



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto de Química

Caroline de Oliveira Gonçalves

**Desenvolvimento de técnicas de otimização da programação das limpezas
de redes de trocadores de calor**

Rio de Janeiro

2013

Caroline de Oliveira Gonçalves

**Desenvolvimento de técnicas de otimização da programação das limpezas
de redes de trocadores de calor**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Hemerly Costa

Rio de Janeiro

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTC/Q

G635 Gonçalves, Caroline de Oliveira.
Desenvolvimento de técnicas de otimização da programação das
limpezas de redes de trocadores de calor. / Caroline de Oliveira
Gonçalves. - 2013.
156 f

Orientador: André Luiz Hemerly Costa.
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Instituto de Química.

1. Trocadores de calor - Teses. 2. Simulação e otimização – Teses.
3. Deposição - Teses. I. Costa, André Luiz Hemerly. II. Universidade
do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. III. Título.

CDU 536.24

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
dissertação, desde que citada na fonte.

Assinatura

Data

Caroline de Oliveira Gonçalves

**Desenvolvimento de técnicas de otimização da programação das limpezas
de redes de trocadores de calor**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente.

Aprovada em 05 de dezembro de 2013.

Orientador:

Prof. Dr. André Luiz Hemerly Costa

Instituto de Química - UERJ

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Azevedo dos Reis

Instituto de Química - UERJ

Prof. Dr. André Luís Alberton

Instituto de Química - UERJ

Prof.^a Dra. Heloísa Lajas Sanches

Escola de Química - UFRJ

Rio de Janeiro

2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Carlos e Marytsa, por estarem sempre presentes e serem grandes incentivadores. Amo muito vocês!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por ter me dado força nos momentos mais difíceis.

A todos os meus familiares amados que sempre acreditaram e torceram pelo meu sucesso, especialmente meus pais, Carlos e Marytsa, e meus irmãos, Carlos e Marcele.

Ao meu namorado Frederico por todo incentivo e paciência. Obrigada por estar sempre presente!

Ao querido orientador Prof. Dr. André Hemerly, pelos ensinamentos, pela paciência comigo, pelo exemplo de professor e pesquisador e pela amizade.

Ao engenheiro Fábio Liporace e toda a equipe do projeto pelas contribuições essenciais ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus queridos amigos pelo incentivo, carinho e alegria, em especial a Ariane Sousa, Bianca Molinari, Bruna Ferreira, Diego Lopes, Felipe Linhares, Juliana Gonçalves, Julyana Garcia, Luiz Torres, Susana Lorena e Thabata Moraes. A caminhada foi muito melhor com vocês por perto!

Ao CNPQ e à PETROBRAS, pelo apoio financeiro.

RESUMO

GONÇALVES, Caroline de Oliveira. *Desenvolvimento de técnicas de otimização da programação das limpezas de redes de trocadores de calor*. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Trocadores de calor são equipamentos muito utilizados na indústria de processos com o objetivo de modificar a temperatura e/ou o estado físico de correntes materiais. Uma rede de trocadores de calor pode ser definida como um grupo de trocadores de calor interligados, a fim de reduzir as necessidades de energia de um sistema. No entanto, durante a operação de uma rede, a eficiência térmica dos trocadores de calor diminui devido à deposição. Esse efeito promove o aumento dos custos de combustível e das emissões de carbono. Uma alternativa para mitigar este problema baseia-se no estabelecimento de uma programação das limpezas dos trocadores de calor durante a operação de rede. Este tipo de abordagem ocasiona uma situação na qual ocorre um conflito de escolha: a limpeza de um trocador de calor pode recuperar a sua eficiência térmica, mas implica custos adicionais, tais como, mão-de-obra, produtos químicos, etc. Além disso, durante a limpeza, o trocador de calor tem de ser contornado por uma corrente de *by-pass*, o que aumenta temporariamente o consumo de energia. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo explorar diferentes técnicas de otimização envolvendo métodos estocásticos e heurísticos. Com este objetivo foi desenvolvido um conjunto de códigos computacionais integrados que envolvem a simulação pseudo-estacionária do comportamento da rede relacionado com incrustações e a otimização da programação das limpezas deste tipo de sistema. A solução do problema indica os períodos de tempo para a limpeza de cada trocador de calor. Na abordagem estocástica empregada, os parâmetros do algoritmo genético, como probabilidade de *crossover* e probabilidade de mutação, foram calibrados para o presente problema. A abordagem heurística desenvolvida se deu através da sequência do conjunto de movimentos zero, um e dois. De forma alternativa, desenvolveu-se a metodologia heurística recursiva na qual os conjuntos de movimentos um e dois foram empregados recursivamente. Também foi desenvolvida a abordagem híbrida que consistiu em diferentes combinações da metodologia estocástica e heurística. A análise comparativa entre as metodologias empregadas teve como objetivo avaliar a abordagem mais adequada para o presente problema da programação das limpezas em termos de função objetivo e esforço computacional. O desempenho da abordagem proposta foi explorado através de uma série de exemplos, incluindo uma refinaria real brasileira. Os resultados foram promissores, indicando que as técnicas de otimização analisadas neste trabalho podem ser abordagens interessantes para operações que envolvam redes de trocadores de calor. Dentre as abordagens de otimização analisadas, a metodologia heurística desenvolvida no presente trabalho apresentou os melhores resultados se mostrando competitiva frente às abordagens comparadas da literatura.

Palavras-chave: Redes de trocadores de calor. Deposição. Otimização. Programação das limpezas.

ABSTRACT

GONÇALVES, Caroline de Oliveira. *Development of techniques for optimizing the scheduling of cleaning of heat exchanger networks*. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Heat exchangers are devices widely used in many processes with the goal of changing the temperature and/or the physical state of the streams. A heat exchanger network (HEN) can be defined as a group of interconnected heat exchangers in order to reduce the energy requirements of a system and is widely used in process industries. However, during the operation of a HEN, the thermal effectiveness of the heat exchangers decreases due to fouling. This effect brings an increase of the fuel costs and carbon emissions. A possible approach to mitigate this problem is based on the establishment of a heat exchanger cleaning schedule during the refinery operation. This kind of intervention brings a tradeoff: the cleaning of a heat exchanger can restore its thermal effectiveness, but implies in additional costs, such as, manpower, chemicals, etc. Additionally, during the cleaning, the heat exchanger must be bypassed which temporally increases the energy consumption. In this context, the present work aims to explore different optimization techniques involving stochastic and heuristic methods. For this purpose, it was developed a set of integrated computational codes involving a pseudo-stationary simulation of HEN behavior related to fouling and schedule optimization of cleaning this type of system. The solution of the problem indicates for the operating staff the time periods for the cleaning of each heat exchanger in the crude preheat train. In the stochastic approach used, the parameters of the genetic algorithm, as the probability of crossover and mutation, have been calibrated to the present problem. The developed heuristic approach was made through the sequence of motions set of zero, one and two. Alternatively, the methodology developed in which the recursive heuristic move sets one and two were used recursively. The hybrid approach consisting of different combinations of stochastic and heuristic methodology was also developed. A comparative analysis of methodologies aimed at assessing the most appropriate approach to this problem of scheduling the cleaning in terms of computational effort and objective function. The performance of the proposed approach was explored by a series of examples including a real Brazilian refinery. The results were promising, suggesting that the optimization techniques of this work may be interesting approaches to operations involving HENs. Among the analyzed optimization approaches, the heuristic methodology developed in this work showed the best results showing competitive front approaches compared to the literature.

Keywords: Heat exchanger network. Fouling. Optimization. Schedule of cleanings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Exemplos de programações de parada de trocadores de calor: (a) Rede de 3 trocadores de calor; (b) rede de 10 trocadores de calor.....	33
Figura 2-	Estrutura de um algoritmo genético típico.....	42
Figura 3-	Esquema de um trocador de calor. Linhas contínuas: correntes frias Linhas tracejadas: correntes quentes.....	46
Figura 4-	Esquema de um misturador de correntes.....	49
Figura 5-	Esquema de um divisor de correntes.....	50
Figura 6-	Esquema de um divisor com três correntes.....	50
Figura 7-	Exemplo de digrafo do fluxograma de processo. Correntes frias: linhas contínuas – Correntes quentes: Linhas tracejadas – Unidades de suprimento: Quadrados brancos – Unidades de demanda: Quadrados pretos – Divisores: círculos brancos – Misturadores: círculos pretos.....	52
Figura 8-	Matriz de incidência do digrafo do fluxograma de processo do exemplo.....	54
Figura 9-	Algoritmo de simulação pseudo-estacionária.....	60
Figura 10-	Diagrama esquemático de uma rede de trocadores de calor. Linhas sólidas: corrente fria; linha pontilhada: corrente quente.....	61
Figura 11-	Discretização do tempo do problema de programação das paradas.....	63
Figura 12-	Exemplo de rede de trocadores de calor ramificada (SMAÏLI et al., 2002a).....	64
Figura 13-	Exemplo da codificação binária empregada para um cromossomo e a programação das paradas para limpeza correspondente com os sub-períodos de limpeza e de operação.....	67
Figura 14-	Exemplo de população inicial gerada. $HE = 3$; $N_p = 5$; $limpop = 0,08$	68
Figura 15-	Exemplo de crossover de um ponto.....	69
Figura 16-	Exemplo de mutação.....	69
Figura 17-	Algoritmo do conjunto de movimentos zero.....	72
Figura 18-	Algoritmo do conjunto de movimentos um.....	73
Figura 19-	Algoritmo do conjunto de movimentos dois.....	75
Figura 20-	Sequências possíveis dos movimentos para a metodologia heurística.....	76

Figura 21-	Esquemático das metodologias híbridas.....	78
Figura 22-	Análise da probabilidade de crossover.....	81
Figura 23-	Análise da probabilidade de mutação.....	82
Figura 24-	Análise do tamanho da população.....	83
Figura 25-	Análise do parâmetro de controle da população inicial.....	84
Figura 26-	Análise da otimização com elitismo com diferentes valores de probabilidade de mutação.....	86
Figura 27-	Análise do elitismo.....	87
Figura 28-	Programação das paradas após conjunto de movimentos zero.....	89
Figura 29-	Programação das paradas após conjunto de movimentos um.....	89
Figura 30-	Programação das paradas após conjunto de movimentos dois.....	89
Figura 31-	Resultados de diferentes ordenações dos trocadores na metodologia heurística em termos de função objetivo (FO).....	91
Figura 32-	Resultados das heurísticas para o caso base 3 em termos de função objetivo (FO).....	92
Figura 33-	Resultados das heurísticas para o caso base 3 em termos de esforço computacional (EC).....	93
Figura 34-	Resultados da evolução da heurística recursiva para o caso base 3 em termos de função objetivo (FO).....	93
Figura 35-	Resultados das metodologias híbridas para o caso base 3 em termos de função objetivo (FO).....	96
Figura 36-	Resultados das metodologias híbridas para o caso base 3 em termos de esforço computacional (EC).....	97
Figura 37-	Melhores resultados de cada metodologia em termos de função objetivo (FO). Híbrido I: AG + Heurístico; Híbrido V: Heurístico + AG + Heurístico.....	98
Figura 38-	Melhores resultados de cada metodologia em termos de esforço computacional (EC). Híbrido I: AG + Heurístico; Híbrido V: Heurístico + AG + Heurístico.....	99
Figura 39-	Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística correntes (ASSIS et al., 2013).....	100
Figura 40-	Programação ótima das paradas para caso base 2 empregando metodologia heurística.....	101

Figura 41-	Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.....	102
Figura 42-	Programação ótima das paradas para o caso base 2 empregando metodologia heurística.....	102
Figura 43-	Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.....	103
Figura 44-	Programação ótima das paradas para o caso base 2 empregando metodologia heurística.....	103
Figura 45-	Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.....	104
Figura 46-	Programação ótima das paradas para o caso base 2 empregando metodologia heurística.....	105
Figura 47-	Perfil da temperatura final da rede para o caso base 3 empregando metodologia heurística.....	106
Figura 48-	Programação ótima das paradas para o caso base 3 empregando metodologia heurística.....	107
Figura 49-	Perfil de temperatura final da rede em caso sem restrições utilizando metodologia heurística recursiva.....	109
Figura 50-	Programação das paradas em caso sem restrições utilizando metodologia heurística recursiva.....	110
Figura 51-	Perfil de temperatura final da rede em caso com restrições utilizando metodologia heurística recursiva.....	110
Figura 52-	Programação das paradas em caso com restrições utilizando metodologia heurística recursiva.....	111
Figura 53-	Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 1 com $C_c = 0$	113
Figura 54-	Programação ótima pela metodologia heurística recursiva para caso base 1 com $C_c = 0$	113
Figura 55-	Programação ótima por Smaïli et al. (2002a) para caso base 1 com $C_c = 0$	113
Figura 56-	Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 4 com $C_c = 4000$	115
Figura 57-	Programação ótima pela heurística recursiva para caso base 4 com $C_c =$	

	4000.....	115
Figura 58-	Programação ótima por Smaïli et al. (2001a) para caso base 4 com $C_c = 4000$	115
Figura 59-	Programação ótima por Smaïli et al. (2002b) para caso base 4 com $C_c = 4000$	116
Figura 60-	Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 5 com $C_c = 0$	117
Figura 61-	Programação ótima pela metodologia heurística recursiva para caso base 5 com $C_c = 0$	117
Figura 62-	Programação ótima por Smaïli et al. (2002a) para caso base 5 com $C_c = 0$	117
Figura 63-	Programação ótima das paradas por Lavaja e Bagajewicz (2004) para caso base 5 com $C_c = 0$	117
Figura 64-	Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 6 com $C_c = 4000$	119
Figura 65-	Programação ótima pela metodologia heurística recursiva para caso base 6 com $C_c = 4000$	120
Figura 66-	Programação ótima por Smaïli et al. (2002a) para caso base 6 com $C_c = 4000$	120
Figura 67-	Programação ótima por Lavaja e Bagajewicz (2004) para caso base 6 com $C_c = 4000$	120
Figura 68-	Fluxograma caso 1. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (SMAÏLI et al., 2002a).....	136
Figura 69-	Fluxograma caso 2. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (ASSIS et al., 2013).....	138
Figura 70-	Fluxograma caso 3: do armazenamento até a entrada da dessalgadora. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes;	

	blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (OLIVEIRA FILHO, 2007).....	140
Figura 71-	Fluxograma caso 3: após a dessalgadora. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (OLIVEIRA FILHO, 2007).....	141
Figura 72-	Fluxograma caso 4. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes; losango em branco: dessalgadora (SMAÏLI et al., 2001a).....	148
Figura 73-	Fluxograma caso 5. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo (SMAÏLI et al., 2002a).....	151
Figura 74-	Fluxograma caso 6. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (SMAÏLI et al., 2002a).....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Informações dos vértices do exemplo.....	53
Tabela 2-	Informações das arestas do exemplo.....	53
Tabela 3-	Casos investigados.....	79
Tabela 4-	Melhores valores encontrados dos parâmetros para o presente problema..	88
Tabela 5-	Resultados da metodologia heurística para o caso base 3.....	90
Tabela 6-	Restrições de número mínimo de trocadores operando.....	109
Tabela 7-	Resultados das comparações entre as metodologias heurística e heurística recursiva com a literatura para o caso base 1.....	112
Tabela 8-	Resultados comparativos para o caso base 4.....	114
Tabela 9-	Resultados comparativos para o caso base 5.....	116
Tabela 10-	Resultados comparativos para o caso base 6.....	118
Tabela 11-	Caso 1: Especificações das correntes de entrada.....	137
Tabela 12-	Caso 1: Taxa de deposição para o modelo linear.....	137
Tabela 13-	Caso 2: Especificações das correntes de entrada.....	139
Tabela 14-	Caso 3: Especificações das correntes de entrada.....	142
Tabela 15-	Caso 3: Parâmetros dos trocadores de calor.....	142
Tabela 16-	Caso 3: Parâmetros dos trocadores de calor.....	143
Tabela 17-	Caso 3: Coeficientes de película base (h) e vazões base (m).....	144
Tabela 18-	Caso 3: Modelos de deposição.....	145
Tabela 19-	Resistências iniciais de depósito (ASSIS et al., 2013).....	146
Tabela 20-	Caso 4: Especificações das correntes de entrada.....	149
Tabela 21-	Caso 4: Áreas de troca térmica dos trocadores desta rede.....	149
Tabela 22-	Caso 4: Taxa de deposição para o modelo linear.....	150
Tabela 23-	Caso 5: Especificações das correntes de entrada.....	152
Tabela 24-	Caso 6: Especificações das correntes de entrada.....	154
Tabela 25-	Caso 6: Áreas de troca térmica dos trocadores desta rede.....	154
Tabela 26-	Caso 6: Taxa de deposição para o modelo linear.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EC	esforço computacional
FA	função aptidão
FO	função objetivo

