedades físico-químicas. Dos resultados obtidos, observa-se que o fluido apresenta pequenas variações de suas propriedades com a temperatura, uma vez considerada pressão constante.

6 Implementação do Filtro de Kalman

6.1 Escolha do Método de Reconciliação de Dados

Dentre os métodos disponíveis, para o presente trabalho se utilizou o método do filtro de Kalman estendido discreto via equação da matriz de Riccati para realizar a etapa de monitoramento da incrustação. Esse método foi escolhido em detrimento dos outros, visto que se apresenta como uma boa alternativa para o monitoramento on-line, dado seu baixo custo computacional, além de não necessitar de grandes tratamentos de dados como no caso das redes neurais.

6.2 Identificação dos Estados e das Variáveis Medidas

Uma vez identificadas as variáveis medidas e equacionado o modelo, realiza-se a implementação do método do filtro de Kalman segundo seu equacionamento. A figura a seguir apresenta de forma esquemática as variáveis e estados envolvidos no equacionamento do método segundo o estudo de caso.

Tabela 6.1: Identificação dos Estados e Variáveis Medidas para o Estudo de Caso

| Parâmetro Método | Variável Estudo de Caso |
|----------------------|--|
| Estados | Rf – Fator de incrustação |
| | Tout1 – Temperatura saída fluido interno Tout2 – Temperatura saída fluido externo |
| Variáveis Medidas | Tin1 – Temperatura entrada fluido interno Tout1 - Temperatura saída fluido interno |
| | Tin2 – Temperatura entrada fluido externo Tout2 - Temperatura saída fluido externo |
| | Pin1 – Pressão a montante do trocador |
| | Mo – vazão total de água |
| | |
| Variáveis Auxiliares | dTm1 – Temperatura média do fluido interno dTm2 – Temperatura média do fluido externo |

6.3 Teste de Observabilidade

Como mencionado anteriormente, realizou-se o teste de observabilidade 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(2.23), igual ao número de estados, para todos os autovalores do modelo linearizado.

6.4 Implementação do Método de Reconciliação de Dados

A implementação da técnica do filtro de Kalman estendido foi realizada por meio da utilização da linguagem Python; o código implementado encontra-se no Apêndice VII .

Python consiste em uma linguagem de código aberto, que apresenta boa portabilidade, uma vez que pode ser utilizada em diferentes plataformas. Tem sido utilizada em diversos problemas de engenharia e em estudos científicos dada a robustez e a diversidade das bibliotecas que a ela podem ser adicionadas (LIMA, 2006).

Dentre elas, destacam-se: *NumPy* (Van Der Walt et al.,2011) que permite a representação dos dados em matrizes possibilitando a implementação eficiente de cálculos; *Matplotlib* (HUNTER, 2007) para criação de gráficos 2D; *Pandas* (MCKINNEY, 2010) para análise e manipulação estatística de dados; *SciPy* (Jones et. al 2001) que contém técnicas de integração, funções polinomiais de interpolação, entre outros recursos.

6.5 Aplicação do Método de Reconciliação de Dados para Ajuste do fouling

Como já mencionado, a técnica de filtro de Kalman permite o ajuste de parâmetros, que distribuem a imprecisão das estimativas dos estados sobre o modelo e as variáveis medidas. As matrizes Q e R correspondem, respectivamente, às incertezas na representatividade do modelo e na imprecisão das medidas. Além destes dois parâmetros, a matriz P_0 , que corresponde às incertezas do chute inicial dos estados deve ser inicializada, em seguida ela passa a ser calculada pela própria técnica, não consistindo em um ajuste propriamente dito.

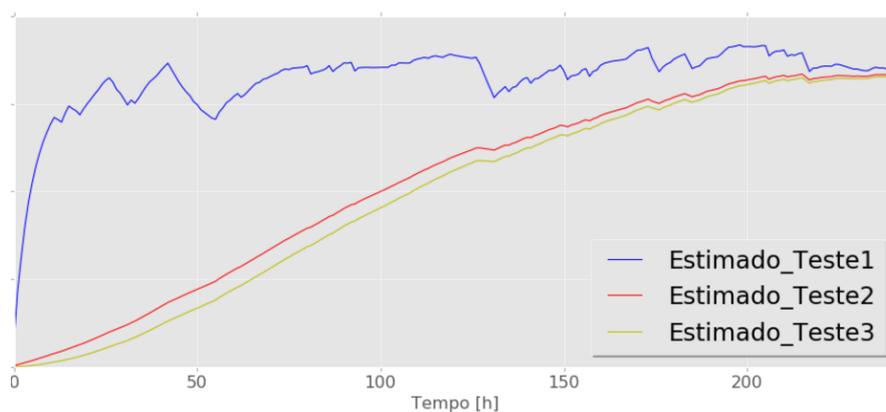
Assim, caso a imprecisão esteja sobre o modelo, minimiza-se a matriz R de forma a obter estados estimados mais próximos das variáveis medidas, e por consequente, maximiza-se a matriz Q . No caso de medidas muito ruidosas, o ajuste será feito de forma a depositar maior confiança ao modelo, por meio da definição de valores elevados para a matriz R e da utilização de valores baixos para a matriz Q , o que diminui o peso das medidas sobre a etapa de correção.

Comparou-se a influência dos parâmetros P0 e Q sobre os resultados da simulação, os testes realizados estão esquematizados na Tabela 6.2 e os resultados apresentados na Figura 6.1. O valor do parâmetro R foi determinado de acordo com os resultados obtidos pela análise estatística das medidas, como sendo na ordem da unidade. Dos testes realizados, pela Figura 6.1 observa-se que o teste de número seis reúne os valores que melhor ajustaram os dados simulados aos dados reais da planta, sendo, então, escolhidos para dar continuidade aos testes.

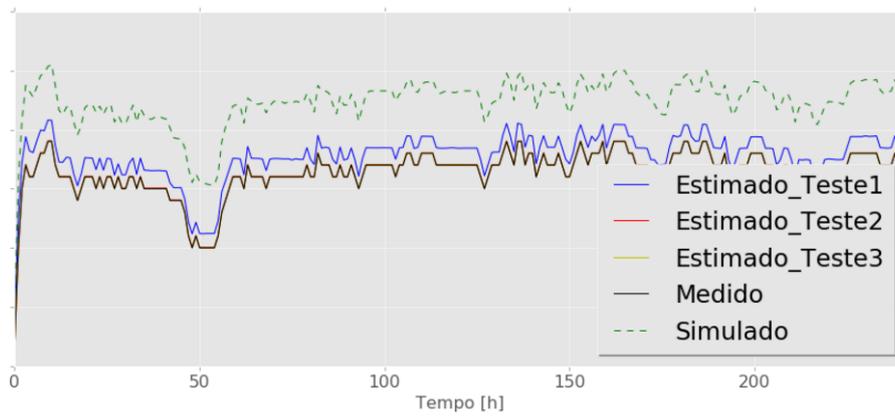
Tabela 6.2: Classificação dos testes de ajuste de parâmetros

| Teste n°/ Parâmetro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| P0 | $10^3[I]$ | $10^3[I]$ | $10^3[I]$ | $10^{-3}[I]$ | $10^2[I]$ | $10^5[I]$ |
| R | $10^0[I]$ | $10^0[I]$ | $10^0[I]$ | $10^0[I]$ | $10^0[I]$ | $10^0[I]$ |
| Q | $10^0[I]$ | $10^2[I]$ | $10^4[I]$ | $10^2[I]$ | $10^2[I]$ | $10^2[I]$ |

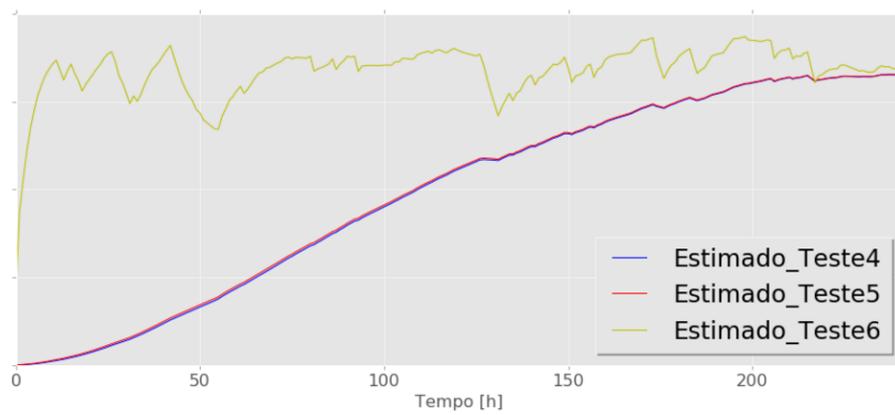
Em que [I] corresponde a matriz identidade 3x3.



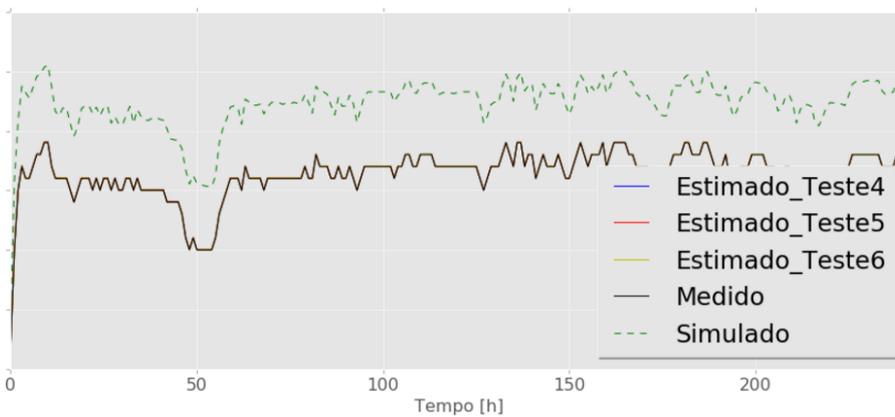
A) Incrustação ($\text{sm}^4\text{C/kcal}$) – Ajuste Parâmetro Q



B) Temperatura Água (°C) – Ajuste Parâmetro Q



C) Incrustação ($\text{sm}^4\text{C/kcal}$) – Ajuste Parâmetro P0



D) Temperatura Água (°C) – Ajuste Parâmetro P0

Figura 6.1: Teste Ajuste de Parâmetros

7 Resultados e Discussões

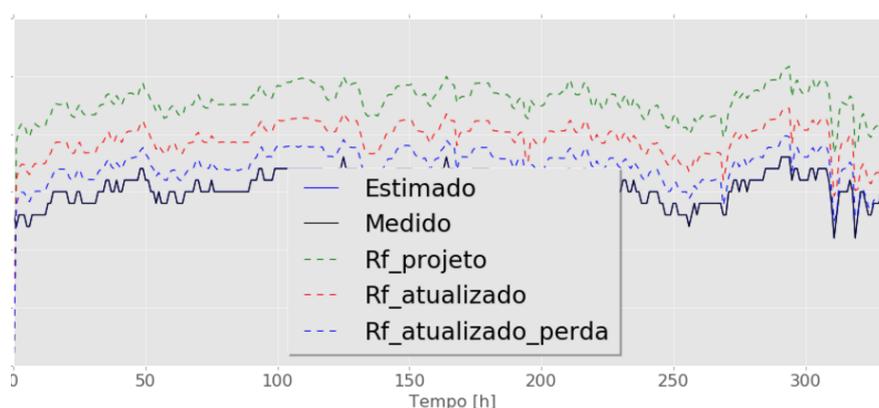
A realização dos testes apresentados nas próximas seções se deu com base em conjuntos de dados coletados em diferentes períodos de operação, nomeados pela letra “D” seguida de um número de 1 a 5. Esses dados compreendem as medidas de temperaturas de entrada e saída dos fluidos interno e externo, de pressão a montante do trocador e da vazão mássica de fluido refrigerante.