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	termo referente à Equação 2.56
c	constante referente à Equação 1.1, m^2K/J
C_c	custo de cada parada para limpeza, $\$/parada$
C	taxa de capacidade calorífica, $W/^\circ C$
C_R	razão entre as capacidades caloríficas das correntes, adimensional
C_e	preço da energia, $\$/kWh$
C_p	calor específico à pressão constante, $J/kg K$
D	diâmetro, m
E_a	energia de ativação, kJ/mol
\underline{Eci}	matriz auxiliar (Equação 2.40)
\underline{Eco}	matriz auxiliar (Equação 2.41)
\underline{Ehi}	matriz auxiliar (Equação 2.42)
\underline{Eho}	matriz auxiliar (Equação 2.43)
f_{obj}	função objetivo
g	número mínimo de trocadores que devem estar operando
J	conjunto de grupos de trocadores de calor
k	condutividade térmica do depósito, $W/(m K)$
m	vazão mássica, kg/s
\underline{m}	vetor de vazão mássica das correntes da rede, kg/s
\underline{M}	matriz de incidência do digrafo do fluxograma de processo
\underline{M}_{SPLIT}	matriz referentes às arestas de saída do divisor de corrente
n	vazão mássica de correntes externas, kg/s
n_{clean}	número de paradas totais da programação referente à Equação 3.2
\underline{n}	vetor de vazões mássicas de correntes externas, kg/s
N	número de vértices
N_p	número de períodos
P^{clean}	subperíodos de limpeza
$P^{process}$	subperíodos de operação
NUT	número de unidades de transferência, adimensional
Pr	número de Prandtl, adimensional
Pen	termo de penalidade da Equação 4.8

r	expoente referente a Equação B.1
R	constante universal dos gases, kJ /mol K
Re	número de Reynolds, adimensional
R_f	resistência de depósito, m ² K/W
\underline{Rc}	matriz auxiliar (Equação 2.44)
\underline{Rh}	matriz auxiliar (Equação 2.45)
S	número de arestas
SC	conjunto dos grupos de trocador de calor a obedecer às restrições
T	temperatura, °C
T_f	temperatura de filme, °C
\underline{T}	vetor de temperaturas das correntes da rede, °C
v	velocidade do fluido, m/s
V	temperatura nas correntes externas da rede, °C
V_{ref}	temperatura de referência nas correntes externas referente à Equação 3.2, °C
\underline{V}	vetor de temperaturas das correntes externas da rede, °C
y	parâmetro binário relacionado à taxa de capacidade calorífica
y	parâmetro binário relacionado ao estado de limpeza de cada trocador de calor

Sobrescritos

HE	trocador de calor
min	temperatura mínima
max	temperatura máxima
MX	misturador
P	unidade externa
PD	unidade externa de demanda
PS	unidade externa de suprimento
SP	divisor
*	valor da variável especificada
∞	assintótica referente à Equação 1.2

Subscritos

<i>c</i>	corrente fria
<i>h</i>	corrente quente
<i>i</i>	entrada
<i>j</i>	restrições
<i>k</i>	índice da aresta
<i>o</i>	saída
<i>min</i>	fluido mínimo
<i>max</i>	fluido máximo
<i>t</i>	índice do vértice
+	matriz de entradas positivas
-	matriz de entradas negativas

Letras gregas

α	parâmetro empírico referente às Equações 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6
β	parâmetro empírico referente às equações 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6
γ	parâmetro empírico referente às equações 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6
ε	efetividade do trocador de calor, adimensional
μ	viscosidade absoluta, Pa s
ρ	massa específica, kg/m ³
τ	tempo
τ_w	tensão de cisalhamento na parede, N/m ²
<i>T</i>	constante de tempo referente à Equação 1.2

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	22
	O presente trabalho.....	24
	Objetivo.....	25
	Estrutura da dissertação.....	25
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
1.1	Deposição.....	26
1.1.1	<u>Modelo linear.....</u>	29
1.1.2	<u>Modelo assintótico.....</u>	30
1.1.3	<u>Modelo de Ebert e Panchal.....</u>	30
1.1.4	<u>Modelo de Ebert e Panchal modificado.....</u>	31
1.1.5	<u>Modelo de Polley.....</u>	31
1.1.6	<u>Modelo de Nars e Givi.....</u>	31
1.2	Ferramentas de otimização.....	32
1.2.1	<u>Otimização da programação das limpezas de trocadores de calor.....</u>	33
1.3	Algoritmos genéticos.....	38
1.3.1	<u>Terminologia.....</u>	40
1.3.2	<u>Passos do algoritmo.....</u>	41
1.4	O presente trabalho em relação ao grupo de pesquisa.....	42
1.5	O presente trabalho em relação à literatura.....	43
2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO PSEUDO-ESTACIONÁRIA DE REDES DE TROCADORES DE CALOR.....	45
2.1	Modelagem dos elementos da rede.....	45
2.1.1	<u>Trocadores de calor.....</u>	45
2.1.2	<u>Misturadores de corrente.....</u>	49
2.1.3	<u>Divisores de corrente.....</u>	50
2.2	A representação da rede.....	51
2.2.1	<u>Representação da rede como um fluxograma de processo.....</u>	51
2.3	Modelo da rede.....	54
2.3.1	<u>Modelo de balanço de massa da rede.....</u>	55
2.3.1.1	Unidades externas.....	56
2.3.1.2	Misturadores.....	56

2.3.1.3	Divisores.....	56
2.3.1.4	Trocadores de calor.....	56
2.3.1.5	Especificações.....	57
2.3.2	<u>Modelo de balanço de energia da rede</u>	57
2.3.2.1	<u>Balanço de energia nas unidades externas</u>	57
2.3.2.2	<u>Equações dos trocadores de calor</u>	57
2.3.2.3	<u>Balanço de energia nos misturadores e divisores</u>	58
2.3.2.4	<u>Especificações</u>	59
2.4	Algoritmos de simulação pseudo-estacionária	59
3	ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO	61
3.1	Descrição geral do problema de otimização da programação das limpezas	61
3.1.1	<u>Formulação do problema de otimização da rede</u>	62
3.1.2	<u>Extensão da formulação do problema</u>	65
3.2	Otimização	66
3.2.1	<u>Metodologia estocástica</u>	66
3.2.1.1	Codificação.....	66
3.2.1.2	Geração da população inicial.....	67
3.2.1.3	Operadores genéticos.....	68
3.2.1.4	Elitismo.....	70
3.2.1.5	Função aptidão.....	70
3.2.1.6	Abordagem do problema estendido.....	70
3.2.2	<u>Metodologia heurística</u>	71
3.2.2.1	Passos da metodologia heurística.....	71
3.2.2.2	Conjunto de movimentos zero.....	71
3.2.2.3	Conjunto de movimentos um.....	72
3.2.2.4	Conjunto de movimentos dois.....	73
3.2.2.5	Estrutura geral do algoritmo.....	76
3.2.2.6	Gerenciamento das restrições.....	77
3.2.3	<u>Metodologia híbrida</u>	77
4	RESULTADOS	79
4.1	Casos investigados	79
4.2	Metodologia estocástica	80

4.2.1	<u>Calibração de parâmetros</u>	80
4.2.1.1	Probabilidade de <i>crossover</i>	80
4.2.1.2	Probabilidade de mutação.....	81
4.2.1.3	Tamanho da população.....	82
4.2.1.4	Parâmetro de controle da população inicial (<i>limpop</i>).....	83
4.2.1.5	Elitismo.....	85
4.2.1.6	Parâmetros calibrados.....	87
4.3	Metodologia heurística	88
4.3.1	<u>Análise da sequência dos conjuntos de movimentos</u>	88
4.3.2	<u>Ordenação dos trocadores de calor</u>	90
4.3.3	<u>Alternativa heurística investigada</u>	92
4.4	Metodologia híbrida	94
4.5	Comparação de metodologias	98
4.6	Análise do comportamento da solução	100
4.6.1	<u>Influência das resistências iniciais de depósito</u>	101
4.6.2	<u>Influência da taxa</u>	103
4.6.3	<u>Influência do custo das paradas</u>	104
4.6.4	<u>Análise do comportamento da solução para um problema de grande porte</u>	105
4.7	Gerenciamento das restrições	108
4.8	Comparações com a literatura	111
4.8.1	<u>Caso base 1</u>	112
4.8.2	<u>Caso base 4</u>	114
4.8.3	<u>Caso base 5</u>	116
4.8.4	<u>Caso base 6</u>	118
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	122
	Abordagem estocástica	122
	Abordagem heurística	123
	Abordagem híbrida	123
	Análise comparativa	124
	Comparações com a literatura	124
	Conclusão geral	124
	Sugestões	125
	REFERÊNCIAS	126

ANEXO A: PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	132
ANEXO B: CASOS INVESTIGADOS.....	136
B.1 Caso 1.....	136
B.2 Caso 2.....	138
B.3 Caso 3.....	140
B.3.1 Caso 3.1.....	146
B.3.2 Caso 3.2.....	147
B.4 Caso 4.....	148
B.5 Caso 5.....	151
B.6 Caso 6.....	153

INTRODUÇÃO

Devido à crise econômica mundial e às preocupações com a sustentabilidade ambiental, esforços significativos têm sido feitos atualmente a fim de se utilizarem de forma correta e eficiente os recursos energéticos disponíveis. Dessa forma, tem-se buscado a redução da quantidade de energia utilizada nas indústrias de processo.

Nas indústrias de processos químicos coexiste uma grande quantidade de correntes, incluindo matérias primas, correntes intermediárias, produtos finais, subprodutos e utilidades quentes e frias. As utilidades são geradas utilizando-se sistemas externos ao processo e envolvem o consumo de energia.

No decorrer do processo industrial, há correntes quentes que precisam ser resfriadas, e correntes frias que necessitam ser aquecidas. Com o intuito de minimizar o consumo de utilidades, é possível promover a transferência de calor entre correntes de processo através de um sistema de integração energética.

Comumente, empregam-se nesses processos vários trocadores de calor interligados estabelecendo assim uma rede de trocadores de calor que será responsável por promover a integração energética entre as correntes do processo. A diminuição do consumo de utilidades também é vantajosa do ponto de vista ambiental, já que o calor rejeitado em um processo não somente representa desperdício de combustível, mas significa que mais poluição está sendo gerada.

As pesquisas relativas à integração energética de redes de trocadores de calor se intensificaram com as crises do petróleo. Diversas abordagens foram desenvolvidas e publicadas, indo desde técnicas intuitivas até as mais sofisticadas (FURMAN e SAHINIDIS, 2002).

A aplicação de tais tecnologias no início de um projeto ou em indústrias já instaladas traz diversas vantagens e segundo Kemp (2007) as economias em utilidades podem chegar a 60% dos gastos originais, em casos nos quais não foram empregadas técnica alguma de integração de processos.

Uma importante utilização das redes de trocadores de calor ocorre como bateria de pré-aquecimento no refino do petróleo, pois a carga que alimenta a coluna de destilação atmosférica deve ter uma temperatura de aproximadamente 380 °C. Assim, a fim de se reduzir o consumo de energia, a corrente de petróleo bruto que chega na coluna atmosférica é pré-aquecida com as correntes quentes efluentes da coluna. No entanto, esse pré-aquecimento não é capaz de chegar a temperaturas tão elevadas, quanto requeridas pela coluna, sendo necessário como aquecimento adicional um forno (PANCHAL e HUANGFLU, 2000).

Por exemplo, a despeito do grande número de trabalhos a respeito do projeto de redes de trocadores, estes sistemas também implicam em importantes desafios operacionais. Na medida em que as redes de trocadores de calor são utilizadas, frequentemente ocorre o fenômeno da deposição. A deposição corresponde ao acúmulo de materiais indesejados provenientes do fluido que escoam no interior de trocadores de calor ao longo do seu tempo de operação.

Esse é um grande problema presente nas indústrias de processo, pois as incrustações nos trocadores de calor reduzem a efetividade térmica dos trocadores e aumentam a queda de pressão, aumentando o consumo de energia e os custos de operação (SMAÏLI et al., 2002a). Além disso, a deposição pode dificultar o escoamento das correntes no interior do equipamento térmico.

A ocorrência de incrustação leva também a perdas econômicas devido ao seu impacto direto no investimento, no custo operacional e no desempenho do trocador de calor. Em um estudo apresentado por Bailey (1999), a indústria de refino de petróleo dos Estados Unidos gastava 2 bilhões de dólares por ano com problemas associados à incrustação.

Nas redes de trocadores de calor, a fim de o serviço térmico total não ser interrompido para limpeza de um ou poucos trocadores da rede, é possível instalar correntes de *by-pass* onde somente as correntes relativas àquele trocador que será limpo são desviadas.

Assim, é possível estabelecer uma programação das limpezas dos trocadores de calor durante um determinado horizonte de tempo. No entanto, este tipo de abordagem ocasiona uma situação de conflito (*tradeoff*): a limpeza de um trocador de calor pode recuperar a sua

eficiência térmica, mas implica custos adicionais, tais como, mão de obra, produtos químicos, etc.

Contudo identificar o tempo adequado (período ótimo) para limpeza de cada trocador de calor não é uma tarefa trivial, pois o número de trocadores de calor em uma rede pode ser bem elevado, bem como a taxa de crescimento diferenciada da incrustação e o comportamento interdependente destes equipamentos. Todos esses fatores dificultam a tarefa de limpeza e também existe a dificuldade de prever a perda de desempenho dos trocadores.

O presente trabalho

Nesse contexto, por ser a programação da limpeza de trocadores um problema de elevada complexidade e importância nas indústrias de processo, o presente trabalho investiga a otimização das paradas para limpeza de redes de trocadores de calor abordando três técnicas diferentes: uma abordagem estocástica baseada no algoritmo genético, uma abordagem heurística desenvolvida e uma abordagem híbrida.

Estes algoritmos de otimização são acoplados a rotinas de simulação pseudo-estacionária da rede, onde a partir dos balanços de massa e energia é possível calcular as vazões e as temperaturas das correntes da rede de troca térmica ao longo do tempo de campanha.

A modelagem, a simulação e a otimização com ambas as abordagens estudadas foram desenvolvidas em rotinas computacionais no *software* Scilab 5.3.3 e podem ser utilizadas em qualquer rede de trocadores de calor.

Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é:

⇒ Desenvolver técnicas adequadas de otimização da programação das paradas para limpeza de redes de trocadores de calor.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

⇒ Explorar a eficiência de uma metodologia estocástica (algoritmos genéticos) para o problema da otimização das limpezas de redes de trocadores de calor.

⇒ Propor uma nova metodologia heurística específica para o problema de otimização de paradas para limpeza.

⇒ Analisar a eficácia de uma metodologia híbrida com diferentes combinações da metodologia estocástica e heurística para o problema em questão.

Estrutura da dissertação

Este trabalho é apresentado em 4 capítulos e sua estrutura está organizada da seguinte forma: o Capítulo 1 descreve a revisão da literatura pertinente à dissertação; o Capítulo 2 contém a modelagem e simulação da rede; no Capítulo 3 encontra-se a descrição das três estratégias de otimização utilizadas; e os resultados relativos a ambas abordagens de otimização utilizadas estão presentes no Capítulo 4.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica da literatura será feita abordando os seguintes assuntos: a natureza do problema de deposição, a programação das limpezas de trocadores de calor utilizando ferramentas de otimização e os algoritmos genéticos.

1.1 Deposição

A deposição corresponde ao acúmulo indesejado de materiais na superfície de troca térmica dos equipamentos térmicos. De acordo com Bott (1995), ela pode se originar devido a diversos mecanismos como: cristalização, sedimentação, reações químicas, corrosão, contaminação biológica e congelamento.

A incrustação por cristalização se dá pela precipitação e pela deposição de sais inorgânicos dissolvidos em condições de supersaturação na superfície de transferência de calor. A supersaturação pode ser causada pelos seguintes processos: pela evaporação do solvente; pelo arrefecimento abaixo do limite de solubilidade para solução com solubilidade normal; pelo aquecimento acima do limite de solubilidade para solução com solubilidade reversa; pela mistura de fluxos com composições diferentes e pela variação do pH que afeta a solubilidade do gás carbônico em água (KAKAÇ e LIU, 2002).

A deposição originada por sedimentação corresponde à deposição de partículas suspensas como argila, óxidos, areias, etc. Neste mecanismo, tem-se grande influência da geometria, pois a deposição se dá pela atuação da força da gravidade. Todavia, esse mecanismo de deposição não é verificado de forma aguçada quando a velocidade de escoamento é alta (BOTT, 1995).

Outro mecanismo de incrustação é aquele no qual ocorrem reações químicas na corrente em escoamento. As principais reações químicas envolvidas nesse mecanismo são a polimerização e a oxidação. Como resultado, tem-se produtos que formam uma camada

insolúvel e de difícil remoção. Este mecanismo não é exclusivo das refinarias: indústrias químicas e de alimentos também podem ter este tipo de problema.

A deposição devido à corrosão pode ser iniciada pela presença de impurezas. Esse mecanismo é representado pela deterioração e perda de material em um ponto da tubulação seguida pela deposição desse material em outro ponto. Apesar da resistência térmica das camadas de corrosão ser geralmente baixa, o aumento da rugosidade da superfície de troca térmica devido à corrosão pode promover incrustações devido a outros mecanismos de deposição (STEINHAGEN, 2010).

De forma distinta, a incrustação biológica em uma superfície de transferência de calor refere-se à deposição e/ou o crescimento de material de origem biológica. Esse material pode ser oriundo de microorganismos (por exemplo, bactérias, algas e fungos) e de seus produtos e a incrustação resultante é conhecida como contaminação microbiana. A incrustação microbiana sempre precede a proliferação de macro-organismos, com os micro-organismos atuando como fonte de nutrientes para os macro-organismos. Muitas vezes as suspensões de algas e outras fibras orgânicas causam a deposição (KAKAÇ e LIU, 2002).

Diferentemente dos outros mecanismos, quando um líquido flui em contato com uma parede que está abaixo do ponto de congelamento do líquido, é provável que ocorra o congelamento do líquido e a presença desta camada sólida constitui uma resistência para o líquido que escoar por essa superfície, assim denomina-se esse mecanismo de deposição por congelamento (BOTT, 1995).

Por fim, é importante observar que a deposição também pode ocorrer devido a vários fenômenos simultaneamente, sendo reforçado mutuamente o efeito de cada tipo de deposição. Uma exceção é a combinação do mecanismo de cristalização e do mecanismo de sedimentação de partículas, onde pode ocorrer a aceleração da deposição das partículas da cristalização, enquanto ocorre uma redução da deposição das partículas da sedimentação devido a um enfraquecimento da estrutura do depósito (STEINHAGEN, 2010).

Devido à diversidade de fatores geradores, à combinação de mecanismos de incrustação e à sua complexidade, a deposição é considerada um grande problema dentro dos processos de transferência de calor.

De acordo com Steinhagen (2010), estudos comparativos em uma série de indústrias demonstraram que, em geral, a deposição aumenta linearmente com a elevação da concentração *bulk* do fluido, diminui com o aumento da tensão de cisalhamento nas paredes do tubo, aumenta com a elevação da temperatura, bem como aumenta com uma maior rugosidade da superfície de troca térmica. Pode-se observar que a incrustação interfere de forma significativa no coeficiente global de troca térmica e na taxa de transferência de calor dos equipamentos térmicos.

A incrustação em equipamentos térmicos corresponde a um custo adicional para o processo. Esse custo adicional é devido ao aumento das despesas de capital, a um aumento dos custos de manutenção, a perda de produção e as perdas de energia.

A fim de compensar as incrustações, utiliza-se uma área maior de transferência de calor. As bombas e ventiladores são superdimensionados a fim de compensar o aumento da queda de pressão resultante de uma redução na área de fluxo. Trocadores de calor em paralelo são instalados a fim de assegurar um funcionamento contínuo caso um trocador sofra algum dano. Materiais de alto custo, como titânio, aço inoxidável ou grafite podem ser necessários para certas situações incrustantes. Todos esses itens contribuem para aumentar as despesas de capital (KAKAÇ e LIU, 2002).

A limpeza de trocadores representa custos de manutenção. A incrustação aumenta o tempo da programação das limpezas levando a necessidade de manutenção e reparação de equipamentos. A perda de produção por causa da capacidade reduzida de operação ou do tempo de inatividade podem representar custos. Finalmente, as perdas de energia, devido à redução na transferência de calor e ao aumento das necessidades de energia de bombeamento pode ser um importante contribuinte para a elevação de custos devido à incrustação (KAKAÇ e LIU, 2002).

Particularmente, em relação ao aquecimento de correntes de óleo cru, as principais fontes de deposição são provenientes de produtos de reações orgânicas; impurezas presentes no petróleo bruto como produtos de corrosão, água e sais (cloretos de cálcio, cloreto de sódio e cloreto de magnésio); precipitação de resinas e asfaltenos, bem como compostos sulfurados solúveis. Nesse caso, a deposição nas baterias de pré-aquecimento de petróleo cru interfere

significativamente na temperatura da corrente final da bateria, o que aumenta o consumo de combustível nos fornos (WATKINSON, 2005).

Como solução para tais problemas relacionados às incrustações, a literatura apresenta várias abordagens para a sua mitigação como: monitoramento das incrustações em redes de trocadores de calor (JERÓNIMO et al., 1997; LIPORACE e OLIVEIRA, 2007), análise do impacto da incrustação nos problemas de projeto/*retrofit* (WILSON et al., 2002; YEAP et al., 2005) e programação das limpezas (SMAÏLI et al., 2001a; SMAÏLI et al., 2002a).

Outra importante ferramenta para o gerenciamento da deposição consiste no desenvolvimento de modelos para a predição da deposição ao longo do tempo (POLLEY et al., 2005; PANCHAL e HUANGFLU, 2000; NASR E GIVI, 2006). Na literatura, as taxas de deposição, que correspondem à derivada da resistência do depósito em relação ao tempo ($dR_f/d\tau$), podem ser modeladas de acordo com diversos modelos de deposição. Tais modelos são uma forma de lidar com o problema da deposição, uma vez que possibilitam prever a evolução da deposição durante a operação. A seguir serão apresentados alguns modelos empíricos (por exemplo, linear e assintótico) e semi-empíricos (por exemplo, Ebert Panchal, Ebert Panchal modificado, Polley e Nars & Givi) para predição da deposição. Os valores dos parâmetros dos modelos semi-empíricos correspondem àqueles reportados nas referências originais. Assim, destaca-se que os valores desses parâmetros dependem da natureza do óleo cru considerado.

1.1.1 Modelo linear

O modelo empírico de deposição linear é um dos mais simples e comumente utilizado. Esse modelo é representado pela equação a seguir (McCABE e ROBINSON apud KAKAÇ e LIU, 2002):

$$\frac{dR_f}{d\tau} = c \quad (1.1)$$

onde c é uma constante específica para cada trocador de calor e τ é o tempo decorrido desde a última limpeza.

1.1.2 Modelo assintótico

O modelo assintótico é representado pela seguinte equação (KERN e SEATON apud KAKAÇ e LIU, 2002):

$$\frac{dR_f}{d\tau} = R_f^\infty e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (1.2)$$

onde τ é o tempo decorrido desde a última limpeza, R_f^∞ é a resistência de depósito assintótica e T é a constante de tempo da deposição.

1.1.3 Modelo de Ebert e Panchal

O modelo semi-empírico de Ebert e Panchal (1995) é baseado no conceito de fronteira de deposição (“*fouling threshold*”), onde a taxa de deposição pode ser obtida pela subtração entre dois termos, um correspondente à formação da deposição (positivo) e outro correspondente à supressão da deposição (negativo). O termo de formação da deposição depende do número de Reynolds, da energia de ativação e da temperatura de filme, enquanto o termo de supressão da deposição depende da tensão de cisalhamento. Este modelo é representado pela equação a seguir:

$$\frac{dR_f}{d\tau} = \alpha Re^\beta e^{\frac{-E_a}{RT_f}} - \gamma \tau_w \quad (1.3)$$

onde os valores dos parâmetros α , β , γ e E_a dependem de cada óleo, Re corresponde ao número de Reynolds, R corresponde à constante universal dos gases, T_f é a temperatura de filme e τ_w é a tensão de cisalhamento na parede.

1.1.4 Modelo de Ebert e Panchal modificado

Uma versão modificada do modelo de Ebert e Panchal (1995) foi proposta por Panchal et al. (1999). A modificação realizada consiste na inserção do número de Prandtl no termo de evolução da deposição, sendo denominado de modelo semi-empírico de Ebert e Panchal modificado, representado pela equação abaixo:

$$\frac{dR_f}{d\tau} = \alpha \text{Re}^{-0,66} \text{Pr}^{-0,33} e^{\left(\frac{-E_a}{RT_f}\right)} - \gamma \tau_w \quad (1.4)$$

onde Pr é o número de Prandtl.

1.1.5 Modelo de Polley

Polley et al. (2002) propuseram que o modelo de Ebert e Panchal seria melhor representado substituindo a temperatura de filme e a tensão de cisalhamento pela temperatura da parede e pelo número de Reynolds, respectivamente. Com essas alterações, o modelo semi-empírico de Polley fica representado pela equação abaixo:

$$\frac{dR_f}{d\tau} = \alpha \text{Re}^{-0,8} \text{Pr}^{-0,33} e^{\left(\frac{-E_a}{RT_w}\right)} - \gamma \text{Re}^{0,8} \quad (1.5)$$

1.1.6 Modelo de Nars e Givi

Um modelo semi-empírico mais recente foi proposto por Nars e Givi (2006). Este modelo é baseado no modelo de Ebert e Panchal original, cuja alteração consiste na

substituição da tensão de cisalhamento pelo número de Reynolds, sendo representado pela equação a seguir:

$$\frac{dR_f}{d\tau} = \alpha \text{Re}^\beta e^{\left(\frac{-E_a}{RT_f}\right)} - \gamma \text{Re}^{0,4} \quad (1.6)$$

Dentre os modelos dinâmicos de deposição apresentados é recomendado o emprego daquele que melhor descrever o comportamento da deposição através da análise de dados. Ou seja, em um procedimento de estimação de parâmetro o que apresentar um menor erro associado. A partir deste modelo de deposição representativo, é possível a realização de uma análise mais criteriosa para a escolha de um método de controle/mitigação da deposição (KAKAÇ e LIU, 2002).

1.2 Ferramentas de otimização

Otimização consiste na utilização de métodos específicos que busquem a melhor solução possível para um sistema em relação a um conjunto de soluções possíveis. Uma grande variedade de problemas no que se refere a concepção, construção, operação e análise de plantas químicas, bem como outros processos industriais, podem ser resolvidos através da otimização (EDGAR et al., 2001).

Os problemas típicos de processo em engenharia química relativos a projeto ou operação da planta possuem um grande número, normalmente infinito, de soluções e por isso a otimização busca selecionar o melhor entre todo o conjunto de soluções. A fim de se encontrar tal solução ótima de forma ágil, utilizam-se algoritmos matemáticos computacionais de acordo com cada sistema (EDGAR et al., 2001).

Uma importante aplicação da otimização no gerenciamento da deposição corresponde à otimização da distribuição das vazões como feito em Oliveira Filho et al. (2009) que realiza a otimização térmica de redes de trocadores de calor. Neste trabalho, a solução ótima corresponde a uma temperatura máxima ao final da bateria com o conjunto de divisores de corrente dos fluidos quente e frio ao longo da rede. Dessa forma, o consumo de energia pode

ser reduzido através da otimização das vazões ao longo de diferentes ramos da bateria de pré-aquecimento para manter a rentabilidade do processo.

Outra possível utilização da otimização no gerenciamento da deposição é na programação das paradas para limpezas de redes de trocadores de calor, foco deste trabalho, e que será mais bem detalhado a seguir.

1.2.1 Otimização da programação das limpezas de trocadores de calor

Na Figura 1, encontram-se dois exemplos explicativos de programação das paradas para limpeza de redes de trocadores de calor.

(a)

Trocador/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1			■							■		
2					■							
3				■					■			

(b)

Trocador/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1					■					■		
2		■										
3						■				■		
4			■									
5								■				
6						■				■		
7					■					■		
8		■						■				
9						■						
10										■		

Figura 1– Exemplos de programações de parada de trocadores de calor: (a) Rede de 3 trocadores de calor; (b) rede de 10 trocadores de calor.

Como visto na Figura 1 acima, os exemplos se referem a uma rede que contém três trocadores de calor e a uma rede que contém dez trocadores de calor para uma programação de doze meses de duração. Uma vez que cada marcação em preto representa uma parada para

limpeza, pode-se observar que a programação ótima da rede de 3 trocadores contém cinco paradas ao longo dos doze meses enquanto a rede de 10 trocadores contém dezesseis paradas ao longo dos doze meses. Dessa forma, com o desvio de fluxo nos trocadores, é possível fazer a limpeza dos trocadores de acordo com a necessidade de cada trocador em cada período sem haver a parada total da rede. A literatura apresenta diversas formas de resolução do problema de otimização da limpeza de trocadores.

Smaïli et al. (2001a) propuseram a otimização utilizando uma formulação de Programação Não Linear Inteira Mista (MINLP) para a programação das paradas em baterias de pré-aquecimento (BPA). Foram adotados modelos de taxa de deposição puramente empíricos como o linear e o assintótico. A função objetivo nesse trabalho é composta por um termo proporcional à integral da carga térmica no forno somado com os custos associados a cada parada realizada. São também citados, mas não explorados, termos adicionais relativos à perda de produção durante a campanha e a custos de manutenção dependentes do tempo, tais como a necessidade da substituição dos tubos do forno.

As variáveis contínuas utilizadas em Smaïli et al. (2001a) foram: temperaturas, coeficientes globais de transferência de calor e queda de pressão; e a variável binária utilizada foi a indicação se o trocador está parado para limpeza ou não. Algumas restrições utilizadas foram: com base no método da efetividade, a relação entre as temperaturas de entrada e saída das correntes em cada trocador; limites superior e inferior em determinadas temperaturas (por exemplo, faixas de operação da dessalgadora, valores máximos de temperatura de saída de certas correntes quentes); restrições associadas a paradas em diferentes equipamentos ou em diferentes instantes de tempo.

A resolução do problema MINLP em Smaïli et al. (2001a) apresentou um aspecto importante do problema, a multiplicidade de ótimos locais. Para lidar com este obstáculo, os autores propuseram o acionamento do algoritmo de resolução repetidas vezes (10 a 50) com diferentes estimativas iniciais. Foi também empregado um algoritmo do tipo *greedy* a fim de se ter uma alternativa comparativa para a programação das paradas, onde para cada instante de tempo foi potencialmente selecionado o trocador para limpeza que trouxesse o maior ganho dentro de um determinado horizonte limitado. Caso o ganho projetado fosse inferior a um limiar mínimo, a alternativa seria descartada, caso contrário, a limpeza seria aplicada. A

análise dos resultados da otimização permitiu observar que as soluções obtidas não preveem paradas próximas ao início da campanha ou próximas ao final da campanha.

Smaïli et al. (2001b) apresentaram uma revisão dos resultados obtidos na otimização das paradas em redes de trocadores de calor no contexto de um projeto desenvolvido pelos autores com diversas empresas inglesas. Com relação ao comportamento do sistema, a deposição afeta de forma não-linear tanto a taxa de transferência de calor quanto a queda de pressão dos equipamentos de troca térmica. A função objetivo foi composta por um conjunto de termos como: custo da energia ao longo do tempo, custo de manutenção ao longo do tempo, custo de oportunidade e custo da limpeza.

As restrições, em Smaïli et al. (2001b), foram empregadas na formulação do problema a fim de garantir que a solução otimizada fosse viável na prática e a fim de se reduzir o espaço de busca, acelerando assim a convergência. De forma genérica, as restrições foram: restrições operacionais gerais (por exemplo, limites de queda de pressão e temperatura máxima), restrições operacionais complexas (por exemplo, descrição do refluxo circulante - *pumparound*, limites de capacidade do forno), restrições do gerenciamento das paradas e restrições numéricas (por exemplo, introdução de restrições para evitar múltiplas soluções idênticas como no caso de trocadores em paralelo). Adicionalmente, os autores avaliaram que a representação do comportamento dinâmico dos depósitos (função da velocidade de escoamento, temperatura, etc.) seria potencialmente interessante, embora justificando o uso dos modelos empíricos adotados (onde a taxa não depende de nenhuma variável operacional) em função das limitações dos métodos de otimização e da inacurácia dos modelos de taxa de deposição frente às demais incertezas presentes. Visando à resolução do problema de otimização resultante, os autores listaram uma série de alternativas como métodos puramente heurísticos, métodos de horizonte flutuante e métodos de horizonte total através de técnicas de programação matemática ou de técnicas de otimização estocástica.

Como uma visão geral, o trabalho Smaïli et al. (2001b) indica que a abordagem de horizonte total via método MINLP alcança melhores soluções que a abordagem horizonte flutuante. Entretanto, como as diferenças não são grandes e considerando-se as incertezas nos parâmetros do modelo, talvez se deva optar pela robustez oferecida pelos métodos de horizonte móvel.

Smaïli et al. (2002a) propuseram a otimização da programação das paradas para limpeza de trocadores, tendo utilizado a mesma abordagem utilizada em Smaïli et al. (2001a).

Outro trabalho relacionado à otimização das paradas foi Smaïli et al. (2002b) no qual é feita a comparação do desempenho de um método de otimização estocástico com a abordagem via programação matemática para a resolução do problema formulado em Smaïli et al. (2001a). O método estocástico explorado denomina-se *Backtracking Threshold Accepting* (BTA) que é um aperfeiçoamento do método *Threshold Accepting* (TA), uma variante do método *Simulated Annealing* (SA). Em relação às restrições, foram incluídas apenas aquelas associadas a imposições operacionais descritas unicamente através de variáveis binárias. Neste caso, os testes realizados com o método estocástico proposto não incluíram restrições nas variáveis contínuas, tornando assim o problema bem mais fácil de ser resolvido por este tipo de algoritmo.

A comparação de ambas abordagens em Smaïli et al. (2002b) utilizou dois exemplos. Em ambos os exemplos foram alcançados resultados equivalentes em termos da função objetivo, embora com diferentes propostas de paradas para limpeza, em função da multiplicidade de ótimos locais. No caso do exemplo de maior tamanho, não foi possível resolvê-lo através da abordagem via programação matemática no horizonte de 36 meses.

A proposta de Lavaja e Bagajewicz (2004) envolveu a reformulação das equações originais propostas por Smaïli et al. (2001a) resultando em um problema de Programação Linear Inteira Mista (MILP) ao invés da estrutura MINLP original. Devido ao tamanho do modelo MILP resultante, a sua resolução integral não é possível e por isso os autores propõem como alternativa um procedimento de decomposição. Os autores apresentam comparações da abordagem proposta com a abordagem MINLP e a abordagem *greedy*, ambas discutidas em Smaïli et al. (2001a). De acordo com os autores, os resultados obtidos são superiores aqueles registrados em Smaïli et al. (2001a).