7.1 Estimação da Incrustação

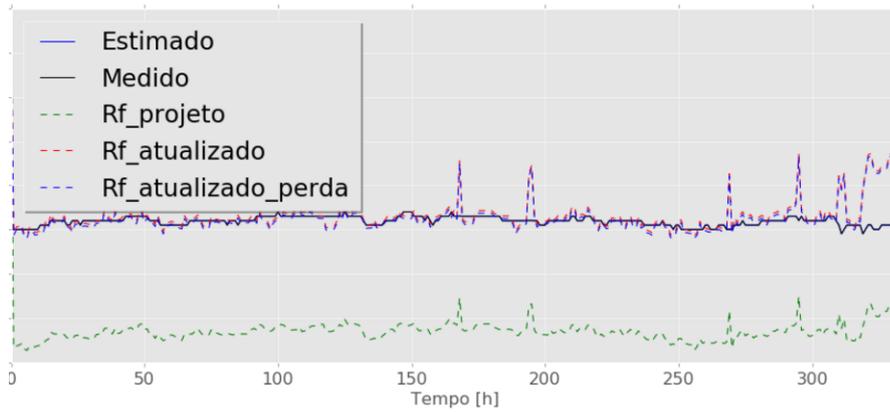
Dos resultados obtidos pela aplicação da técnica, podemos concluir através da Figura 7.1-A e B, que o modelo matemático construído, representado pela curva tracejada verde, mesmo apresentando um deslocamento das variáveis simuladas com relação às reais, curva contínua preta, consegue prever o comportamento das temperaturas de saída dos fluidos. Esse deslocamento entre os dados medidos e simulados se deve em parte ao desconhecimento do fator de incrustação e, em parte, à imprecisão decorrente das simplificações e hipóteses realizadas durante a construção do modelo, além de erros oriundos dos próprios medidores de temperatura que não foram calibrados.

Assim, após a estimação da incrustação pelo método do filtro de Kalman estendido, utilizou-se esse valor como uma constante no modelo de forma a verificar se o deslocamento observado nos testes precedentes seria reduzido, os resultados apresentam-se na Figura 7.1-A e B, curva tracejada vermelha.

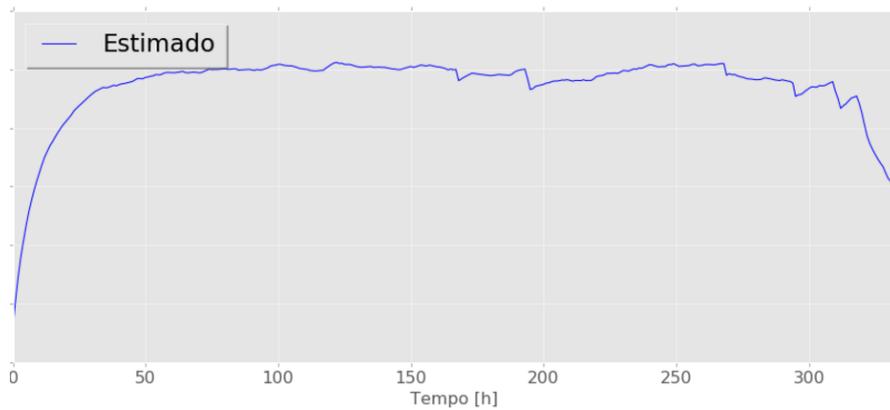
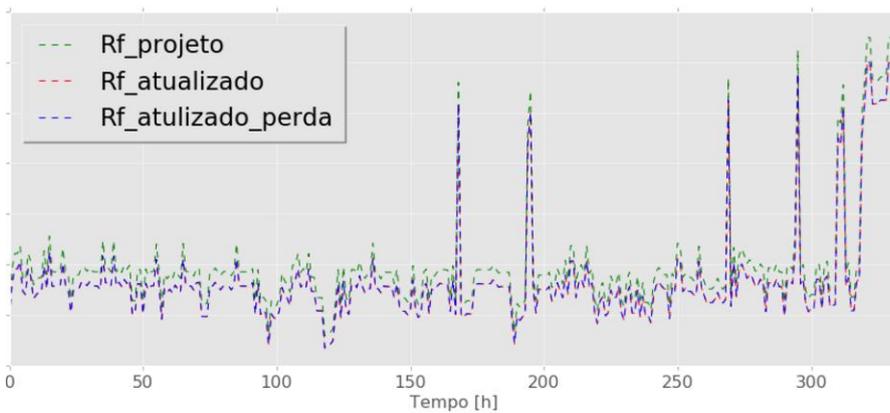
Além da atualização do valor da incrustação, adicionou-se um fator na equação (5.7), que calcula a temperatura de saída da água, de forma a considerar a perda de calor para o ambiente, esse fator corresponde a 10% do valor do calor trocado pela água. Este teste está representado na Figura 7.1-A e B, pela curva tracejada em azul.



A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D2



B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D2

C) Incrustação (sm⁴°C/kcal) – D2

D) Vazão de Gás (kg/s) – D2

Figura 7.1: Estimação *Fouling* – D2

Como se pode observar, os resultados obtidos com a atualização do valor do *fouling* e a inserção do termo de perda para o ambiente apresentam maior acuracidade, assim, os demais testes, presentes no Apêndice IV, foram realizados levando-se em consideração esta perda. Sendo a curva tracejada em verde o resultado obtido pelo modelo com o valor de incrustação igual a de projeto e a curva tracejada em vermelho com a atualização deste valor.

A análise dos resultados evidencia que a estimação do fator de incrustação foi bem sucedida, visto que o deslocamento das temperaturas entre os dados reais e simulados diminuiu.

7.2 Determinação da Vazão de Gás

Através do equacionamento do modelo matemático, mais precisamente pela equação (5.9), pôde-se determinar a vazão de gás que alimenta o trocador. A Figura 7.1-D apresenta um dos resultados obtidos, os demais se encontram no Apêndice IV. A análise destas figuras evidencia que a vazão de gás não se apresenta constante durante a coleta, mas sim na forma de patamares.

Observa-se também, dada a forma das curvas, a existência de um ruído associado ao cálculo, que se deve à imprecisão e às variações das medidas de temperatura e vazão.

7.3 Modelo Incrustação

A análise dos testes apresentado no Apêndice IV evidencia que a incrustação apresenta um comportamento similar ao dente-serra, como exemplificado na Figura 1.1, observa-se também que seu comportamento é influenciado pela vazão de gás, em que um aumento na vazão leva a redução da incrustação, e a operação em um mesmo patamar de vazão ao acúmulo de material depositado. A figura abaixo evidencia a relação inversa entre o fator de incrustação e a vazão mássica de gás.

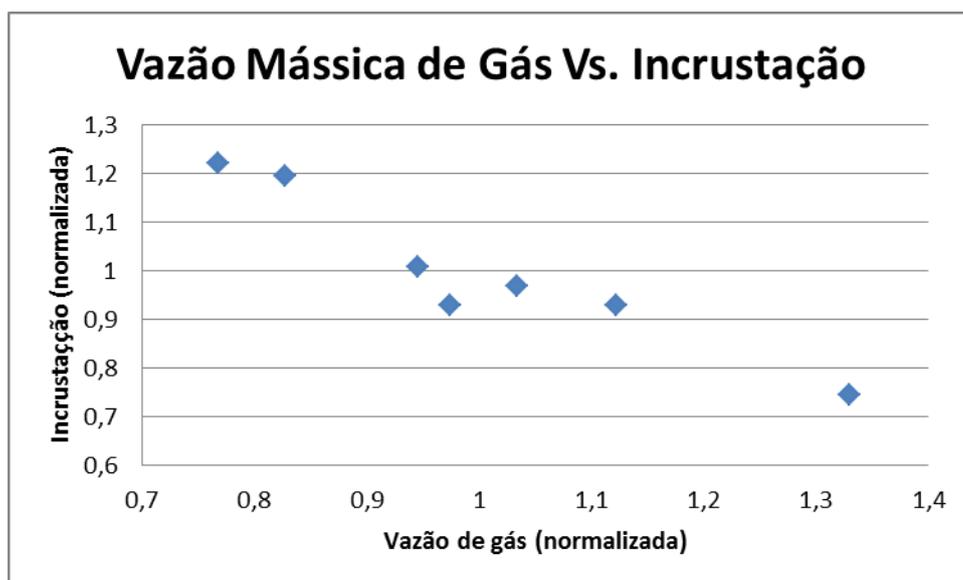


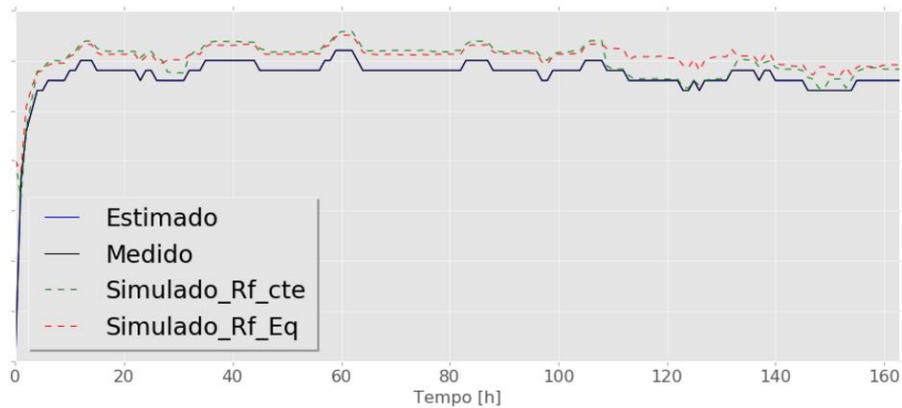
Figura 7.2: Relação vazão mássica de gás e incrustação

Com base neste comportamento, formulou-se a seguinte equação para caracterização da incrustação:

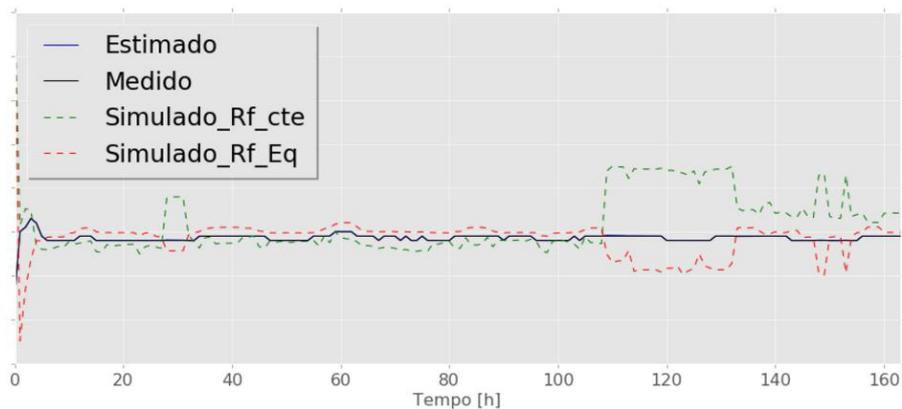
$$Rf = Am_i^b - Cm_i^d \quad (7.1)$$

A equação proposta acima se divide em dois termos, um relativo à deposição e outro a remoção de material, sendo que ambos dependem da velocidade de escoamento do fluido por meio da taxa mássica. Esta equação assemelha-se a proposta por Nasr e Givi (2006), sendo que neste estudo de caso não ocorre reação química que provoque o depósito de material.