Lavaja e Bagajewicz (2005a) corresponde a uma extensão de Lavaja e Bagajewicz (2004), onde os autores incluem duas novas alternativas exploratórias: a análise do problema com a troca de crus e a análise do problema incluindo a restrição relativa à carga máxima do forno e a possibilidade de levar em conta a opção de redução de carga.

Também como extensão de Lavaja e Bagajewicz (2004), Lavaja e Bagajewicz (2005b) exploraram neste trabalho questões associadas a incertezas nos parâmetros do modelo de otimização como: custo da energia, modelo de deposição e perfil dos crus processados.

Uma extensão da abordagem utilizada em Smaïli et al. (2001a) foi realizada por Rodriguez e Smith (2007) no qual além das paradas para limpeza, também foram incluídas na otimização alterações nas vazões de *by-pass* de correntes quentes. Dessa forma, pode-se durante a busca reduzir a temperatura da parede de trocadores de forma a limitar a taxa de deposição. Entretanto, este procedimento deve ser otimizado, pois a vazão de *by-pass* implica também em uma redução da recuperação de energia no instante considerado. Utilizou-se o método *simulated annealing* (SA) para resolução do problema de otimização proposto. Os resultados obtidos indicaram que a otimização dos *by-passes* juntamente com as paradas permitiu alcançar uma maior redução de custos quando comparados com a otimização apenas das paradas.

Ishiyama et al. (2009a) analisaram uma abordagem termo-hidráulica para a otimização operacional de baterias de pré-aquecimento. Os autores criticaram as abordagens baseadas em programação matemática devido à necessidade de simplificações em relação a determinados aspectos importantes do problema, limitando assim a utilidade da solução obtida. Adicionalmente, as formulações apresentadas contém uma série de ótimos locais. Em função deste cenário, os autores recomendam a utilização de técnicas heurísticas mais robustas capazes também de descrever aspectos mais complexos da modelagem.

Quanto a modelagem do impacto térmico e hidráulico da deposição, os autores de Ishiyama et al. (2009a) apresentaram equações referentes ao impacto térmico e hidráulico da deposição de acordo com artigos anteriores (YEAP et al., 2004; ISHIYAMA et al., 2008). Estes resultados são comparados entre si indicando que a condutividade térmica do depósito passa a ser um parâmetro chave para identificar qual será o efeito limitante, térmico ou hidráulico, durante a operação da bateria de pré-aquecimento (BPA). As rotinas de descrição termo-hidráulico da deposição foram embutidas em um simulador de BPA. Desta forma, o comportamento termo-hidráulico dinâmico da rede é representado através de uma abordagem pseudo-estacionária. A otimização da rede se faz através de um procedimento heurístico baseado na análise de qual seria o melhor trocador para ser limpo em um determinado instante de acordo com um dado horizonte móvel.

Ishiyama et al. (2009b) fazem uma exploração mais detalhada do que Ishiyama et al. (2009a) utilizando o modelo de deposição de Polley et al. (2002). Os autores apresentaram um simulador de baterias de pré-aquecimento implementado em softwares como Matlab e Excel, que contém um conjunto abrangente da dinâmica da rede (desempenho térmico e hidráulico). O simulador foi testado em uma série de estudos de caso escolhidos para incluir situações práticas da refinaria e tendo sido combinado com uma versão modificada do algoritmo *greedy* para avaliar programações de limpeza ótimas, incorporando ações de controle. Os autores demonstraram como o código de simulação da rede é capaz de incorporar no dia-a-dia de plantas industriais características operacionais, tais como o uso de anti-incrustantes, planejamento para programação da limpeza de trocadores de calor e *revamps*.

Ishiyama et al. (2010) também estudaram uma extensão de Ishiyama et al. (2009a) incluindo um termo de penalidade relativo à faixa de operação ótima da dessalgadora e um *by-pass* para tentar manter a temperatura desejada a montante da dessalgadora. Foi explorado como a programação e o controle da temperatura podem ser combinados em uma simulação de baterias de pré-aquecimento a fim de ajudar o gerenciamento da deposição, para o caso particular de uma dessalgadora.

Com relação à programação das limpezas, para Ishiyama et al. (2010) a limpeza da bateria de pré-aquecimento incide em uma penalidade inicial em termos de transferência de calor e operacionalidade da rede, em troca de um ganho de longo prazo. A otimização utiliza o algoritmo *greedy*, que considera as ações de limpeza em um período atual e o impacto dessa ação ao longo de um horizonte móvel.

1.3 Algoritmos genéticos

Em função da sua utilização como uma das abordagens de otimização investigadas neste trabalho, esta subseção contém uma breve descrição dos fundamentos do algoritmo genético.

Os algoritmos genéticos correspondem a um tipo de algoritmo estocástico, que possui aplicações em uma variedade enorme de problemas de otimização. Esse algoritmo é um ramo dos algoritmos evolucionários e como tal pode ser definido como uma técnica de busca baseada em uma metáfora do processo biológico de evolução natural (LINDEN, 2008).

Uma das primeiras referências aos algoritmos genéticos foi feita por John Holland em 1975, utilizando conceitos inspirados em evolução biológica, tais como hereditariedade, seleção natural, recombinação (ou *crossing over*) e mutação. Ao longo de muitas gerações, as populações evoluíram de acordo com o princípio da seleção natural e da sobrevivência do mais adaptado, e é através da simulação desse processo que os algoritmos genéticos puderam desenvolver soluções para problemas reais, sendo eles devidamente codificados (WHITLEY, 1994; DALLAGNOL et al., 2009).

De acordo com Whitley (1994), algoritmos genéticos são uma família de modelos computacionais inspirados pela evolução, vistos como otimizadores de funções, que têm como finalidade codificar uma solução potencial para um problema específico e aplicá-los aos operadores de recombinação de modo a preservar as informações críticas. Os algoritmos genéticos usam uma analogia ligada ao comportamento natural das espécies, onde o membro da população que menos se adequou ao ambiente terá menos chances de ser selecionado para reprodução. Uma nova população de possíveis soluções será produzida, através da seleção dos melhores indivíduos da geração atual para se acasalarem. Esta nova geração, por sua vez, terá a maior proporção das características de seus pais, que eram os melhores membros da geração anterior. Desta forma, percebe-se que as características boas se espalharão por toda a população e ainda serão misturadas e mudadas por outras novas e melhores características conforme as gerações evoluem.

As principais diferenças dos algoritmos genéticos em relação aos algoritmos tradicionais são: eles se baseiam em uma codificação do conjunto de parâmetros, não nos próprios parâmetros de otimização em si; os resultados são apresentados como uma população de solução e não como um único ponto; não necessitam de nenhum conhecimento derivado do problema ou outro conhecimento auxiliar, apenas de uma forma de avaliação do resultado; usam regras de transições probabilísticas e não regras determinísticas (GOLDBERG, 1989).

O propósito de um algoritmo genético não é simplesmente avaliar ou melhorar uma única solução (ou indivíduo), mas sim analisar e modificar uma série de soluções simultaneamente. Apesar de possuir algumas limitações, tais como possibilidade de convergência prematura, dependência do controle de parâmetros e a dificuldade de encontrar um critério de parada eficiente, os algoritmos genéticos têm sido estudados intensivamente e aplicados em várias áreas distintas (LINDEN, 2008).

1.3.1 Terminologia

Os algoritmos genéticos utilizam vários termos da genética, com a qual mantêm conceitos análogos. Os principais termos segundo Haupt e Haupt (2004) são:

- População: conjunto de indivíduos que interagem entre si;
- Cromossomo: conjunto de parâmetros ou genes. Cada cromossomo representa uma solução do problema. Muitas vezes é tomado como sinônimo de indivíduo;
- Gene: codificação binária de um parâmetro. Uma unidade de hereditariedade que é transmitida no cromossomo e controla o desenvolvimento de uma característica;
- Cruzamento (ou *crossover*): operador genético que forma um novo cromossomo a partir de dois cromossomos pais combinando parte das informações de cada um;
- Mutação: operador genético que altera aleatoriamente os valores de genes num cromossomo pai;
- Seleção natural: processo que elimina os indivíduos menos adaptados (ou aptos) em relação à cada geração da população, passando sua informação genética para seus descendentes;
- Geração: uma iteração do algoritmo genético;
- Aptidão (ou *fitness*): está diretamente ligado à função objetivo do problema. Valor associado a um cromossomo que atribui seu mérito relativo.

1.3.2 Passos do algoritmo

Primeiramente, o primeiro ciclo do algoritmo é determinado pelo processo de criação de indivíduos formando a população inicial. Normalmente, a população inicial é formada a partir de indivíduos aleatoriamente criados. Populações iniciais aleatórias podem ser semeadas com bons cromossomos para uma evolução mais rápida, quando se conhece o valor de boas “sementes” (PACHECO, 1999).

Em seguida, é criada uma nova geração através dos operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação. A evolução se inicia a partir de um conjunto de soluções e é realizada por meio de gerações. A cada geração, a aptidão de cada solução na população é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinados ou mutados para formar uma nova população mais apta. Assim é feita a seleção dos cromossomos melhores adaptados para a próxima geração com a eliminação dos menos adaptados e com a substituição dos indivíduos eliminados por novos indivíduos.

Por fim, o funcionamento do algoritmo genético se dá pelo critério de parada que, caso não seja atendido, retorna a gerar nova população e, caso seja atendido, o algoritmo é finalizado. Assim, um algoritmo genético pode ser descrito como um processo contínuo que repete ciclos de evolução controlados por um critério de parada (PACHECO, 1999).

Na Figura 2 encontra-se, de forma resumida, a estrutura de um algoritmo genético típico.

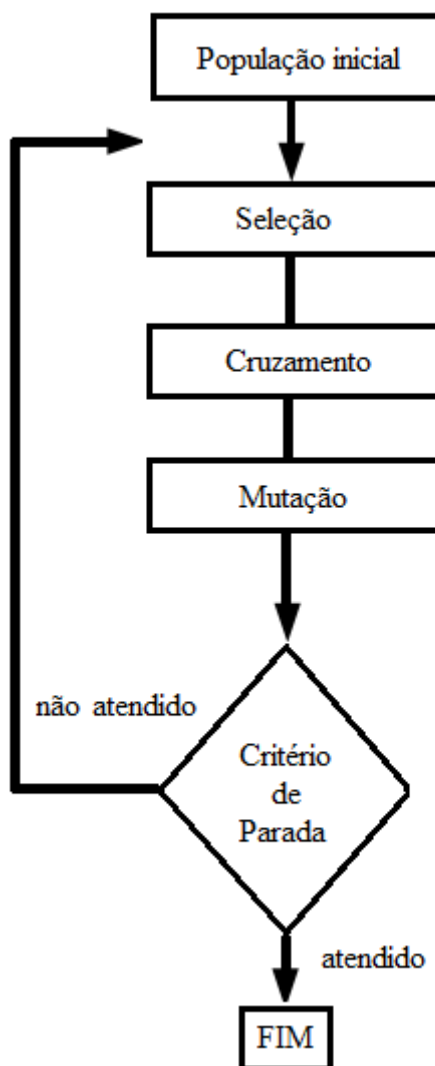


Figura 1 – Estrutura de um algoritmo genético típico.

1.4 O presente trabalho em relação ao grupo de pesquisa

A presente dissertação está inserida em uma sequência de trabalhos em desenvolvimento, no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UERJ, voltados para o gerenciamento da deposição. Nos próximos parágrafos são apresentados alguns exemplos de trabalhos já publicados.

Oliveira Filho (2007) apresentou a proposição de um modelo para simulação de redes de trocadores de calor com aplicações no gerenciamento da deposição. Neste trabalho foi desenvolvido um conjunto de códigos computacionais integrados envolvendo a simulação

estacionária e pseudo-estacionária do comportamento de redes em relação à evolução da deposição (OLIVEIRA FILHO et al., 2007). O algoritmo desenvolvido foi empregado na otimização da distribuição das vazões em redes de trocadores de calor (OLIVEIRA FILHO et al., 2009).

Tavares (2010) propôs a modelagem da rede de trocadores envolvendo também os aspectos hidráulicos visando à realização de um cálculo mais rigoroso da rede. Essa modelagem foi formulada matricialmente com a geração de dois sistemas de equações, um não-linear e outro linear. De forma similar à Oliveira Filho (2007), o algoritmo de simulação foi empregado na otimização da distribuição das vazões (TAVARES et al., 2010).

Assis (2013) teve como objetivo fornecer uma ferramenta computacional robusta que aplicasse técnicas de otimização para o gerenciamento da deposição em redes de trocadores de calor. Esta ferramenta foi desenvolvida utilizando programação matemática e foram investigadas três abordagens distintas para a resolução do problema da deposição. Uma delas consistiu na identificação do conjunto ótimo de trocadores de calor a serem limpos durante uma parada para manutenção da planta, visando restaurar a carga térmica nesses equipamentos através da remoção dos depósitos existentes (ASSIS et al., 2013a). Enquanto as outras duas abordagens consistiram em otimizar a distribuição das vazões das correntes ao longo de ramais paralelos, uma de forma estacionária e a outra de forma dinâmica (ASSIS et al., 2013b).

1.5 O presente trabalho em relação à literatura

Como visto acima nos diversos trabalhos presentes na literatura, a programação das limpezas de redes de trocadores de calor é um problema de natureza complexa devido principalmente ao grande número de alternativas de solução e aos diversos parâmetros e fatores que influenciam diretamente na solução final. Assim, pela sua natureza, a otimização da programação das paradas para limpeza de trocadores de calor necessita de novos desenvolvimentos e aperfeiçoamentos que possibilitem uma abordagem simples e robusta para sua resolução.

A fim de se desenvolver novas formas de solução para este problema, o presente trabalho realiza a otimização da programação das paradas para limpeza de redes de trocadores de calor abordando três técnicas distintas: algoritmos genéticos, técnica heurística e híbrida.

2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO PSEUDO-ESTACIONÁRIA DE REDES DE TROCADORES DE CALOR

Este capítulo tem como objetivo apresentar o modelo de rede de trocadores de calor adotado fundamental para o cálculo dos balanços de massa e energia utilizados na simulação da rede. Também será apresentada a simulação pseudo-estacionária empregada visando à sua aplicação no gerenciamento das incrustações em redes de trocadores de calor.

O algoritmo de simulação é baseado na análise de redes de trocadores de calor proposta por Oliveira Filho et al. (2007). As hipóteses básicas adotadas no desenvolvimento do modelo empregado são: regime permanente, propriedades físicas constantes em cada equipamento e correntes sem mudança de fase. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser encontrados na dissertação de mestrado de Oliveira Filho (2007).

2.1 Modelagem dos elementos da rede

Serão modelados os seguintes equipamentos básicos comumente encontrados em redes de trocadores de calor: trocadores de calor, misturadores e divisores de correntes.

2.1.1 Trocadores de calor

O primeiro elemento da rede a ser apresentado será o trocador de calor. Como já comentado anteriormente, este equipamento permite a transferência de calor entre correntes com temperaturas diferentes, denominadas de correntes quentes e frias. Seja o trocador de calor apresentado na Figura 3.

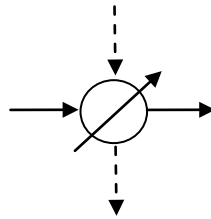


Figura 3– Esquema de um trocador de calor. Linhas contínuas: correntes frias. Linhas tracejadas: correntes quentes.

O balanço de massa segue o princípio da conservação de massa no regime permanente no qual a vazão mássica da corrente de entrada no trocador é igual à vazão mássica da corrente de saída, como mostram as equações a seguir:

$$m_{h,i} = m_{h,o} = m_h \quad (2.1)$$

$$m_{c,i} = m_{c,o} = m_c \quad (2.2)$$

onde os subscritos h e c , representam correntes quentes e frias, respectivamente e os subscritos i e o representam entrada e saída, respectivamente.

Para o equacionamento térmico dos trocadores de calor foi utilizado o método da efetividade (ε -NUT). Será feita a abordagem do método inicialmente para o fluido frio e posteriormente para o quente.