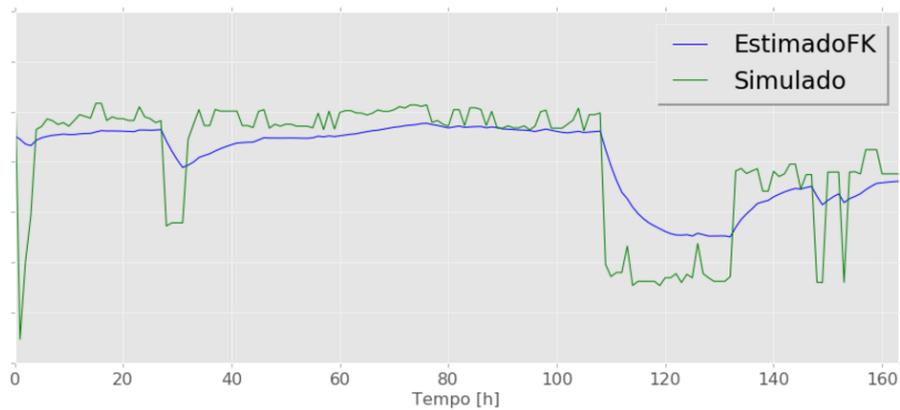
A Figura 7.3 compara os resultados obtidos considerando-se o fator de incrustação constante, curva tracejada verde, e uma vez aplicada a equação segundo a formulação proposta, curva tracejada vermelha. Na mesma figura pode-se comparar também o comportamento do *fouling* segundo a equação (7.1), linha verde, e a estimativa dada pela técnica de reconciliação, linha azul.



A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D5



B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D5



C) Incrustação ($\text{sm}^4\text{C/kcal}$) – D5

Figura 7.3: Modelo de Incrustação – D5

Observa-se que a equação consegue prever o comportamento da incrustação proposto pela técnica de estimação, apresentando, no entanto, ruído, principalmente nos casos em que ocorre bruscas variações de gás. Realizou-se o mesmo teste para os demais conjuntos apresentados, os mesmos encontram-se no Apêndice V .

8 Conclusões e Trabalhos Futuros

Dos resultados obtidos e discutidos na seção anterior, conclui-se que:

8.1 Quanto ao Modelo

O mesmo consegue prever o comportamento das temperaturas de saída de ambos os fluidos, interno e externo, ficando evidente que o fator de incrustação consiste em um parâmetro-chave para obtenção de resultados mais representativos.

Mesmo após a correção do fator de incrustação existe um deslocamento dos valores para a temperatura do fluido refrigerante. A análise dos resultados mostra que esse deslocamento é constante em toda a amostra de dados, indicando um possível erro na calibração dos medidores de temperatura, o qual pode ser corrigido através da adição de um fator de correção na equação que determina a temperatura de saída do fluido. Outra fonte possível de erro, consiste na própria modelagem adotada para o trocador, a qual considerou uma perda de 10% da troca térmica da água para o ambiente, esta porcentagem pode ser verificada e/ou corrigida por meio de cálculos mais precisos que considerem uma equação para a troca de calor convectiva com o ambiente.

8.2 Quanto ao Método de Reconciliação

O método de reconciliação dinâmica utilizado se mostrou viável e eficaz no presente estudo de caso, apresentando-se como uma ferramenta de fácil implementação e manipulação.

A análise estatística dos dados é de grande valia para realização do ajuste do parâmetro R, visto que assim, o parâmetro Q torna-se o principal parâmetro de ajuste o que reduz testes de verificação e determinação dos mesmos.

8.3 Quanto ao Modelo de Incrustação

Como se pôde observar, a equação proposta captura o comportamento da incrustação, mas, pode ser aprimorada por meio da realização de mais testes, de forma a obter um maior conjunto de dados que possibilite o refino das constantes empíricas. Pode-se ainda escolher uma das constantes empíricas como um parâmetro a ser estimado pela técnica de reconciliação de forma a suavizar seu comportamento.

8.4 Quanto aos Objetivos

Dos objetivos definidos para a presente monografia, conclui-se que a associação de técnicas de reconciliação dinâmica de dados e modelos matemáticos se mostra eficaz na

estimação de parâmetros desconhecidos e apresenta-se como uma ferramenta viável para o monitoramento de equipamentos.

Sendo a motivação principal deste estudo o desenvolvimento de uma ferramenta para o monitoramento da incrustação, observa-se que a mesma foi parcialmente atingida, visto que a equação proposta para o fenômeno de deposição apresenta algumas discrepâncias quanto ao comportamento da incrustação predito pela técnica.

Uma vez que o modelo construído conseguiu prever de forma satisfatória a temperatura de saída do fluido interno e sabido o deslocamento fixo relativo da temperatura de saída para o fluido externo, conclui-se que a possibilidade de realização de estratégias operacionais é viável, uma vez conhecido o fator de incrustação.

Além das sugestões propostas de melhoria para o estudo, como trabalhos futuros pode-se enumerar os seguintes passos:

- Replicação do modelo para trocadores similares;
- Estender o modelo para que simule mais de um trocador de calor, possibilitando, assim, a formulação de redes de trocadores em série e paralelo;
- Implementação da versão CEKF do estimador de estados para permitir a inclusão de restrições no processo de determinação da incrustação.

9 Referências

ASPEN TECHNOLOGY, I. Aspen Plus[®] User Guide. **Aspen Technology, Inc.**, p. 936, 2000.

BARALDI, A. **Monitoramento do Desempenho Térmico de Trocadores de Calor Duplo Tubo de uma planta Slurry**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

BELL, I. H. et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 2014.

BOMBARDELLI, C. et al. Revisão De Modelos Matemáticos Para a Incrustação Por Coque No Processamento Do Petróleo a —. n. 3, 2005.

BUCELLI, A. et al. Nonequilibrium Behavior in Ethylene/Polyethylene Flash Separators. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 7, p. 1768–1778, 2004.

CHANGANI, S. D.; BELMAR-BEINY, M. T.; FRYER, P. J. Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 14, n. 4, p. 392–406, 1997.

CARL L. Yaws, Ph.D.: Chemical Properties Handbook. HEAT CAPACITY OF GÁS, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineering. <https://accessengineeringlibrary.com/browse/chemical-properties-handbook/c9780070734012ch03#c9780070734012ch03lev1sec03>

CARL L. Yaws, Ph.D.: Chemical Properties Handbook. THERMAL CONDUCTIVITY, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineering. <https://accessengineeringlibrary.com/browse/chemical-properties-handbook/c9780070734012ch22>

CARL L. Yaws, Ph.D.: Chemical Properties Handbook. VISCOSITY OF GÁS, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineering. <https://accessengineeringlibrary.com/browse/chemical-properties-handbook/c9780070734012ch21>

DHAOUADI, R.; MOHAN, N.; NORUM, L. Design and implementation of an extended Kalman filter for the state estimation of a permanent magnet synchronous motor. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 6, n. 3, p. 491–497, 1991.

EBERT, W.; PANCHAL, C. . Analisis of Exxon Crude-Oil-Slip Stream Coking, in: Proceeding of Mitigation of Industrial Heat Exchangers. 1995.

EPSTEIN, N. Thinking About Heat Transfer Fouling—A 5×5 Matrix. In: **Heat Transfer Engineering**. [s.l.: s.n.]. p. 43–56, Vol. 1.

FARIAS, A. C. Avaliação de Estratégias para Reconciliação de Dados e Detecção de Erros Grosseiros. **Dados**, p. 180, 2009.

FERNANDEZ-BAUJIN J.M., SOLOMON, S. M. Industrial and laboratory pyrolysis. **AIChE Symposium**, v. Ser. 32, p. 345–372, 1976.

GARRETT-PRICE, B. Fouling of heat exchangers: Characteristics, costs, prevention, control and removal. **Noyes Publications**, v. 20, n. July, p. 417, 1985.

GUDMUNDUR, J. R. et al. Use of extended Kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 13–14, p. 2643–2655, 2007.

HASSON, D.; ZAHAVI, J. Mechanism of Calcium Sulfate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces. v. 9, n. 1, p. 1–10, 1970.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in Science and Engineering**, v. 9, n. 3, p. 99–104, 2007.

JAFARI NASR, M. R.; MAJIDI GIVI, M. Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 14–15, p. 1572–1577, 2006.

JANG, S.; JOSEPH, B.; MUKAI, H. Comparison of Two Approaches to on-line Parameter and State Estimation of Nonlinear Systems. **Industrial Engineering and Chemical Process Design Development**, v. 25, p. 809–814, 1986.

JONES, E. et al. **SciPy: Open Source Scientific Tools for Python**. Disponível em: <<https://www.scipy.org/citing.html>>.

JULIER, S.; UHLMANN, J.; DURRANT-WHYTE, H. F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 45, p. 477–482, 2000.

KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. **Journal of Basic Engineering**, v. 82, n. 1, p. 35, 1960.

LANEZ, H.; KHADER, D. **Optimisation du bilan thermique d'un circuit de refroidissement du solvant lourd en présence du phénomène d'encrassement**. [s.l.] Université echahid hamma lakhdar el oued, 2015.

LILEY, P. E.; BUCK, E.; CH, M. S. E. Physical and Chemical Data *. **Perry's Chemical Engineers Handbook**, p. 2–86, 1999.

LIMA, I. Python for Scientific Computing Python Overview. **Marine Chemistry**, p. 10–20, 2006.

MCCABE, W. L.; ROBINSON, C. S. Evaporator Scale Formation. v. 16, n. Evaporator Scale Formation', p. 1–2, 1924.

MCKINNEY, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. **Proceedings of the 9th Python in Science Conference**, v. 1697900, n. Scipy, p. 51–56, 2010.

MÜLLER-STEINHAGEN, H. Heat Transfer Fouling: 50 Years After the Kern and Seaton Model. **Heat Transfer Engineering**, v. 32, n. 1, p. 1–13, 2011.

MUSKE, K. R.; RAWLINGS, J. B. Nonlinear Moving Horizon State Estimation. **Methods of Model-Based Control: Kluwer Academic Publishers**, v. 293, p. 349–365, 1995.

OLIVEIRA JUNIOR, A. M. **ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS EM MODELOS DE PROCESSO USANDO DADOS INDUSTRIAIS E TÉCNICA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS. Antonio**. [s.l: s.n.].

PATERSON, W. R.; FRYER, P. J. A reaction engineering approach to the analysis of fouling. **Chemical Engineering Science**, v. 43, n. 7, p. 1714–1717, 1988.

PETERMEIER, H. et al. Hybrid model of the fouling process in tubular heat exchangers for the dairy industry. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 1, p. 9–17, 2002.

PRATA, D. M. **RECONCILIAÇÃO ROBUSTA DE DADOS PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL**. [s.l: s.n.].

RIVEROL, C.; NAPOLITANO, V. Estimation of fouling in a plate heat exchanger through the application on neural networks. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 80, n. 5, p. 594–600, 2005.

RMIEWS, P. The History and Status of Research In Fouling of Heat Exchangers in Cooling Water Service. v. 5, p. 374–380, 1977.

ROBERTSON, D.; LEE, J.; RAWLINGS, J. A moving horizon-based approach for least-squares estimation. **AIChE Journal**, v. 42, n. 8, p. 2209–2224, 1996.

SADOUK, H. C. **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**. [s.l.] Université Paris-Est, 2009.

SALAU, N. P. G. **Abordagem Sistemática para Construção e Sintonia de Estimadores de Estados Não-Lineares**. [s.l: s.n.].

SALEH, Z. S.; SHEIKOLESLAMI, R.; WATKINSON, A. P. Fouling Characteristics of a Light

Australian Crude Oil. 2003.

SCHREIER, P. J. R.; FRYER, P. J. Heat exchanger fouling: A model study of the scaleup of laboratory data. **Chemical Engineering Science**, v. 50, n. 8, p. 1311–1321, 1995.

SCHWEINBERGER, C. M. **Aplicação do CEKF na Estimação de Parâmetros em Modelo Dinâmico**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

SMITH, G. L.; SCHMIDT, S. F. M.; MCGEE, L. A. APPLICATION OF STATISTICAL FILTER THEORY TO THE OPTMAL ESTIMATION OF POSITION AND VELOCITY IN BARD A CIRCUMLUNAR VEHICLE. **National Aeronautics and Space Administration**, 1962.

SPIVEY, B. J.; HEDENGREN, J. D.; EDGAR, T. F. Constrained Nonlinear Estimation for Industrial Process Fouling. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 17, p. 7824–7831, 2010.

STEINHAGEN, R.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; MAANI, K. Problems and Costs due to Heat Exchanger Fouling in New Zealand Industries. **Heat Transfer Engineering**, v. 14, n. 1, p. 19–30, 1993.

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

VAN DER WALT, S.; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. The NumPy array: A structure for efficient numerical computation. **Computing in Science and Engineering**, v. 13, n. 2, p. 22–30, 2011.

WALLHÄUSSE, E.; HUSSEIN, M. A.; BECKER, T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry. **Food Control**, v. 27, n. 1, p. 1–10, 2012.

WANG, Y.; PAPAGEORGIOU, M. Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: A general approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 39, n. 2, p. 141–167, 2005.

WOODS, D. R.; ANDERSON, S. J.; NORMAN, S. L. Evaluation of Capital Cos Data: Heat Exchangers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 54, n. bvaluation of Lapital Lost Uata: Heat Exchangers, p. 20, 1976.

YEAP, B. L. et al. Mitigation of Crude Oil Refinery Heat Exchanger Fouling Through Retrofits Based on Thermo-Hydraulic Fouling Models. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 82, n. 1, p. 53–71, 2004.

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

10 Apêndice I – Propriedades Físico-Químicas dos Fluidos

10.1 Fluido Interno

As propriedades do fluido interno foram determinadas por meio da utilização das equações abaixo:

$$\mu_i = -3.985 + 0.38726dTm_1 - (0.00011227dTm_1^2) * 0.0001 \quad (10.1)^1$$

$$Cp_i = \frac{1000(32.083 - 0.014831dTm_1 + 0.00024774dTm_1^2)}{28.05} + \frac{1000(-0.00000023766dTm_1^3 + 0.000000000068274dTm_1^4)}{28.05} \quad (10.2)^2$$

$$k_i = 0.01116 + 0.000036219dTm_1 + 0.00000012459dTm_1^2 \quad (10.3)^3$$

$$\bar{M}PV = ZmRT \quad (10.4)$$

$$\rho = \frac{\bar{M}P_{in1}}{ZRdTm_1} \quad (10.5)$$

Em que dTm_1 é a temperatura média do fluido, sendo μ_i sua viscosidade, Cp_i sua capacidade calorífica específica e k_i sua condutividade térmica. E ainda, \bar{M} corresponde à massa molar do fluido, R a constante dos gases ideais, P_{in1} a pressão de entrada no trocador e Z o fator de compressibilidade.

Sendo o fator de compressibilidade dependente do tipo de fluido, da pressão e da temperatura em que se encontra, traçou-se uma curva para determinação do fator Z em função da temperatura média do fluido, considerando-se a pressão constante. A formulação desta expressão baseia-se no conjunto de dados encontrados no Perry's Chemical Engineers Handbook (1999).

A expressão encontrada para o fator de compressibilidade do fluido apresenta-se na forma que segue, em que A , B e C são constantes ajustáveis.

$$Z = A(dT_{m1}^2) - BdT_{m1} + C \quad (10.6)$$

¹ Carl L. Yaws, Ph.D.: Chemical Properties Handbook. VISCOSITY OF GÁS, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineering.

² Carl L. Yaws, Ph.D.: Chemical Properties Handbook. HEAT CAPACITY OF GÁS, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineering.

³ Carl L. Yaws, Ph.D.: Chemical Properties Handbook. THERMAL CONDUCTIVITY, Chapter (McGraw-Hill Professional, 1999), AccessEngineering.

10.2 Fluido Externo

Como já mencionado anteriormente, a determinação das propriedades do fluido refrigerante foi realizada por meio da utilização do pacote denominado CoolProp disponível no Python, o qual consiste em uma biblioteca de código aberta escrita em C++, que permite o cálculo de propriedades termodinâmicas de mais de 100 fluidos (BELL et al., 2014). Para utilização deste pacote são necessárias como entrada: a temperatura, a pressão e o nome fluido do qual se deseja conhecer a propriedade.

Como se pode observar pela figura abaixo, as propriedades da água não variam de forma significativa com a temperatura para uma determinada pressão, utilizou-se, assim, a temperatura média do fluido e sua pressão de operação como entradas para determinação das propriedades do mesmo.