- Quando o fluido mínimo é o fluido frio:

Pela equação da efetividade em função das temperaturas, tem-se:

$$\varepsilon = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (2.3)$$

Rearranjando a Equação 2.3:

$$\varepsilon(T_{h,i} - T_{c,i}) = T_{c,o} - T_{c,i} \quad (2.4)$$

Com a operação de multiplicação distributiva, a expressão fica:

$$\varepsilon T_{h,i} - \varepsilon T_{c,i} = T_{c,o} - T_{c,i} \quad (2.5)$$

Reorganizando a expressão agrupando os termos semelhantes:

$$-(1 - \varepsilon)T_{c,i} + T_{c,o} - \varepsilon T_{h,i} = 0 \quad (2.6)$$

Sabendo-se que a taxa de capacidade calorífica corresponde a:

$$C = mC_p \quad (2.7)$$

Pelo balanço de energia, tem-se:

$$C_c (T_{c,o} - T_{c,i}) = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.8)$$

Uma vez que fluido mínimo é o fluido frio, tem-se $C_{min} = C_c$, e $C_{max} = C_h$. Definindo o termo C_R como a razão entre o C_{min} e o C_{max} :

$$C_R = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (2.9)$$

Organizando os termos do balanço e substituindo por C_R :

$$-C_R T_{c,i} + C_R T_{c,o} - T_{h,i} + T_{h,o} = 0 \quad (2.10)$$

Finalmente, utilizando-se as expressões (2.6) e (2.10), o modelo do trocador pode ser descrito na seguinte estrutura matricial linear:

$$\begin{bmatrix} -(1-\varepsilon) & 1 & -\varepsilon & 0 \\ -C_R & C_R & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{c,i} \\ T_{c,o} \\ T_{h,i} \\ T_{h,o} \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (2.11)$$

- Quando o fluido mínimo é o fluido quente:

Partindo-se da seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (2.12)$$

Obtém-se então:

$$\varepsilon(T_{h,i} - T_{c,i}) = T_{h,o} - T_{h,i} \quad (2.13)$$

Aplicando-se a propriedade distributiva:

$$\varepsilon T_{c,i} + (1-\varepsilon)T_{h,i} - T_{h,o} = 0 \quad (2.14)$$

Utilizando-se o princípio da conservação de energia, obtém-se:

$$C_c (T_{c,o} - T_{c,i}) = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.15)$$

Sendo o fluido mínimo o fluido quente e assim $C_{min} = C_h$ e $C_{max} = C_c$. Novamente realizando a substituição por C_R e reordenando os termos, a expressão fica:

$$T_{c,i} - T_{c,o} + C_R T_{h,i} - C_R T_{h,o} = 0 \quad (2.16)$$

Conseqüentemente, na forma matricial as equações (2.14) e (2.16) podem ser ordenadas por:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 1-\varepsilon & -1 \\ 1 & -1 & C_R & -C_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{c,i} \\ T_{c,o} \\ T_{h,i} \\ T_{h,o} \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (2.17)$$

A fim de se encontrar uma forma geral aplicável a qualquer exemplo de rede no simulador, utilizou-se um parâmetro y binário (0 ou 1), como identificador do fluido mínimo. Dessa forma, utilizou-se a forma geral matricial com um único sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon + (y-1) & 1-y & y-\varepsilon & -y \\ C_R(y-1) + y & C_R(1-y) - y & C_R y + (y-1) & -C_R y + (1-y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{c,i} \\ T_{c,o} \\ T_{h,i} \\ T_{h,o} \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (2.18)$$

Sendo o parâmetro y igual a 1, o fluido mínimo é a corrente quente (capacidade térmica da corrente fria é maior que a da corrente quente) e sendo o parâmetro y igual a 0, o fluido mínimo é o fluido frio.

2.1.2 Misturadores de corrente

O segundo elemento da rede a ser estudado são os misturadores. O misturador é o responsável pela união de duas ou mais correntes à montante para formar uma única corrente de saída. Os esquemas de dois misturadores, um para correntes frias e outro para correntes quentes estão representados na Figura 4.

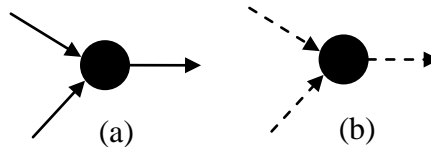


Figura 4– Esquema de um misturador de correntes.
a) para correntes frias; b) para correntes quentes.

Pelo balanço de massa tem-se o princípio da conservação de massa em regime permanente que para um misturador, para correntes quentes e frias, é:

$$m_{i,1} + m_{i,2} + m_{i,3} + \dots - m_0 = 0 \quad (2.19)$$

Pelo balanço de energia, aplica-se o princípio de conservação de energia que para o misturador corresponde à seguinte expressão:

$$C_{i,1}T_{i,1} + C_{i,2}T_{i,2} + C_{i,3}T_{i,3} + \dots - C_oT_o = 0 \quad (2.20)$$

2.1.3 Divisores de corrente

O terceiro elemento da rede a ser estudado são os divisores de corrente. Nesse trabalho, o divisor reparte uma corrente de entrada em duas correntes de saída. As equações do modelo do divisor são válidas tanto para correntes quentes como para frias. A Figura 5 apresenta as representações de divisores de corrente fria e quente.

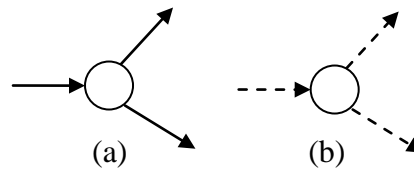


Figura 5– Esquema de um divisor de correntes.
a) para correntes frias; b) para correntes quentes.

No caso de ser necessário dividir uma corrente em três ou mais, utilizam-se divisores em série, subdividindo as correntes em grupos de dois formando várias estruturas idênticas às apresentadas na Figura 6.

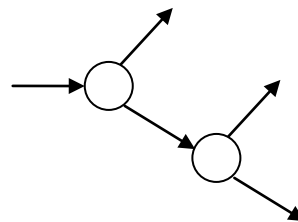


Figura 6– Esquema de um divisor com três correntes.

O balanço de massa no divisor de corrente corresponde à seguinte equação no regime permanente:

$$m_i - m_{o,1} - m_{o,2} = 0 \quad (2.21)$$

A equação para o balanço de energia assumirá a seguinte forma:

$$C_i T_i - C_{o,1} T_{o,1} - C_{o,2} T_{o,2} = 0 \quad (2.22)$$

$$T_{o,1} - T_{o,2} = 0 \quad (2.23)$$

onde a expressão (2.23) atribui que não há nenhuma modificação entre as temperaturas de entrada e saída no modelo.

2.2 A representação da rede

Os elementos da rede são relacionados utilizando-se a abordagem dos grafos. Um grafo é um conjunto de elementos, chamados vértices, inter-relacionados através de arestas. Um digrafo é um grafo no qual as arestas têm uma orientação definida. A estrutura da rede de trocadores de calor é representada por um digrafo. Muitos sistemas de engenharia utilizam essa abordagem (MAH, 1990).

2.2.1 Representação da rede como um fluxograma de processo

Na representação da rede na forma de um fluxograma, os vértices (índice t) são representados pelos elementos da rede: trocadores de calor (conjunto HE), misturadores (conjunto MX), divisores (conjunto SP), unidades de suprimento (conjunto PS) e unidades de demanda (conjunto PD). Estes vértices são interligados por arestas (índice k), que representam as correntes materiais.

A Figura 7 apresenta um exemplo de digrafo de fluxograma de processo de uma pequena rede de trocadores de calor presente em Smaïli et al. (2002a) (as arestas são numeradas com algarismos arábicos e os vértices são numerados com algarismos romanos).

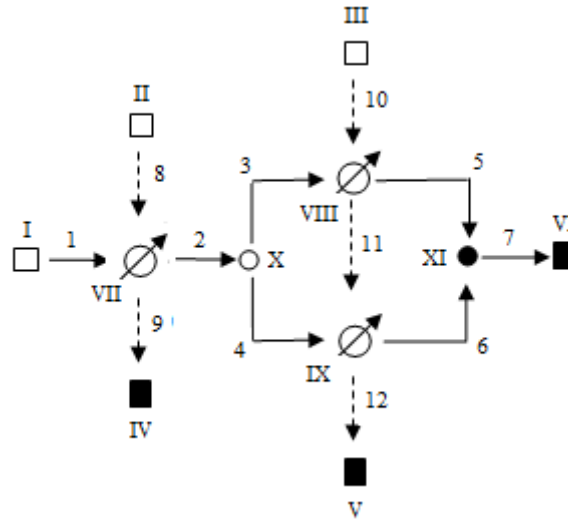


Figura 7– Exemplo de digrafo do fluxograma de processo. Correntes frias: linhas contínuas – Correntes quentes: Linhas tracejadas – Unidades de suprimento: Quadrados brancos – Unidades de demanda: Quadrados pretos – Divisores: círculos brancos – Misturadores: círculos pretos.

O número total de vértices (N) será descrito por:

$$N = N^P + N^{HE} + N^{MX} + N^{SP} \quad (2.24)$$

onde N^P é o número total de elementos das unidades externas, N^{HE} é o número total dos trocadores de calor, N^{MX} é o número total dos misturadores e N^{SP} é o número total dos divisores.

Para as unidades externas, há a subdivisão do número de elementos pertencentes às unidades de suprimento e às de demanda. O número de elementos da unidade de suprimento (N^{PS}) representa outros equipamentos ou áreas da planta de entrada na rede e o número de elementos da unidade de demanda (N^{PD}), representa a saída da rede para envio para outros equipamentos ou áreas, como apresenta a equação abaixo:

$$N^P = N^{PS} + N^{PD} \quad (2.25)$$

Os N vértices são interligados por S arestas, contemplando S_c correntes de fluido frio e S_h correntes de fluido quente, como é apresentado a seguir:

$$S = S_c + S_h \quad (2.26)$$

A Tabela 1 apresenta a numeração dos vértices do exemplo da Figura 7, e na Tabela 2 se encontram as informações correspondentes às arestas do mesmo exemplo.

Tabela 1 – Informações dos vértices do exemplo.

Vértices	PS	PD	HE	SP	MX
Numeração	I, II, III	IV, V, VI	VII, VIII, IX	X	XI

Tabela 2 – Informações das arestas do exemplo.

Arestas	c	h
Numeração	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10, 11, 12

A conectividade da rede é feita pela matriz de incidência $\underline{\underline{M}}$ (dimensão $N \times S$). Cada vértice t da rede está associado a uma linha da matriz e cada aresta k está associada a uma coluna. O elemento da matriz $(\underline{\underline{M}})_{t,k}$ é igual a 1 se a aresta k entra no vértice t , igual -1 se a aresta k sai do vértice t ou igual 0 se a aresta k não se relaciona ao vértice t :

A identificação dos vértices e das arestas no fluxograma da rede de trocadores de calor é definida de acordo com a seguinte partição da matriz de incidência:

$$\underline{\underline{M}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{M}}^P \\ \underline{\underline{M}}^{HE} \\ \underline{\underline{M}}^{MX} \\ \underline{\underline{M}}^{SP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{M}}_c^P & \underline{\underline{M}}_h^P \\ \underline{\underline{M}}_c^{HE} & \underline{\underline{M}}_h^{HE} \\ \underline{\underline{M}}_c^{MX} & \underline{\underline{M}}_h^{MX} \\ \underline{\underline{M}}_c^{SP} & \underline{\underline{M}}_h^{SP} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

A Figura 8 representa a matriz de incidência correspondente ao exemplo da Figura 7 com as identificações das numerações das arestas e dos vértices correspondentes (apenas as

entradas diferentes de zero são apresentadas e as linhas tracejadas indicam as partições da matriz).

		Arestas											
		<i>c</i>						<i>h</i>					
Vértices		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>PS</i>	I	-1											
	II								-1				
	III										-1		
<i>PD</i>	IV									1			
	V												1
	VI							1					
<i>HE</i>	VII	1	-1						1	-1			
	VIII			1		-1					1	-1	
	IX				1		-1					1	-1
<i>MX</i>	X		1	-1	-1								
<i>SP</i>	XI					1	1	-1					

Figura 8– Matriz de incidência do digrafo do fluxograma de processo do exemplo.

2.3 Modelo da rede

O modelo da rede é composto por dois sistemas de equações que são resolvidos sequencialmente: o modelo de balanço de massa e o modelo de balanço de energia.

Os balanços de massa e de energia de toda a rede são feitos em cada elemento dentro da rede e posteriormente é feita a junção de todas as equações dos elementos em uma única estrutura através de uma abordagem matricial. O modelo de balanço de energia contém as equações de balanço complementadas com equações para cálculo da taxa de transferência de calor nos trocadores através do método ϵ -NUT.

As variáveis dos sistemas de equações descritos acima são as vazões e as temperaturas nas arestas e as vazões de fluido que entram e saem da rede pelos vértices externos. As vazões mássicas e as temperaturas das correntes da rede são organizadas nos vetores \underline{m} e \underline{T} (dimensão $S \times I$). Pelo particionamento dos vetores \underline{m} e \underline{T} , em subvetores relativos às correntes frias e quentes, tem-se:

$$\underline{m} = \begin{bmatrix} \underline{m}_c \\ \underline{m}_h \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \underline{T}_c \\ \underline{T}_h \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

As vazões mássicas e as temperaturas das correntes dos vértices são organizadas nos vetores \underline{n} e \underline{V} (dimensão $N^p \times 1$), que podem ser particionados em unidades de suprimento e demanda:

$$\underline{n} = \begin{bmatrix} \underline{n}^{PS} \\ \underline{n}^{PD} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} \underline{V}^{PS} \\ \underline{V}^{PD} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Com a resolução do balanço de massa se obtêm os valores correspondentes das vazões e pelo balanço de energia, chega-se aos valores de temperatura nos vértices.

2.3.1 Modelo de balanço de massa da rede

Os balanços de massa são calculados nos vértices da rede obedecendo à lei de conservação de massa. Essas equações serão descritas por representações matriciais como mostram as equações de balanço de massa (2.32), (2.33), (2.34), (2.35), (2.36) e (2.37) para cada grupo de vértices:

2.3.1.1 Unidades externas

Para as unidades externas, tem-se a seguinte expressão (N^P equações):

$$\underline{\underline{M}}^P \underline{m} + \underline{n} = \underline{0} \quad (2.32)$$

2.3.1.2 Misturadores

Com relação aos misturadores, a seguinte expressão é escrita (N^{MX} equações):

$$\underline{\underline{M}}^{MX} \underline{m} = \underline{0} \quad (2.33)$$

2.3.1.3 Divisores

Para os divisores, utiliza-se (N^{SP} equações):

$$\underline{\underline{M}}^{SP} \underline{m} = \underline{0} \quad (2.34)$$

2.3.1.4 Trocadores de calor

E por fim para os trocadores de calor, serão $2N^{HE}$ equações com as seguintes estruturas:

$$\underline{\underline{M}}_c^{HE} \underline{m}_c = \underline{0} \quad (2.35)$$

$$\underline{\underline{M}}_h^{HE} \underline{m}_h = \underline{0} \quad (2.36)$$

2.3.1.5 Especificações

Para cada vértice de uma unidade externa de suprimento, há uma especificação de vazão (N^{PS} equações).

$$\underline{n}^{PS} - (\underline{n}^{PS})^* = \underline{0} \quad (2.37)$$

onde $(\underline{n}^{PS})^*$ indica as vazões de entrada com valor especificado para garantir o fechamento do balanço material.

2.3.2 Modelo de balanço de energia da rede

2.3.2.1 Balanço de energia nas unidades externas

Na forma matricial, este balanço é representado por ($N^{PS} + N^{PD}$ equações):

$$\underline{\underline{M}}^{PS} \underline{T} + \underline{V}^{PS} = \underline{0} \quad (2.38)$$

$$\underline{\underline{M}}^{PD} \underline{T} - \underline{V}^{PD} = \underline{0} \quad (2.39)$$

2.3.2.2 Equações dos trocadores de calor

A representação matricial do modelo do trocador de calor, derivada da Equação 2.18, envolve $2N^{HE}$ equações:

$$[(\underline{Eci})(\underline{M}_c^{HE})_+ - (\underline{Eco})(\underline{M}_c^{HE})_-] \underline{T}_c + [(\underline{Ehi})(\underline{M}_h^{HE})_+ - (\underline{Eho})(\underline{M}_h^{HE})_-] \underline{T}_h = \underline{0} \quad (2.40)$$

$$[(\underline{Rc})(\underline{M}_c^{HE})] \underline{T}_c + [(\underline{Rh})(\underline{M}_h^{HE})] \underline{T}_h = \underline{0} \quad (2.41)$$

onde as matrizes auxiliares das Equações (2.40) e (2.41), cujas entradas positivas são representadas pelo subscrito + e as entradas negativas são representadas pelo subscrito -, são matrizes diagonais com elementos j da diagonal principal dados por:

$$(\underline{Eci})_j = \varepsilon_j + (1 - y_j) \quad (2.42)$$

$$(\underline{Eco})_j = y_j - 1 \quad (2.43)$$

$$(\underline{Ehi})_j = y_j - \varepsilon_j \quad (2.44)$$

$$(\underline{Eho})_j = -y_j \quad (2.45)$$

$$(\underline{Rc})_j = C_{Rj}(1 - y_j) + y_j \quad (2.46)$$

$$(\underline{Rh})_j = C_{Rj}y_j + (y_j - 1) \quad (2.47)$$

2.3.2.3 Balanço de energia nos misturadores e divisores

O balanço de energia nos misturadores e divisores envolve $N^{MX} + 2N^{SP}$ equações, obtidas das Equações (2.20), (2.22) e (2.23):

$$\underline{M}^{MX} [\underline{diag}(\underline{C})] \underline{T} = \underline{0} \quad (2.48)$$

$$\underline{M}^{SP} [\underline{diag}(\underline{C})] \underline{T} = \underline{0} \quad (2.49)$$

$$(\underline{M}^{SP})_+ \underline{T} - (\underline{M}_{SPLIT}) \underline{T} = \underline{0} \quad (2.50)$$

onde \underline{C} é um vetor de taxa de capacidades caloríficas das correntes da rede, \underline{M}_{SPLIT} e \underline{M}^{SP} possuem dimensão $N^{SP} \times S$. A matriz $(\underline{M}^{SP})_+$ possui apenas os elementos positivos da matriz e refere-se às indicações das entradas nos divisores, os elementos negativos são transformados em zero. A matriz \underline{M}_{SPLIT} possui as numerações correspondentes a uma saída de cada divisor,

com valor igual a 1 para a posição de saída da corrente e valor igual a zero para onde não houver correspondência.