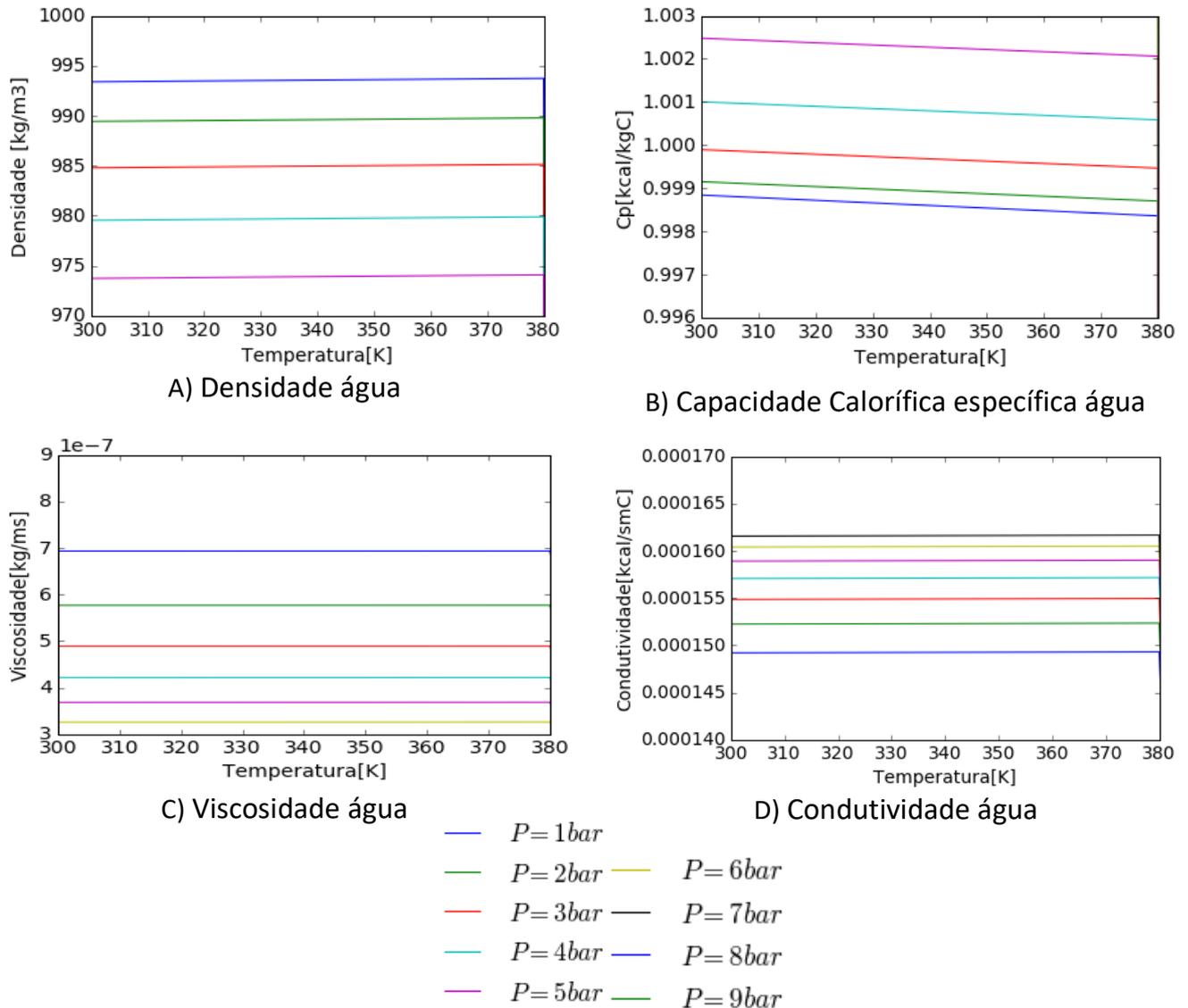


Figura 10.1: Propriedades físico-químicas d'água

11 Apêndice II - Análise da Qualidade das Medidas Disponíveis

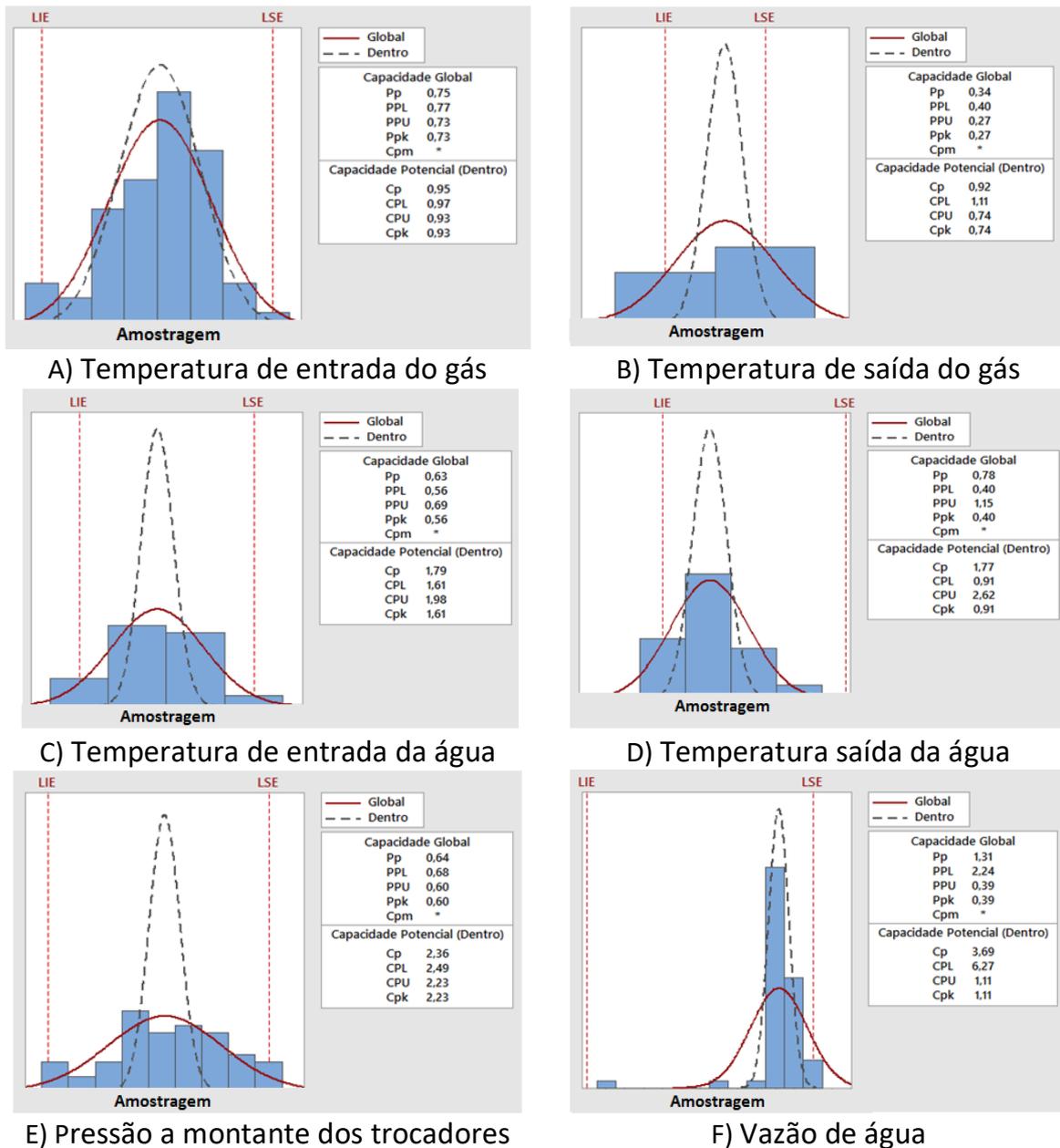


Figura 11.1: Análise da variabilidade das medidas disponíveis

12 Apêndice III – Resultados Testes Ajuste dos Parâmetros

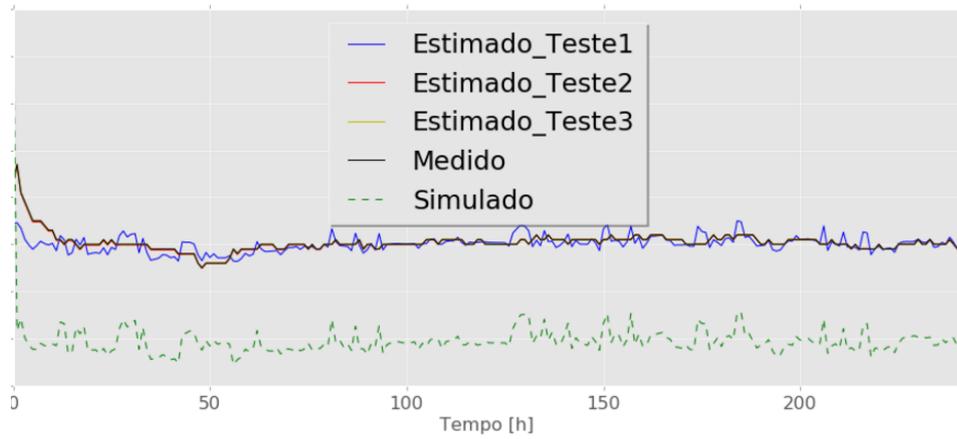


Figura 12.1: Temperatura Gás (°C) – Ajuste Parâmetro Q

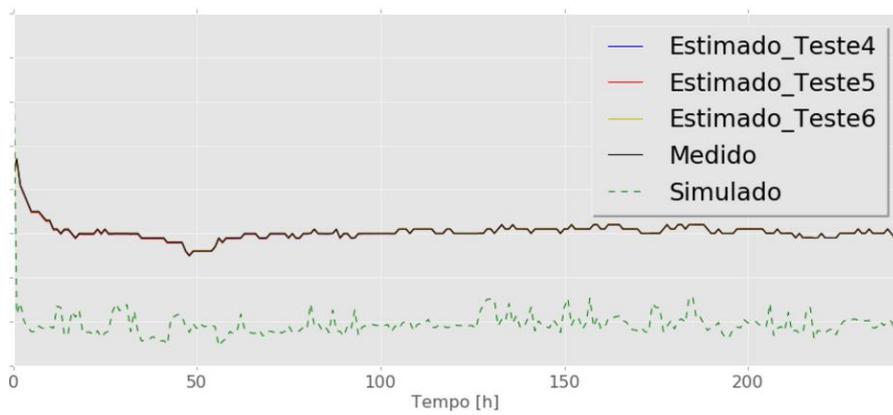
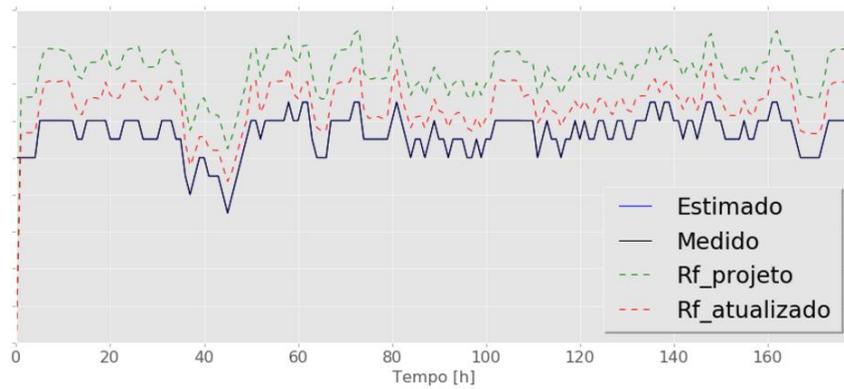
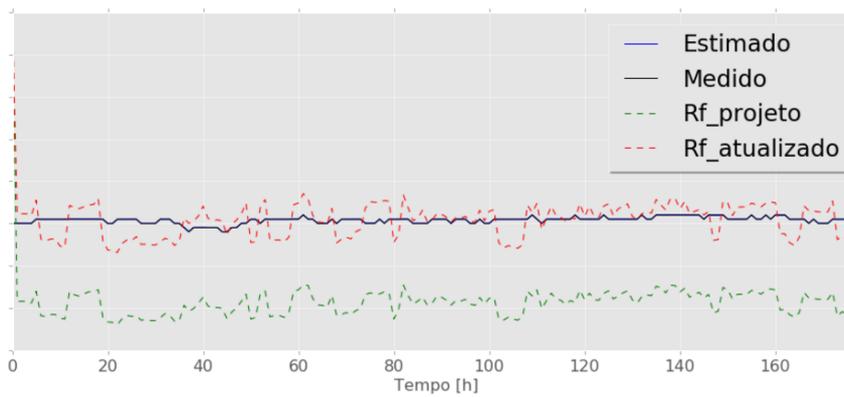
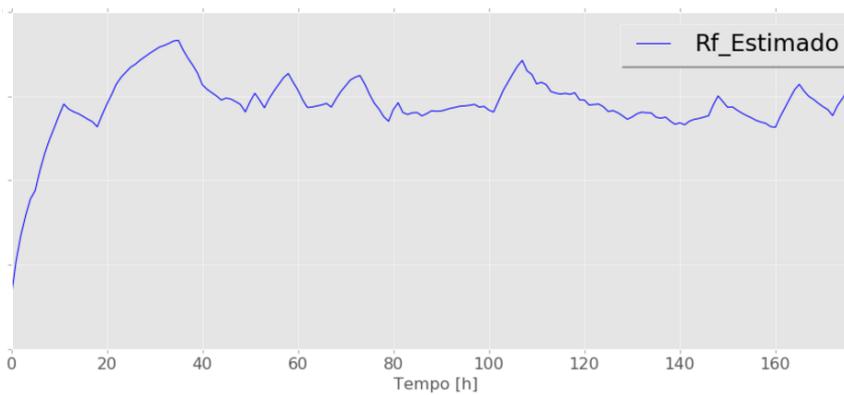
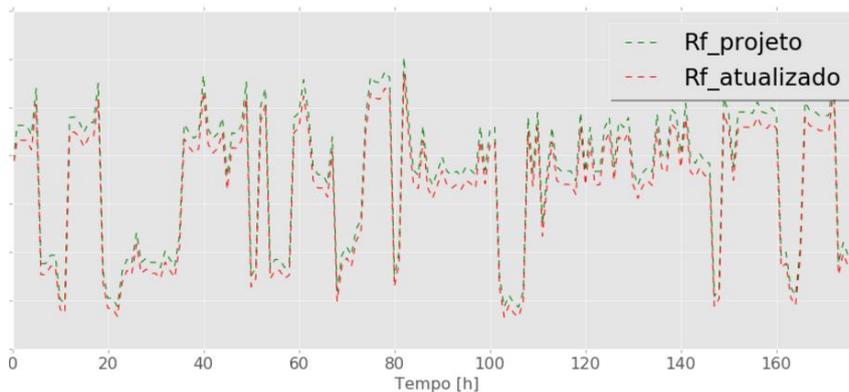
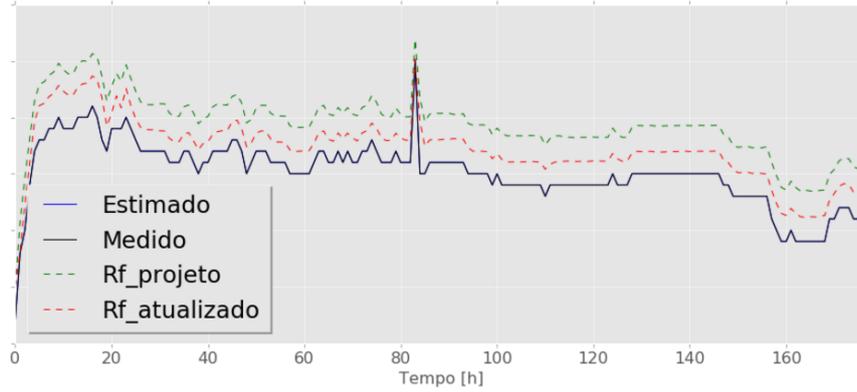
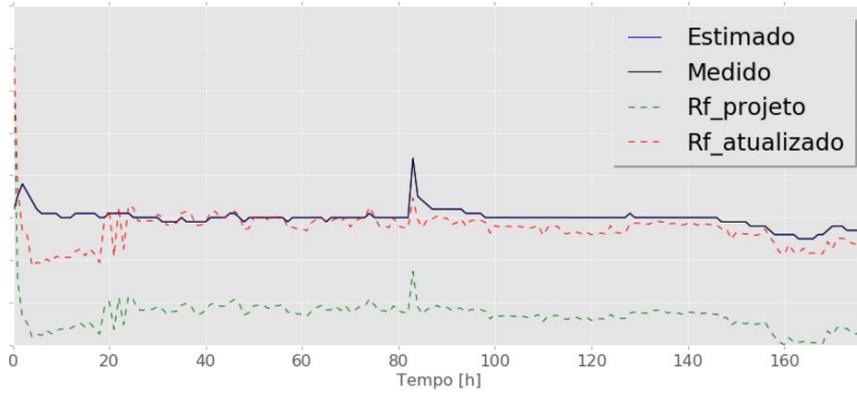


Figura 12.2: Temperatura Gás (°C) – Ajuste Parâmetro P0

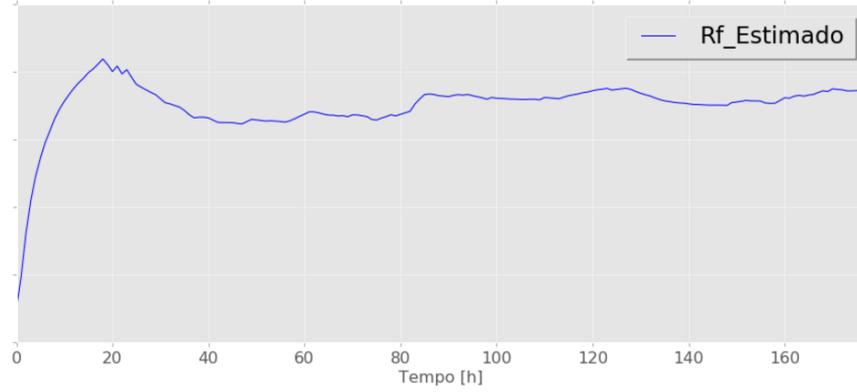
13 Apêndice IV – Resultados Testes Estimação da Incrustação**A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D3****B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D3****C) Incrustação (sm⁴C/kcal) – D3****D) Vazão de Gás (kg/s) – D3****Figura 13.1: Estimação Fouling – D3**



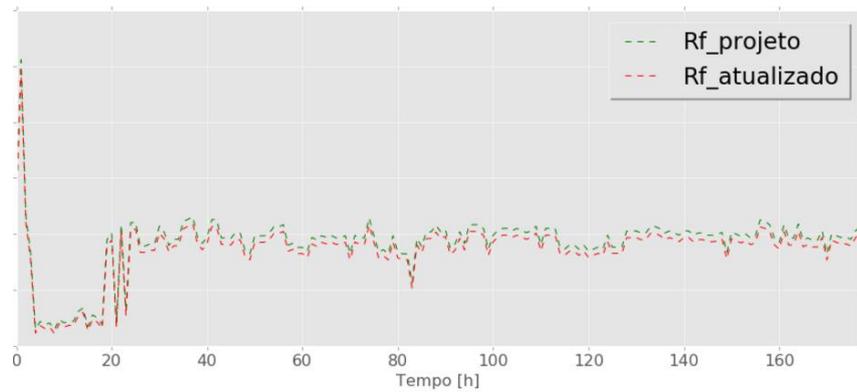
A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D4



B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D4

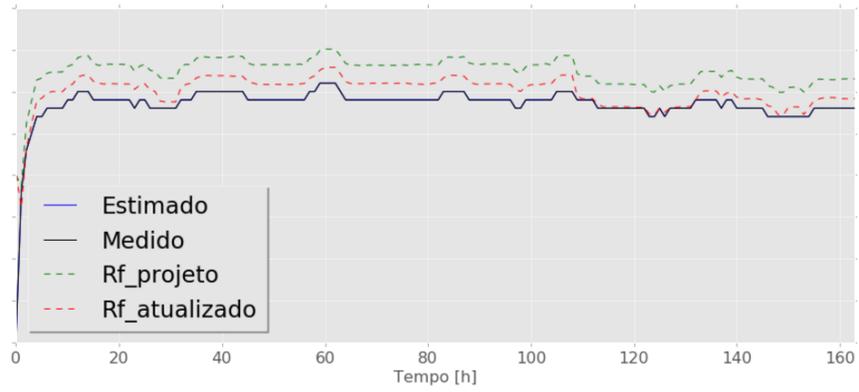


C) Incrustação (sm⁴C/kcal) – D4

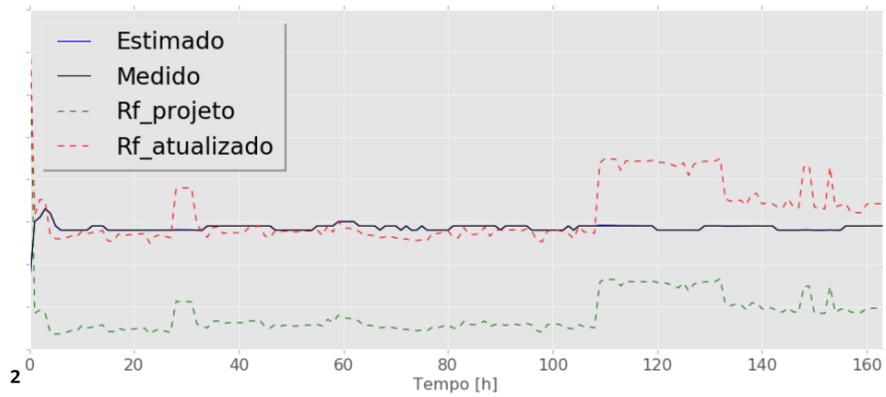


D) Vazão de Gás (kg/s) - D4

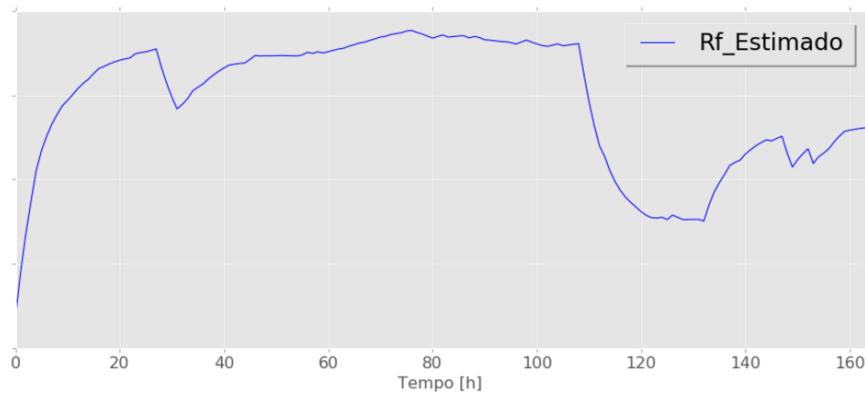
Figura 13.2: Estimação *Fouling* – D4



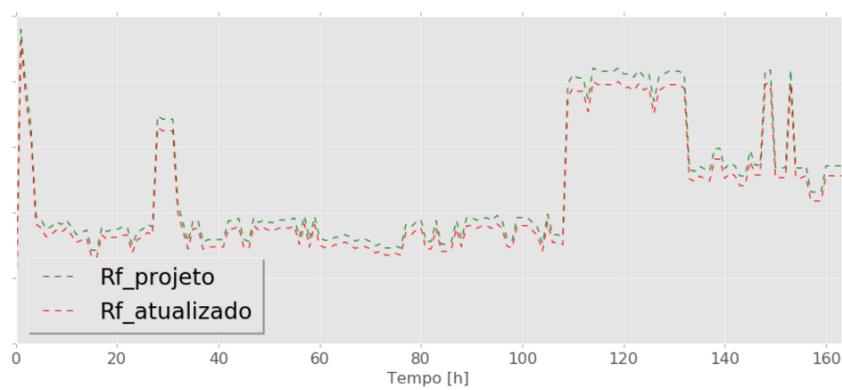
A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D5



B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D5

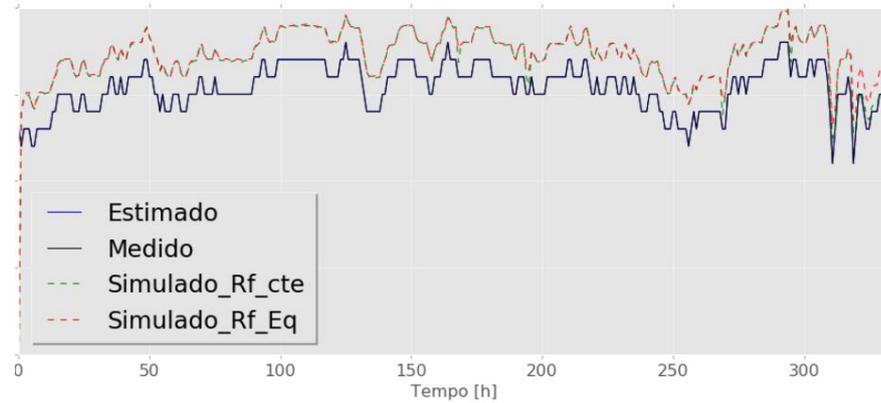


C) Incrustação ($\text{sm}^4\text{°C/kcal}$) – D5

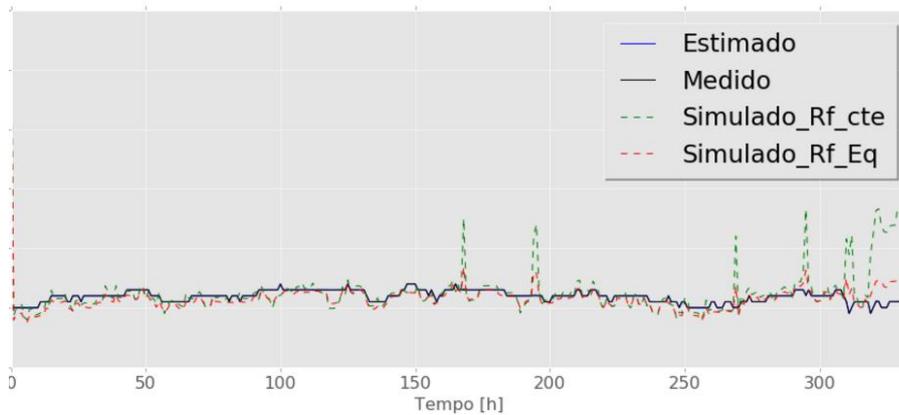


D) Vazão de Gás (kg/s) – D5

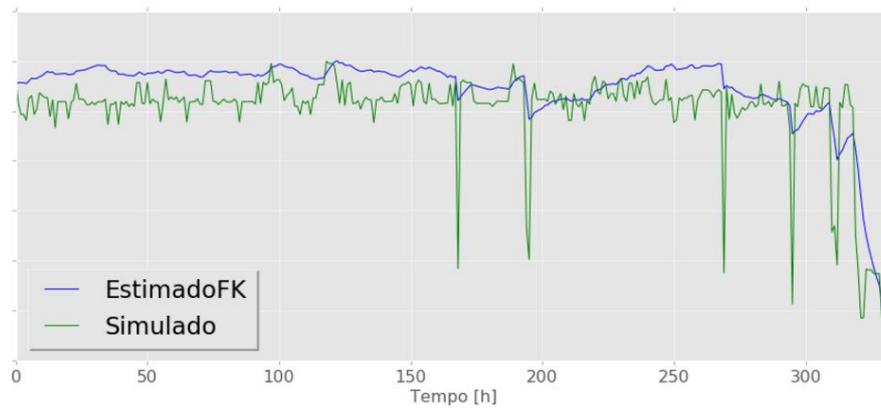
Figura 13.3: Estimação *Fouling* – D5

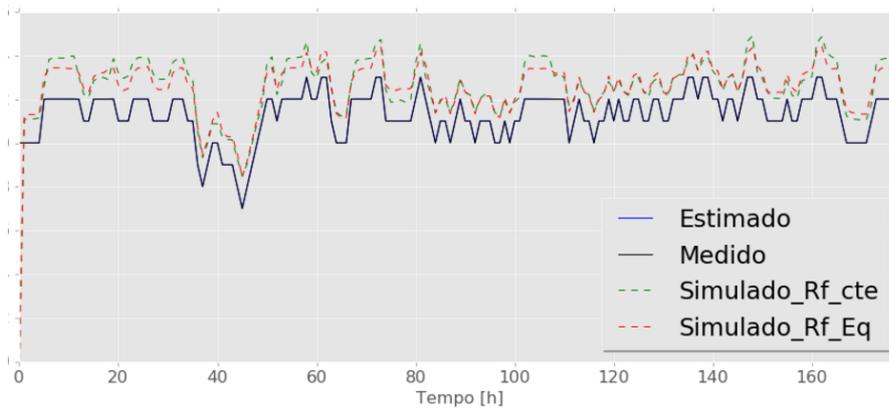
14 Apêndice V – Resultados Testes Modelo de Incrustação