2.3.2.4 Especificações

As temperaturas das correntes associadas às unidades externas de suprimentos são especificadas (N^{PS} equações):

$$\underline{V}^{PS} - (\underline{V}^{PS})^* = \underline{0} \quad (2.51)$$

onde $(\underline{V}^{PS})^*$ é o vetor dos valores especificados das temperaturas externas de suprimento.

2.4 Algoritmos de simulação pseudo-estacionária

Do ponto de vista computacional, o algoritmo de simulação foi implementado através do *software* Scilab (SCILAB, 2011), ambiente de programação que utiliza uma sintaxe muito semelhante àquela do *software* Matlab, porém com distribuição gratuita.

O esquema da simulação da rede se baseia na resolução do modelo da rede descrito acima em duas etapas. A primeira etapa consiste na solução do sistema de equações associados ao balanço material para determinar as vazões mássicas \underline{m} e \underline{n} . Enquanto a segunda etapa realiza a solução do sistema de equações relacionado às equações do balanço de energia e às equações dos trocadores para determinar as temperaturas. A simulação pseudo-estacionária consiste na realização da simulação estacionária em cada instante de tempo, com atualização das resistências de depósito (R_f) a cada ponto. A Figura 9 ilustra o funcionamento do algoritmo.

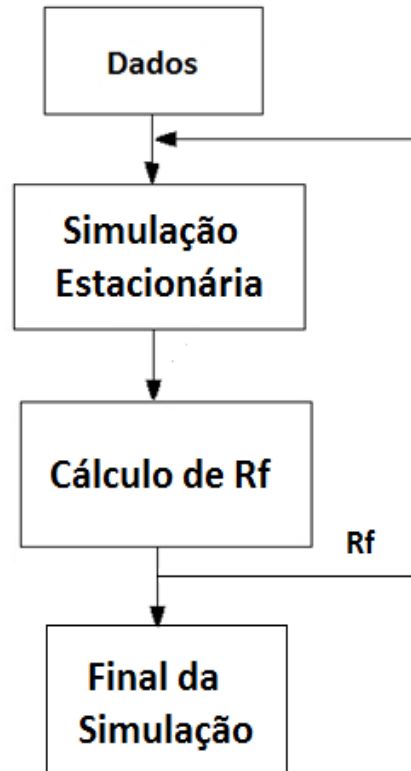


Figura 9– Algoritmo de simulação pseudo-estacionária.

3 ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO

Este capítulo primeiramente apresenta a descrição geral do problema de otimização com a sua formulação e posteriormente as estratégias de otimização utilizadas nas paradas para limpeza de redes de trocadores de calor.

3.1 Descrição geral do problema de otimização da programação das limpezas

Uma rede de trocadores de calor pode ser descrita como um conjunto de trocadores de calor com uma configuração fixa, conforme mostrado na Figura 10. Admite-se, por hipótese, que cada unidade de troca térmica pode ser retirada para limpeza sem interromper o processo, uma vez que as correntes podem ser desviadas para outro trocador por linhas de *bypass*.

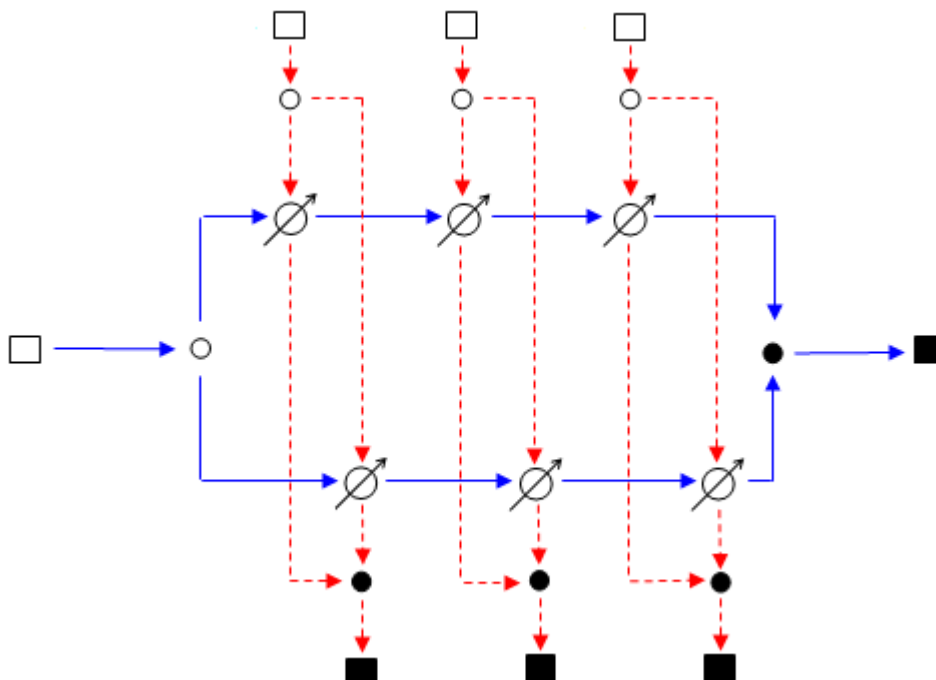


Figura 10– Diagrama esquemático de uma rede de trocadores de calor. Linhas sólidas: corrente fria; linha pontilhada: corrente quente.

Uma aplicação industrial de redes de trocadores de calor bastante relevante neste sentido é observada em unidades de destilação atmosférica em plantas de refino de petróleo.

Em função da sua importância, no Capítulo 4 desta dissertação serão investigados exemplos que serão direcionados a este sistema.

Os procedimentos de otimização propostos neste trabalho possuem o objetivo de identificar uma programação das paradas para limpeza de redes de trocadores de calor, capaz de minimizar o custo operacional total incluindo o consumo de energia e o custo das limpezas. A formulação aqui apresentada baseia-se nas premissas descritas a seguir.

3.1.1 Formulação do problema de otimização da rede

Tal como apresentado no capítulo anterior, o comportamento dinâmico da rede pode ser descrito através da solução do modelo estacionário ao longo de diferentes instantes de tempo em um horizonte discretizado.

Na formulação proposta, o horizonte de tempo de operação da rede, τ , é organizado em um conjunto de instantes agrupados em períodos iguais (N_p). Os períodos por sua vez são divididos em dois sub-períodos: um sub-período de limpeza (P^{clean}) e um sub-período de operação ($P^{process}$). Nos sub-períodos de limpeza, as ações de limpeza podem ser executadas e assim o trocador pode estar em operação ou parado para limpeza e nos sub-períodos de operação todos os trocadores encontram-se em operação, ou seja, não há limpezas nos sub-períodos de operação. Tal discretização do tempo em períodos e sub-períodos tem sido utilizada em vários trabalhos na área de programação das limpezas (LAVAJA e BAGAJEWICZ, 2004; SMAÏLI et al., 2001a; SMAÏLI et al., 2002a; RODRIGUEZ e SMITH, 2007). Um exemplo da discretização do tempo é apresentado na Figura 3.2 contendo N_p períodos onde os subperíodos de limpeza (P^{clean}) contêm 2 instantes de tempo e os subperíodos de operação ($P^{process}$) contêm 3 instantes de tempo.

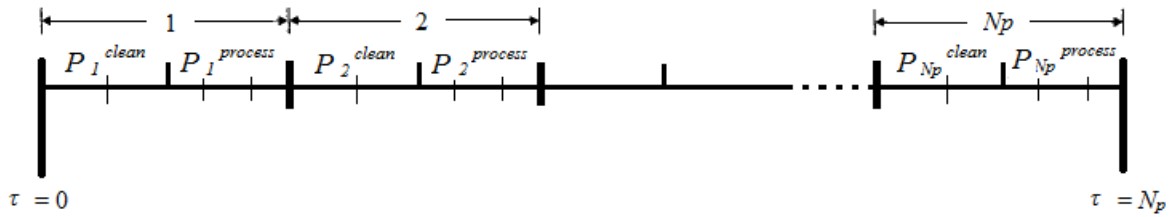


Figura 11– Discretização do tempo do problema de programação das paradas.

Ressalva-se a importância da utilização de um número adequado de instantes de acordo com o problema em questão para garantir uma boa acurácia no procedimento de integração para avaliação da função objetivo, sem onerar demasiadamente o esforço computacional.

Assim, o estado de limpeza de um trocador de calor t em cada sub-período de limpeza τ é descrito por uma variável binária inteira, $y_{t,\tau}$, onde:

$$y_{t,\tau} = \begin{cases} 1 & \text{se o trocador } t \text{ estiver operando no subperíodo de limpeza } \tau \\ 0 & \text{se o trocador } t \text{ estiver sendo limpo no subperíodo de limpeza } \tau \end{cases} \quad (3.1)$$

Após a limpeza, considera-se que o trocador retorna com resistência de depósito nula para o sub-período de operação.

A função objetivo do problema de otimização corresponde à minimização do custo total, expresso por dois termos: um relativo à energia consumida e outro ao custo associado ao conjunto de paradas propostas:

$$f_{obj} = \int \sum_{t \in PD} C_{e,t} n_t C_{p,t} (V_{ref,t} - V_t) d\tau + \sum_{t \in HE} \sum_{\text{períodos}} C_c (1 - y_{t,\tau}) \quad (3.2)$$

onde f_{obj} é a função objetivo, t corresponde a unidade externa ou ao trocador de calor, $C_{e,t}$ é o preço da energia em cada unidade externa, n_t é a vazão mássica em cada unidade externa, $C_{p,t}$ é a capacidade calorífica em cada unidade externa, $V_{ref,t}$ é a temperatura de referência em cada unidade externa para cálculo da carga térmica consumida ao final da rede considerando-a totalmente limpa, V_t é a temperatura em cada unidade externa, $y_{t,\tau}$ é o estado de limpeza de um trocador e C_c é o custo de cada parada para limpeza. Na rotina computacional

implementada, a integral referente ao consumo de energia é realizada numericamente pelo método do trapézio.

A representação do problema não inclui as restrições relativas ao modelo da rede de forma explícita, visto que as equações de balanço de massa, de balanço de energia e equações relativas aos trocadores de calor encontram-se embutidas no simulador utilizado na própria avaliação da função objetivo.

Em redes de trocadores de calor, é relativamente comum haver divisão de sua estrutura em diversos ramais paralelos de trocadores em série e um exemplo típico desta estrutura encontra-se na Figura 12. Nestes casos, quando um trocador para, a vazão pode ser direcionada para o outro ramal em paralelo.

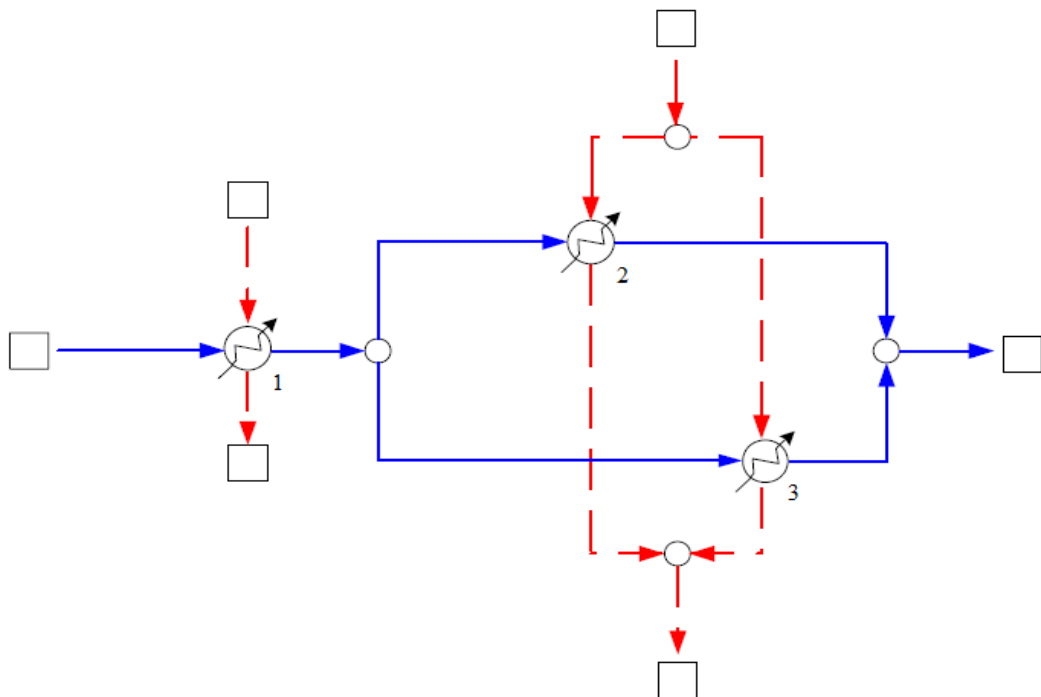


Figura 12– Exemplo de rede de trocadores de calor ramificada (SMAÏLI et al., 2002a).

Assim, foi implementado um algoritmo visando o gerenciamento dos divisores para estudo desses casos de desvio da vazão em ramais paralelos em virtude da parada de trocadores para limpeza.

3.1.2 Extensão da formulação do problema

Visando garantir que a solução encontrada seja viável do ponto de vista operacional, é possível estender a formulação do problema para a acomodação de restrições. Tais restrições incluem um número mínimo de trocadores de calor que devem estar operando em cada período de tempo e limites de temperatura nos vértices ao final da rede de troca térmica.

As restrições relativas ao número mínimo de trocadores operando são importantes a fim de que seja impedida a parada simultânea de grande número de trocadores de calor em determinado setor da rede ou mesmo na rede como um todo, podendo ser descritas formalmente como:

$$\sum_{t \in SC_j} y_{t,\tau} \geq g_j \quad j \in J \quad (3.3)$$

onde g corresponde ao número mínimo de trocadores que deve estar operando, J corresponde ao conjunto de grupos de trocadores de calor e SC_j corresponde ao grupo de trocador de calor associados à restrição j .

A restrição relativa às temperaturas nos vértices ao final da rede de trocadores de calor pode ser utilizada como garantia de que não haja sobrecarga nos aquecedores/resfriadores ao final da rede. No caso de uma bateria de pré-aquecimento, esta restrição é importante para que não haja sobrecarga no forno, caso a sua temperatura de alimentação seja excessivamente baixa, e evite temperaturas muito elevadas das correntes quentes para tancagem. A restrição de temperatura na saída da rede de trocadores de calor pode ser representada por:

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max} \quad t \in PD \quad (3.4)$$

onde t corresponde aos vértices e PD as unidades de demanda.

3.2 Otimização

O objetivo do procedimento de otimização é encontrar a programação das limpezas de uma rede de trocadores de calor visando um melhor aproveitamento energético do processo. Devido à sua complexidade e à necessidade de novos aprimoramentos, desenvolveu-se a otimização das paradas para limpeza de redes de trocadores de calor através de duas estratégias de otimização distintas: uma metodologia estocástica (meta-heurística) baseada em um algoritmo da literatura (algoritmos genéticos) e uma metodologia heurística desenvolvida exclusivamente para o problema em questão. Também foi estudado o emprego simultâneo das duas metodologias, denominada metodologia híbrida. Ambas as metodologias utilizadas na programação das paradas serão apresentadas a seguir.

3.2.1 Metodologia estocástica


Utilizou-se como metodologia estocástica o algoritmo genético conforme revisão bibliográfica descrita no Capítulo 1, sendo apresentados a seguir os detalhes da implementação desse algoritmo para o problema investigado em particular.

3.2.1.1 Codificação

Na codificação utilizada para a programação da limpeza da rede de troca térmica, os indivíduos são representados genotipicamente pela codificação binária, onde cada elemento do cromossomo possui valor correspondente a um (1), caso o trocador esteja operando, e correspondente ao valor zero (0), caso o trocador esteja parado para limpeza. O fenótipo correspondente consiste na programação completa indicando o estado de cada trocador em cada instante de tempo. Do ponto de vista computacional, cada alternativa de programação de limpeza é representada por uma cadeia de caracteres (*strings*) que indica o sequenciamento relativo a cada trocador conforme a ordenação dos sub-períodos de limpeza.

Na Figura 13 encontra-se um exemplo de um cromossomo e de uma programação completa com essa codificação para uma rede de 3 trocadores de calor, com 5 períodos onde cada período possui 1 sub-período de limpeza (P^{clean}) e 1 sub-período de operação ($P^{process}$).

Trocador	1					2					3				
Cromossomo	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0



Trocador/Sub-períodos	p_1^{clean}	$p_1^{process}$	p_2^{clean}	$p_2^{process}$	p_3^{clean}	$p_3^{process}$	p_4^{clean}	$p_4^{process}$	p_5^{clean}	$p_5^{process}$
1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
2	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1

Figura 13– Exemplo da codificação binária empregada para um cromossomo e a programação das paradas para limpeza correspondente com os sub-períodos de limpeza e de operação.

3.2.1.2 Geração da população inicial

A população inicial é gerada de forma aleatória, mas não uniformemente, baseando-se em um parâmetro percentual de paradas para limpeza denominado *limpop*. A introdução deste parâmetro foi necessária, pois a utilização da distribuição uniforme implicaria em soluções iniciais com um número de paradas excessivo, distantes de pontos ótimos normalmente encontrados.

A dimensão matricial da população inicial é o tamanho da população para o número de linhas e o número de períodos multiplicado pelo número de trocadores de calor, para o número de colunas. Na Figura 3.5 é exemplificada a geração de uma população inicial para uma rede de 3 trocadores, com 5 indivíduos, 5 períodos e parâmetro percentual de paradas (*limpop*) de 8 %, ou seja, a população inicial deve possuir aproximadamente 6 paradas de um total de 75 possibilidades.