A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D2

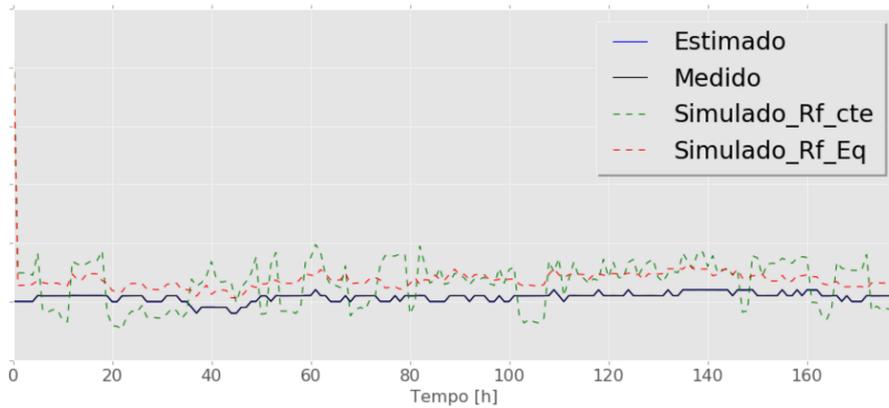


B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D2

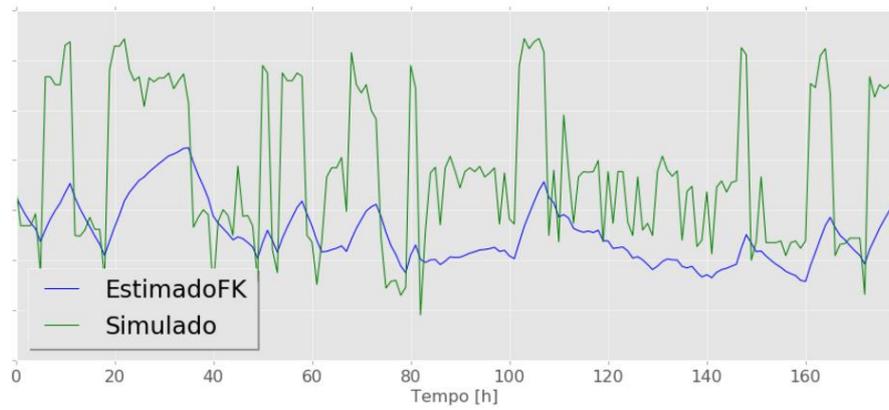
C) Incrustação (sm⁴°C/kcal) – D2**Figura 14.1: Modelo de Incrustação – D2**



A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D3

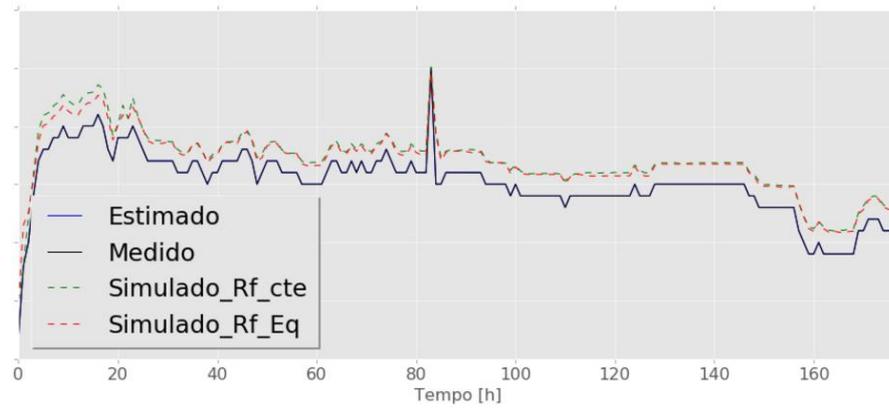


B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D3

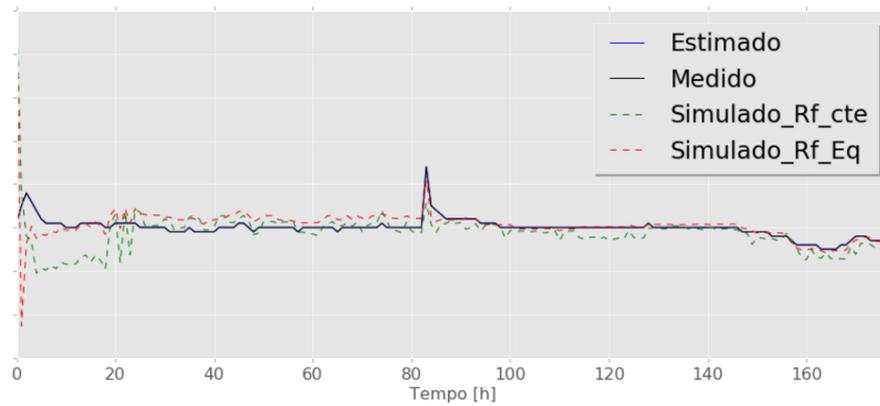


C) Incrustação (sm⁴C/kcal) – D3

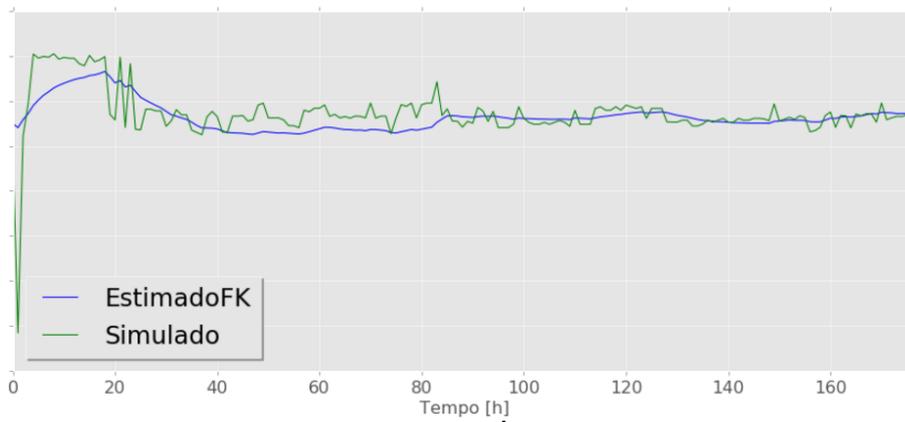
Figura 14.2: Modelo de Incrustação – D3



A) Temperatura de Saída da Água (°C) – D4



B) Temperatura de Saída do Gás (°C) – D4



C) Incrustação (sm⁴°C/kcal) – D4

Figura 14.3: Modelo de Incrustação – D4

15 Apêndice VI – Código Modelo

```

model Trocador2
    //COSNTANTES (O VALOR NÃO MUDA AO LONGO DA SIMULAÇÃO)
    constant Real A = (--); //Area de troca térmica(m2)
    constant Real di = (--); //Diâmetro interno do tubo interno(m)
    constant Real doe = (--); //Diâmetro externo do tubo interno(m)
    constant Real Di = (--); //Diâmetro interno do tubo externo(m)
    constant Real Do = (--); //Diâmetro externo do tubo externo(m)
    constant Real L = (--); //comprimento trocador total(m)
    constant Real l = (--); // 1/4 comprimento trocador (m)
    constant Real F = (--); //Fator correção média logaritmica
    //PARAMETROS (O VALOR PODE MUDAR AO LONGO DA SIMULAÇÃO)
    //INICIALIZACAO
    parameter Real Rf_init = (--);
    parameter Real Tout1_init=(--);
    parameter Real Tout2_init=(--);
    //DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS ALGÉBRICAS
    //-->Deltas Ts
    Real dTln; //Temperatura média logaritmica(°C)
    Real dT1; //Delta T terminal quente(°C)
    Real dT2; //Delta T terminal frio(°C)
    Real dTm1; //Temperatura média do gás(°C)
    Real dP; //Pressão de saída gás
    //-->Números adimensionais e coeficientes
    Real U; //Coeficiente global de troca térmica (kcal/s°Cm2)
    Real Nui; //Nusselt lado gás(-)
    Real Nuo; //Nusselt lado agua(-)
    Real Pri; //Prandtl lado gás(-)
    Real Pro; //Prandtl lado agua(-)
    Real Rei; //Reynolds lado gás(-)
    Real Reo; //Reynolds lado agua(-)
    Real Eo; //Coeficiente de arraste lado agua(m)
    Real E; //Parâmetro equação queda de pressão
    Real ho; //Coeficiente convectivo agua (kcal/s°Cm2)
    Real hi; //Coeficiente convectivo gás (kcal/s°Cm2)
    //-->Dimensionamento trocador
    Real Aint; //Area de escoamento lado gás(m2)
    Real Aout; //Area de escoamento lado agua(m2)
    Real Ai; //Area superficial lado gás(m2)
    Real Ao; //Area superficial lado agua(m2)
    Real dh; //Diâmetro hidraulico região anular(m)
    Real Vo; //Volume agua(m3)
    Real Vi; //Volume gás(m3)
    //-->Propriedades gás
    Real Cpi; //Calor especifico gás(kcal/kg°C)
    Real Mi; //viscosidade gás(kg/ms)
    Real ki; //condutividade térmica gás(kcal/sm°C)
    Real mic; //vazão de gás(kg/s)
    //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 agua(°C)
input Real Tin1;//Temperatura entrada gás(°C)
input Real Tin2;//Temperatura entrada agua(°C)
input Real Tout1real;//Temperatura saída gás(°C)
input Real Tout2real;//Temperatura saída agua(°C)
input Real mo;//Vazão mássica de agua(kg/s)
input Real Pin1;//Pressão entrada do gás(atm)
input Real rhoa;//densidade agua(kg/m3)
input Real Cpo;//Calor especifico agua(kcal/kg°C)
input Real ko;//condutividade térmica agua(kcal/sm°C)
input Real Mo;//viscosidade agua(kg/ms)
input Real rhoi;//densidade gas(kg/m3)
//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=F*(((dT1+dT2)*0.5)^0.33)*((dT1*dT2)^0.33)
dTm1 = 0.5*(Tout1+Tin1);
Aint*4=3.14*(di^2);
Aout*4=3.14*((Di^2)-(doe^2));
Ai=3.14*di*L;
Ao=3.14*(doe)*1;
Vo=3.14*((Di^2)-(doe^2))*1;
Vi=3.14*(di^2)*L;
dh*(Di+doe)=((Di^2)-(doe^2));
Mi = ((-3.985+0.38726*(dTm1+273)-0.00011227*(dTm1+273)^2)*0.0001)*0.001;
Cpi=0.000239*(1000*(32.083-0.014831*(dTm1+273)+0.00024774*(dTm1+273)^2-
0.00000023766*(dTm1+273)^3+0.00000000068274*(dTm1+273)^4)/28.05);
ki = 0.000239*(-0.0111+0.000036219*(dTm1+273)+0.00000012459*((dTm1+273)^2));
mic*Cpi*(Tin1-Tout1real)=4*mo*Cpo*(Tout2real-Tin2);
der(Rf)=0;
Nui*ki=hi*di;
Nuo*ko=dh*ho;
Rei*Aint*Mi=mic*di;
Reo*Aout*Mo=mo*dh;
Pri*ki=Cpi*Mi;
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*(Eo/8)*(1+((dh/1)^(2/3)));
hi*Ai*ho*Ao=U*A*(ho*Ao+hi*Ai+ho*hi*(Rf));
der(Tout1)*Vi*rhoi*Cpi = mic*Cpi*(Tin1-Tout1)-U*Ai*dTln;
der(Tout2)*Vo*rhoa*Cpo = mo*Cpo*(Tin2-Tout2)+U*Ao*dTln;
Tout1m=Tout1;
Tout2m=Tout2;
end Trocador2;