		String														
HE		1					2					3				
Período		p_1^{clean}	p_2^{clean}	p_3^{clean}	p_4^{clean}	p_5^{clean}	p_1^{clean}	p_2^{clean}	p_3^{clean}	p_4^{clean}	p_5^{clean}	p_1^{clean}	p_2^{clean}	p_3^{clean}	p_4^{clean}	p_5^{clean}
Indivíduos	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

Figura 14– Exemplo de população inicial gerada. $HE = 3$; $N_p = 5$; $limpop = 0,08$.

3.2.1.3 Operadores genéticos

Conforme descrito no Capítulo 1, com o operador genético denominado seleção, os cromossomos são selecionados de uma população para participar de um cruzamento dando origem a dois novos indivíduos. A seleção do melhor cromossomo pode ser feita através de diversos métodos como seleção por torneio, seleção pelo método de amostragem estocástica uniforme, seleção local, seleção por ranking ou seleção truncada (LINDEN, 2008). No presente trabalho, foi utilizada a seleção por roleta ponderada na qual a probabilidade da escolha de um indivíduo para acasalamento é proporcional ao valor relativo da sua aptidão em relação aos demais indivíduos da população.

O cruzamento ou *crossover* é o operador genético responsável pela recombinação de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem tais características com a utilização de valores altos de probabilidade de *crossover*. Este operador pode ser: de um ponto, de dois pontos, multi-pontos ou uniforme. Utilizou-se neste trabalho o *crossover* de um ponto no qual um ponto de cruzamento é selecionado e, a partir deste ponto, as informações genéticas dos pais serão trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro indivíduo, como é mostrado no exemplo da Figura 3.6.

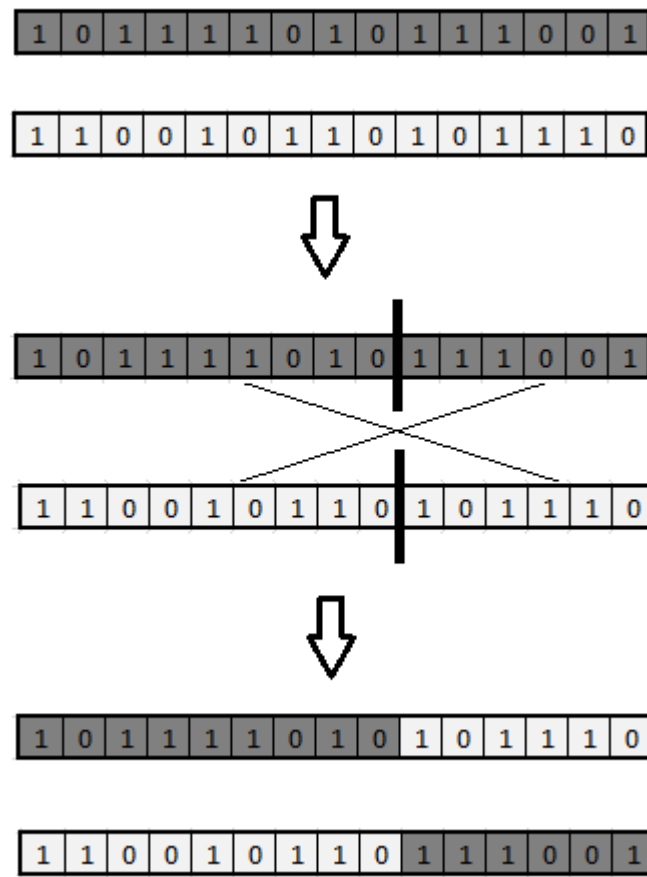


Figura 15– Exemplo de *crossover* de um ponto.

A mutação visa permitir uma exploração mais ampla do espaço de busca, introduzindo de forma contínua alterações aleatórias no genótipo dos indivíduos. Neste trabalho, os cromossomos mutantes são formados a partir de análise comparativa bit a bit com a probabilidade de mutação. A Figura 16 exemplifica um cromossomo normal no qual os bits 2 e 8 foram sorteados para mutação.

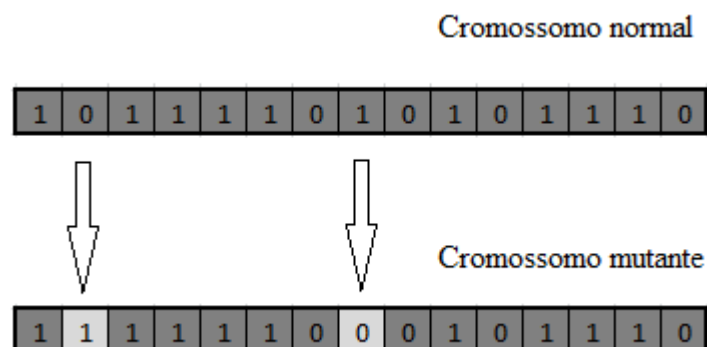


Figura 16– Exemplo de mutação.

3.2.1.4 Elitismo

A fim de prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população no decorrer da utilização do algoritmo genético, utilizou-se o elitismo que consiste na manutenção do melhor indivíduo já encontrado nas próximas gerações.

3.2.1.5 Função aptidão

A função objetivo permite o cálculo da aptidão de cada indivíduo, que fornecerá o valor a ser usado para o cálculo de sua probabilidade de ser selecionado para reprodução. Neste trabalho, a função aptidão foi calculada como o inverso da função objetivo.

3.2.1.6 Abordagem do problema estendido

Na metodologia estocástica foram inseridas as restrições de número mínimo de trocadores que devem estar operando e de limites de temperatura no vértice ao final da rede, sendo analisadas como penalizações na função objetivo.

A penalização da violação das restrições é somada à função objetivo no cálculo da função aptidão da seguinte forma:

$$FA = \frac{1}{(FO + Pen)} \quad (3.5)$$

onde FA é a função aptidão, FO é a função objetivo e Pen é a penalização da violação das restrições, que é calculada pela multiplicação do somatório das violações por um peso.

3.2.2 Metodologia heurística

Outra técnica de otimização utilizada neste trabalho para otimização das paradas para limpeza de trocadores de calor teve por base uma metodologia heurística, ou seja, um algoritmo exploratório que busque solucionar o problema cujo resultado é o melhor que se pode encontrar sob determinadas condições (BUENO, 2009).

A codificação desta metodologia é semelhante à utilizada na metodologia estocástica, onde cada elemento da *string* possui valor correspondente a um (1), caso o trocador esteja operando, e correspondente ao valor zero (0), caso o trocador esteja parado para limpeza.

3.2.2.1 Passos da metodologia heurística

Esta metodologia contém 3 passos principais denominados: conjunto de movimentos zero, conjunto de movimentos um e conjunto de movimentos dois, os quais serão detalhados a seguir:

3.2.2.2 Conjunto de movimentos zero

Primeiramente define-se uma programação na qual todos os trocadores de calor encontram-se em operação em todos os instantes de tempo, simula-se esta programação e em seguida calcula-se a sua função objetivo e armazena-se o seu valor. Por fim testa-se a inserção de paradas para limpeza nessa programação em cada permutador em cada período de tempo pela geração sequencial de candidatos.

Cada movimento de inserção de paradas em um determinado trocador e em um determinado período origina uma alternativa de solução (candidato). Os candidatos são gerados na sequência por trocador para todos os períodos. A inserção de paradas se dá pela comparação da função objetivo do novo candidato gerado com a função objetivo do melhor

candidato encontrado até aquele momento. Caso a função objetivo do novo candidato seja menor, o candidato será aceito, o movimento será realizado e a função objetivo será atualizada como a melhor até aquele momento. A Figura 17 descreve o algoritmo relativo ao conjunto de movimentos zero.

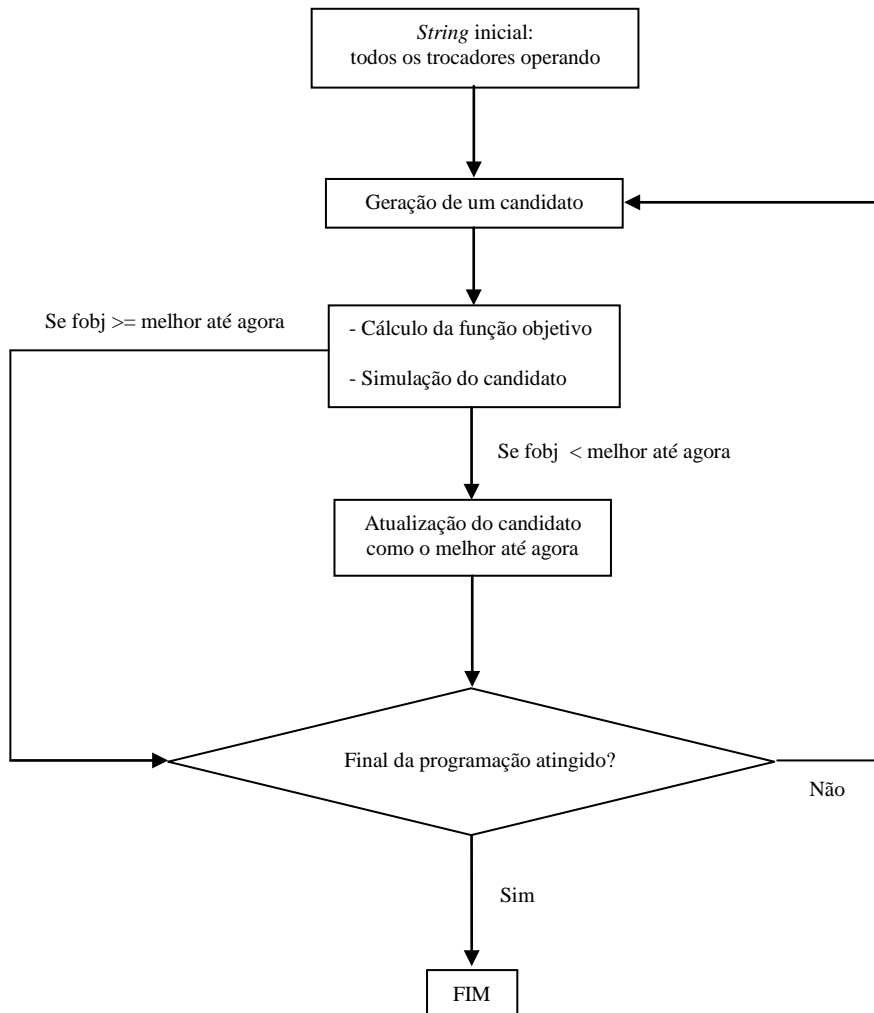


Figura 17– Algoritmo do conjunto de movimentos zero.

3.2.2.3 Conjunto de movimentos um

Partindo-se da programação oriunda do conjunto de movimentos zero, esse movimento testa a inserção de paradas nos trocadores que estiverem em operação e testa a retirada de paradas dos trocadores que estiverem parados. A geração de novos candidatos é feita de forma análoga ao conjunto de movimentos zero, sendo a função objetivo de cada

candidato comparada com a melhor até aquele momento e, caso esta seja menor, o movimento de inserção ou retirada de parada será aceito. A Figura 18 apresenta o algoritmo correspondente.

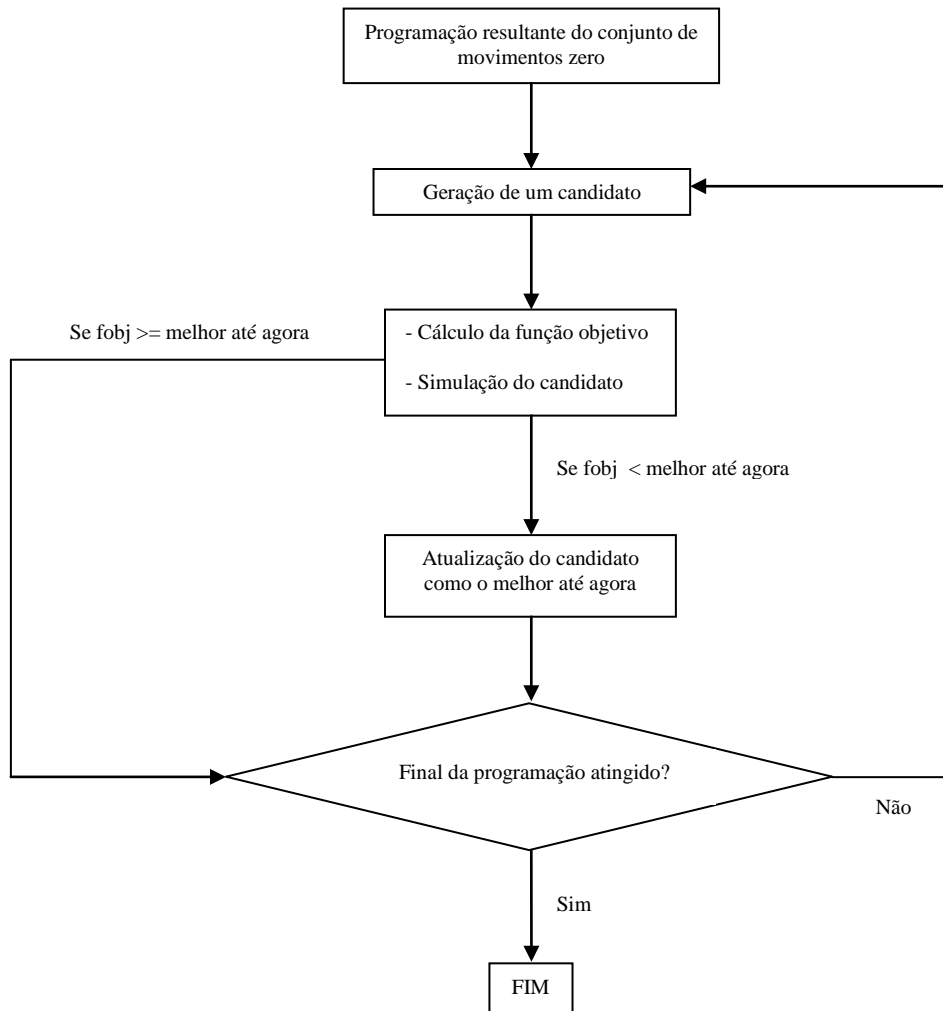


Figura 18– Algoritmo do conjunto de movimentos um.

3.2.2.4 Conjunto de movimentos dois

Partindo-se da programação oriunda do conjunto de movimentos um, esse movimento verifica o ganho da movimentação de cada parada para um período a sua esquerda ou a sua direita.

São gerados dois candidatos por período, sendo um candidato cuja parada será alocada à direita e outro candidato cuja parada será alocada à esquerda. O deslocamento da parada

para a direita ou para a esquerda se dá pela comparação da função objetivo, primeiramente compara-se a função objetivo do candidato à esquerda com a do candidato à direita e posteriormente compara-se a do melhor entre os dois com o melhor até aquele momento. O candidato será aceito, o movimento será realizado e a função objetivo será atualizada como a melhor até aquele momento caso a sua função objetivo seja menor.

Esse movimento também analisa o deslocamento da parada para mais um período à direita (caso o candidato da direita tenha sido aceito como melhor) ou o deslocamento para mais um período à esquerda (caso o candidato da esquerda tenha sido aceito como melhor) e novamente calcula-se o valor da sua função objetivo e compara-se com o menor valor de função objetivo até aquele momento. Havendo sucesso, a função objetivo é atualizada e o deslocamento é novamente repetido. A Figura 19 contém uma ilustração do algoritmo do conjunto de movimentos dois.