```

16 Apêndice VII – Código em Python

16.1 Definição das Bibliotecas

```
import numpy as np
from numpy import transpose as tp
from numpy.linalg import inv as iv
from numpy import dot as dot
import scipy.integrate as integ
import matplotlib.pyplot as plt
import time
from scipy import optimize
from scipy.optimize import fsolve
from scipy.linalg import expm
import cvxopt
cvxopt.solvers.options['show_progress'] = False
from scipy import optimize
from openopt import OP
from scipy import stats
from matplotlib import style
style.use('ggplot')
np.random.seed(0)
import pandas as pd
from pymodelica import compile_fmu
from datetime import timedelta,time
import matplotlib.patches as mpatches
import matplotlib.pyplot as plt
from pyfmi import load_fmu
import scipy.interpolate as inter
import nlopt
from pyswarm import pso
import mpld3
import CoolProp as cp
```

16.2 Importando Dados para Leitura

```
#Criando vetores para o tempo e as variáveis de entrada
dados = pd.read_csv("Arquivo.csv")
```

16.3 Organizando os Dados Importados

```
#Organizando os dados em vetores
Time=dados["Time"]
Tin1=dados["Tin1"]
Tout1real=dados["Tout1"]
Tin2=dados["Tin2"]
Tout2real=dados["Tout2"]
mo=dados['mo']
Pin1=dados["Pin1"]
dTm1=dados["dTm1"]
dTm2=dados["dTm2"]
```

16.4 Determinação das Variáveis pelo CoolProp

```
#Utilizando CoolProp para o cálculo das propriedades do fluido refrigerante
rhoo=[]
Cpo=[]
```

```

Mo=[]
ko=[]
for i in range (0,179,1):
    rhoo.append(cp.CoolProp.PropsSI('D', 'T', dados.dTm2[i], 'P', Pressão Operação, 'Fluído'))
    Cpo.append(0.000239*(cp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', dados.dTm2[i], 'P', Pressão Operação, 'Fluído')))
    Mo.append(0.001*(cp.CoolProp.PropsSI('V', 'T', dados.dTm2[i], 'P', Pressão Operação, 'Fluído')))
    ko.append(0.000239*(cp.CoolProp.PropsSI('L', 'T', dados.dTm2[i], 'P', Pressão Operação, 'Fluído')))

```

16.5 Cálculo da Densidade do Fluido Interno

```

#Cálculo da densidade do fluido interno
Z=A*(dTm1*dTm1)+B *dTm1 +C
rhoi=(Pin1*M)/(Z*dTm1*R)

```

16.6 Concatenando Dados de Entrada do Modelo

```

#Concatenando os vetores para dar como entrada no modelo
u_traj=np.transpose(np.vstack((Time,Tin1,Tin2,mo,Pin1,rhoo,Cpo,Mo,ko,dTm2,Tout1real,T
out2real,rhoi)))

```

16.7 Definição do Modelo

```

%%file modelo8.mo
# Modelo desenvolvido no Apêndice anterior

```

16.8 Carregando o Modelo

```

#Compilando o modelo
fmu_name = compile_fmu("Trocador2","modelo8.mo",version ='2.0' ,
                        compiler_options
                        =
{'generate_block_jacobian':True,'generate_ode_jacobian':True})
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'] = Time.size - 1 #Número de pontos de amostragem
res=init_model.simulate(start_time=0,final_time=640800,
    input=({"Tin1","Tin2","mo","Pin1","rhoo","Cpo","Mo","ko","dTm2","Tout1real",
    "Tout2real","rhoi"},u_traj), options = opts)
mis=res["mic"];
dPs=res["dP"];
Tout1s=res["Tout1"];
Tout2s=res["Tout2"];

```

16.9 Implementação Método do Filtro de Kalman

```

#Dados medidos
measured = np.zeros(shape=(179,2))
for h in range(0,2):
    for i in range(0,179):
        if h==0:
            measured[i,h] = Tout1real[i]
        if h==1:
            measured[i,h] = Tout2real[i]
def DEKF_DRE(y0, P0, Q0, R0):
    step = 1
    n = Time.size-1
    P = np.matrix(np.eye(3))
    R = np.matrix(np.eye(2))
    Q = np.matrix(np.eye(3))

```

```

K = np.matrix(np.empty((3,2)))
state_ekf = np.empty((3, n/step + 1))
state_ekf[:, 0] = y0
I = np.matrix(np.eye(3))
time_ekf = np.zeros(n/step + 1)
time_ekf[0] = Time[0]
measured_ekf = np.empty((2, n/step + 1))
P = P0
R = R0
Q = Q0
for i in range(0,n/step):
    # Simulate model
    init_model.reset()
    opts = init_model.simulate_options()
    opts['CVode_options']['atol'] = 1e-10
    opts['CVode_options']['rtol'] = 1e-10
    opts['CVode_options']['verbosity'] = 50 # No output
    init_model.set(['Rf_init','Tout1_init','Tout2_init'], state_ekf[:, i])
    res_fil = init_model.simulate(start_time=(Time[step*i]),final_time=(Time[step
*
                                i
                                +
                                step]),
input=(["Tin1","Tin2","mo","Pin1","rhoo","Cpo","Mo","ko","dTm2","Tout1real","Tout2real","rh
oi"],u_traj[step*i:step * i + step]), options = opts)
    x1_fil = res_fil['Rf'][-1]
    x2_fil = res_fil['Tout1'][-1]
    x3_fil = res_fil['Tout2'][-1]

    result = np.array((x1_fil,x2_fil,x3_fil))
    state_ekf[:, i + 1] = result
    time_ekf[i + 1] = res_fil['time'][0]
    [a,b,c,d] = init_model.get_state_space_representation(A=True, B=False,
C=True, D=False)
    A = np.matrix(a.toarray())
    C = np.matrix(c.toarray())
    phi = np.matrix(expm(A*step))
    p_k_1 = P
    p_k = Q + (phi * p_k_1 * phi.T) - (phi * p_k_1 * C.T) * iv(C * p_k_1 * C.T +
R) * (C * p_k_1 * phi.T)
    K = ((p_k * C.T) * iv(C*p_k*C.T + R))
    state_ekf[:, i + 1] = (np.matrix(state_ekf[:, i + 1]).T + K *
(np.matrix(measured[i*step ,:]).T - (C * np.matrix(state_ekf[:,i + 1]).T))).T
    P = p_k
    return state_ekf, time_ekf, measured_ekf
x1_init = res['Rf'][0]
x2_init = res['Tout1'][0]
x3_init = res['Tout2'][0]
y0 = np.array((x1_init,x2_init,x3_init))

```

16.10 Definição dos Parâmetros Ajustáveis do Filtro

```

P=np.matrix(np.eye(3)*10e2)
R=np.matrix(np.eye(2)*10e-1)
Q=np.matrix(np.eye(3)*10e1)
state_ekf, time_ekf, measured_ekf = DEKF_DRE(y0, P, Q, R)

```

16.11 Criação dos Gráficos

```

fig = plt.figure(figsize=(15,6))
plt.rcParams.update({'font.size': 16})
plt.xlabel('Tempo [s]',fontsize=16)
plt.ylabel('Pressao []',fontsize=16)
plt.plot(Time, (dPs/100000), '--g', label='Simulado')
plt.xlim(0,640000)
legend = plt.legend(loc='best', shadow=True, fontsize='x-large')
legend.get_frame()
plt.show()

```

```

fig = plt.figure(figsize=(15,6))
plt.rcParams.update({'font.size': 16})
plt.xlabel('Tempo [s]',fontsize=16)
plt.ylabel('Vazao []',fontsize=16)
plt.plot(Time, (mis), '--g', label='Simulado')
legend = plt.legend(loc='best', shadow=True, fontsize='x-large')
legend.get_frame()
plt.show()

```

```

fig = plt.figure(figsize=(15,6))
plt.rcParams.update({'font.size': 16})
plt.xlabel('Tempo [s]',fontsize=16)
plt.ylabel('Incrustação',fontsize=16)
plt.plot(time_ekf, (state_ekf[0]), 'b', label='Estimado')
legend = plt.legend(loc='best', shadow=True, fontsize='x-large')
legend.get_frame()
plt.show()

```

```

fig = plt.figure(figsize=(15,6))
plt.rcParams.update({'font.size': 16})
plt.xlabel('Tempo [s]',fontsize=16)
plt.ylabel('Temperatura []',fontsize=16)
plt.plot(time_ekf, (state_ekf[1]), 'b', label='Estimado')
plt.plot(Time, (Tout1real), 'k', label='Medido')
plt.plot(Time, (Tout1s), 'g--', label='Simulado')
legend = plt.legend(loc='best', shadow=True, fontsize='x-large')
legend.get_frame()
plt.show()

```

```

fig = plt.figure(figsize=(15,6))
plt.rcParams.update({'font.size': 16})
plt.xlabel('Tempo [s]',fontsize=16)
plt.ylabel('Temperatura [C]',fontsize=16)
plt.plot(time_ekf[1::], (state_ekf[2][1::]), 'b', label='Estimado')
plt.plot(Time, (Tout2real), 'k', label='Medido')
plt.plot(Time, (Tout2s), 'g--', label='Simulado')
legend = plt.legend(loc='best', shadow=True, fontsize='x-large')
legend.get_frame()
plt.show()

```

16.12 Teste de Observabilidade

```
# Simulate model
#Analise de Observabilidade
init_model.reset()
opts = init_model.simulate_options()
opts['ncp'] = 99
opts['CVode_options']['atol'] = 1e-15
opts['CVode_options']['rtol'] = 1e-10
opts['CVode_options']['verbosity'] = 50 # No output
res=init_model.simulate(start_time=0,final_time=100,
    input=(["Tin1","Tin2","mo","Pin1","rhoo","Cpo","Mo","ko","dTm2","Tout1real",
    "Tout2real"],u_traj), options = opts)
[a,b,c,d]=init_model.get_state_space_representation(A=True, B=True, C=True, D=False)
A = a.toarray()
B = b.toarray()
C = c.toarray()
lamb = np.linalg.eigvals(np.matrix(A))
Ilamb = np.matrix(np.diag(lamb))
H = Ilamb - A
J = np.concatenate((H,C))
m = np.linalg.matrix_rank(J)
```