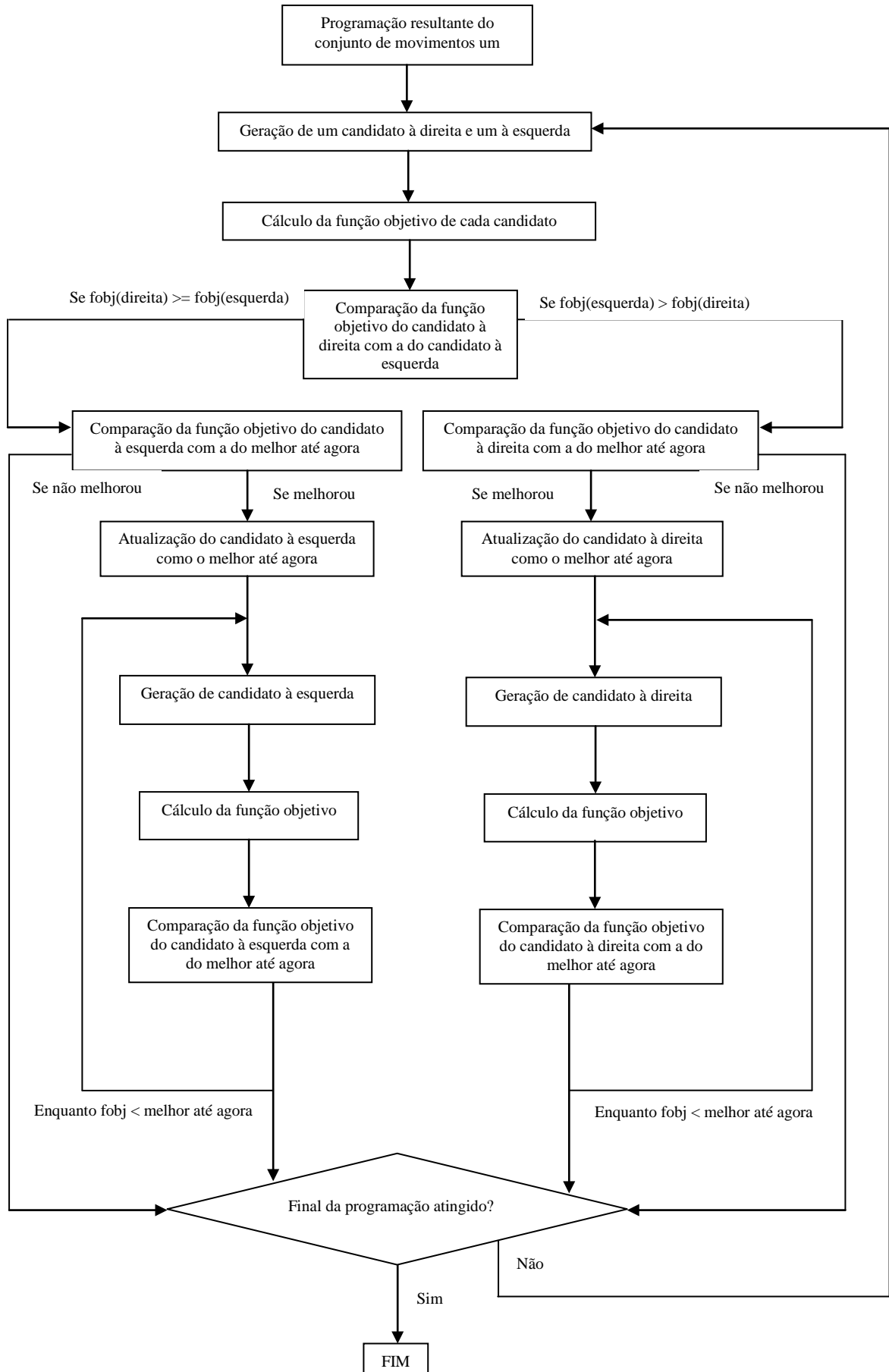


Figura 19– Algoritmo do conjunto de movimentos dois.

3.2.2.5 Estrutura geral do algoritmo

Buscando identificar a melhor abordagem computacional, foram investigadas diferentes alternativas de algoritmo envolvendo o conjunto de movimentos apresentados, tal como está ilustrado na Figura 20.

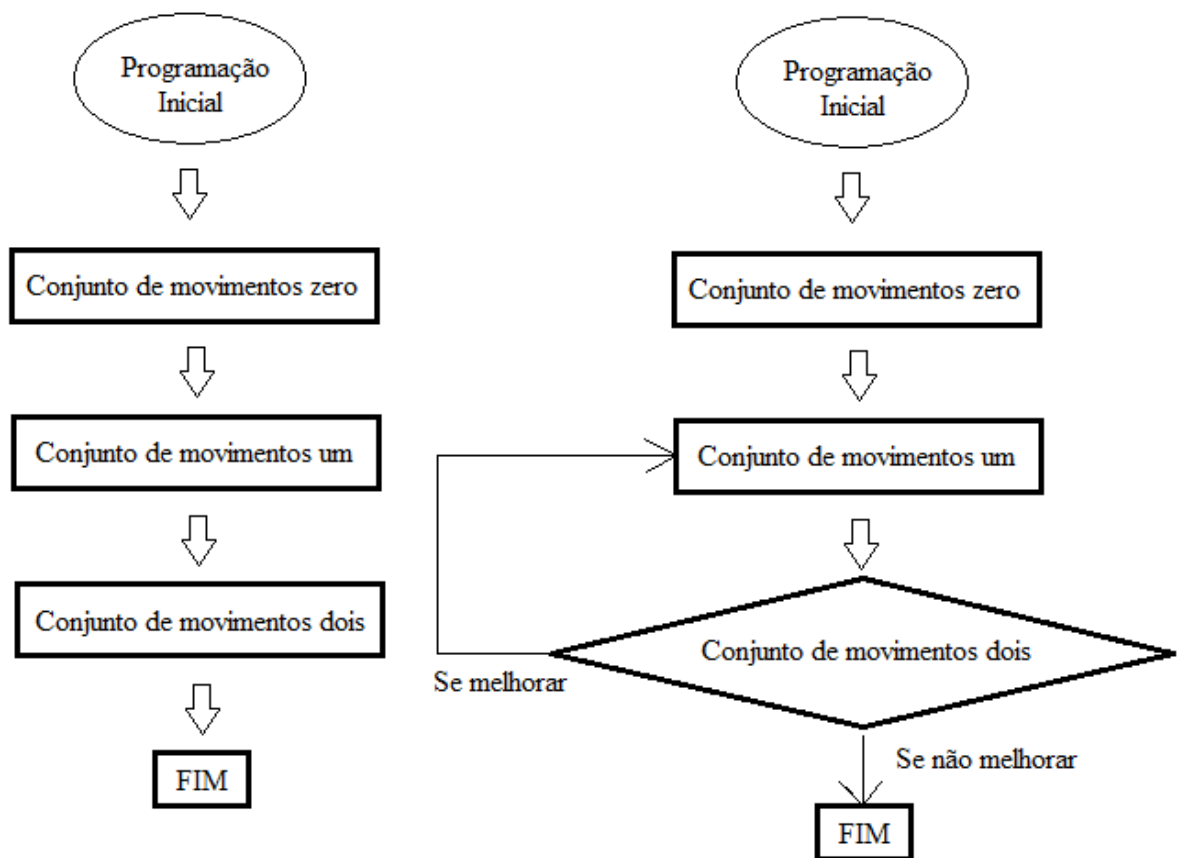


Figura 20– Sequências possíveis dos movimentos para a metodologia heurística.

Conforme visto na Figura 20, a metodologia heurística pode se dar de duas formas distintas: a sequência do conjunto de movimentos zero, um e dois ou a sua forma recursiva.

Partindo-se de uma programação inicial onde todos os trocadores da rede encontram-se em operação, os conjuntos de movimentos zero, um e dois se dão nesta sequência, e esta corresponde a metodologia heurística normal.

A metodologia heurística recursiva também se inicia com uma programação onde todos os trocadores da rede encontram-se em operação e também o conjunto de movimentos zero, um e dois são realizados nesta sequência, no entanto ocorre a repetição do conjunto de movimentos um e dois até que não haja mais melhoria em termos de função objetivo em relação ao conjunto de movimentos um e dois anterior.

3.2.2.6 Gerenciamento das restrições

A rotina das restrições na metodologia heurística foi inserida em cada um dos movimentos do autônomo para otimização da programação das paradas. A verificação das restrições se deu pela eliminação de cada candidato que não obedecesse a alguma das restrições.

3.2.3 Metodologia híbrida

Foram estudadas também diferentes combinações da metodologia estocástica com a metodologia heurística visando aumentar a eficiência dos algoritmos aplicados ao problema da programação das paradas em questão.

O procedimento heurístico seguido dos algoritmos genéticos teve como objetivo gerar populações iniciais de indivíduos que permitissem uma progressão melhor do algoritmo genético ao longo da busca (pré-processamento).

O procedimento de algoritmo genético seguido do heurístico teve como objetivo aprimorar os resultados obtidos pelo algoritmo genético, dando um “polimento” na solução encontrada (pós-processamento).

Por último, considerou-se também a interação da metodologia heurística antes e depois do algoritmo genético (pré/pós processamento). A Figura 21 ilustra cada alternativa de metodologia híbrida empregada.

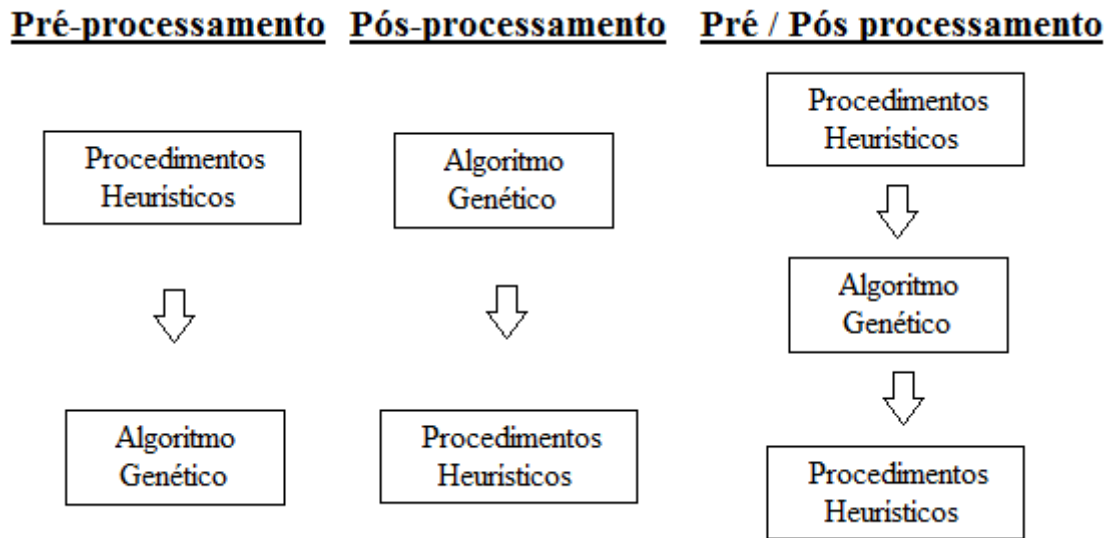


Figura 21– Esquemático das metodologias híbridas.

4 RESULTADOS

Nos capítulos anteriores foram descritos o modelo do simulador pseudo-estacionário e as estratégias de otimização utilizadas na programação das paradas de redes de trocadores de calor desenvolvidas no presente trabalho. Este capítulo tem como objetivo mostrar uma série de resultados da aplicação desses algoritmos, de modo a analisá-los e demonstrar seu alcance.

4.1 Casos investigados

Os exemplos de rede investigados encontram-se listados na Tabela 3. A descrição completa de cada exemplo encontra-se no Anexo B.

Tabela 3 – Casos investigados.

Caso	Fonte	Número de trocadores
1	Smaïli et al. (2002a)	3
2	Assis et al. (2013a)	6
3	Liporace e Oliveira (2007) e Oliveira Filho (2007)	35
4	Smaïli et al. (2001a) e Smaïli et al. (2002b)	14
5	Smaïli et al. (2002a)	1
6	Smaïli et al. (2002a) e Lavaja e Bagajewicz (2004)	10

4.2 Metodologia estocástica

4.2.1 Calibração de parâmetros

Os seguintes parâmetros do algoritmo genético foram estudados a fim de se obter os seus melhores valores para o presente problema da programação das paradas: probabilidade de *crossover*, probabilidade de mutação, tamanho da população e parâmetro de controle da população inicial (*limpop*). Também estudou-se a importância do elitismo para o presente problema. Analisou-se cada um desses parâmetros através da rede contida no caso base 3. Esta rede representa uma bateria de pré-aquecimento real de uma refinaria brasileira, sendo um problema de maior porte típico dos desafios encontrados na prática. Por esta razão, esse caso foi empregado como base nas presentes investigações.

Cada problema foi resolvido em triplicata sendo reportado nos resultados o valor médio acompanhado de uma barra de erro indicando o respectivo desvio padrão. A análise dos resultados em triplicata foi necessária devido aos componentes aleatórios dos algoritmos genéticos.

4.2.1.1 Probabilidade de *crossover*

A probabilidade de *crossover* foi estudada com os valores de 70 %, 80 % e 90 %. Neste caso, utilizou-se a probabilidade de mutação de 0,02 %, o tamanho da população de 15 indivíduos, o parâmetro de controle da população inicial de valor 0, o número máximo de gerações de 200 e sem elitismo. Tais resultados da probabilidade de *crossover* encontram-se na Figura 22.

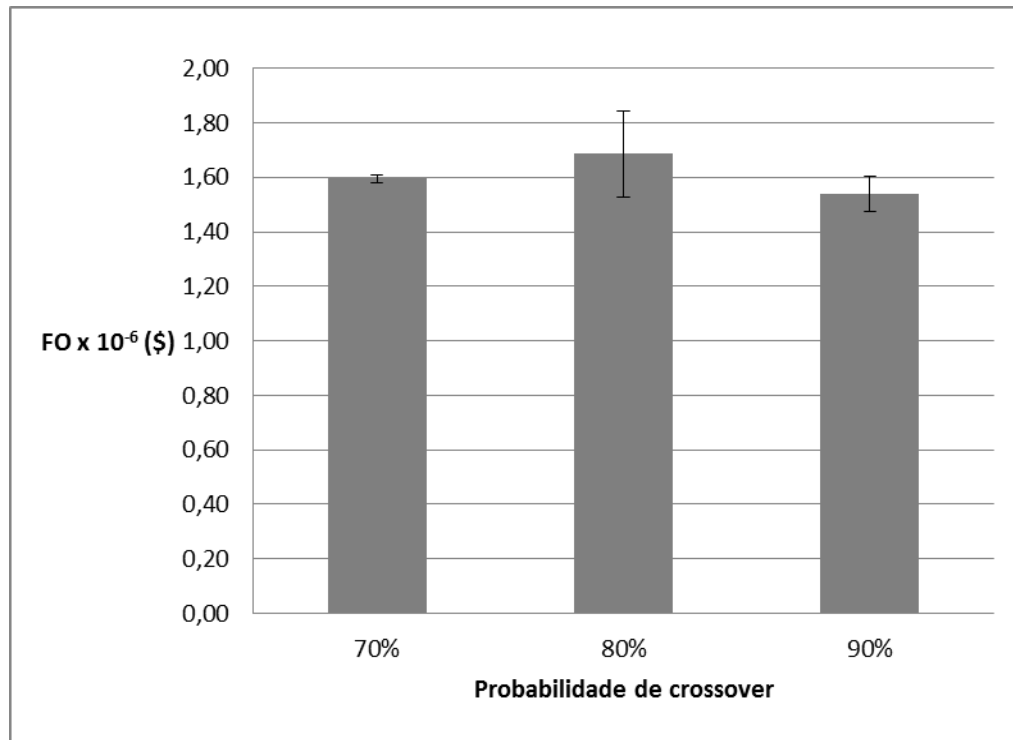


Figura 22– Análise da probabilidade de *crossover*.

Com base na Figura 22, é perceptível, no geral, que melhores resultados foram alcançados para uma probabilidade de *crossover* de 90 % apesar das diferenças na função objetivo não serem tão significativas entre os diferentes valores analisados.

4.2.1.2 Probabilidade de mutação

A probabilidade de mutação foi estudada com os valores de 0,01 %, 0,02 % e 0,04 %. Neste caso, utilizou-se a probabilidade de *crossover* de 90 % (melhor valor encontrado na análise anterior), o tamanho da população de 15 indivíduos, o parâmetro de controle da população inicial de valor 0, o número máximo de gerações de 200 e sem elitismo. Tais resultados da probabilidade de mutação encontram-se na Figura 23.

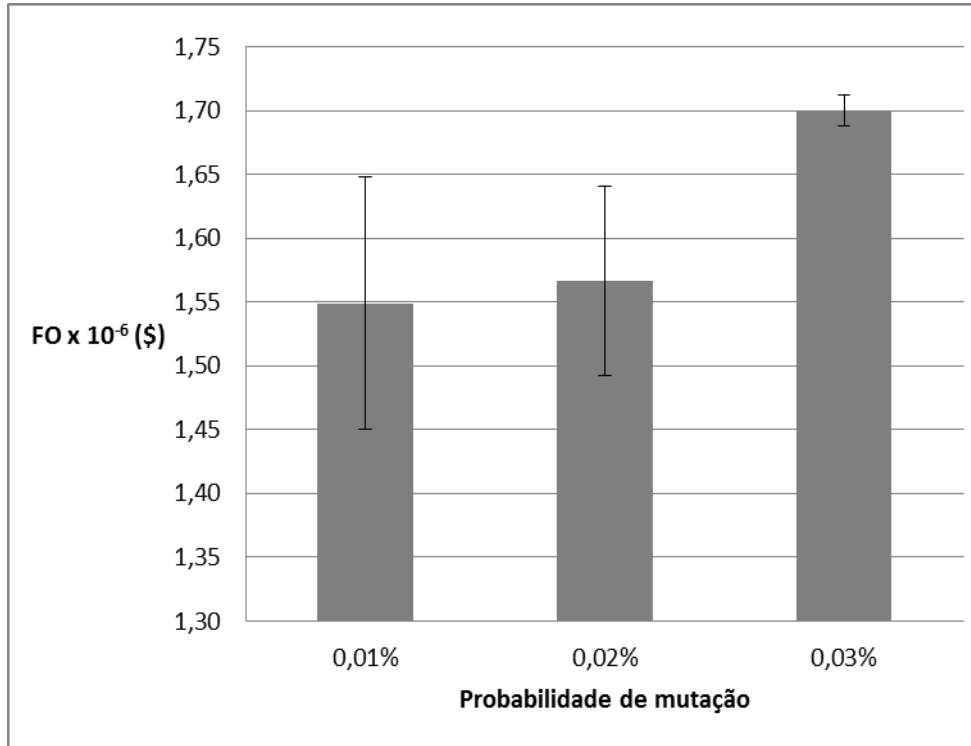


Figura 23– Análise da probabilidade de mutação.

Pela análise do gráfico da Figura 23, é notório que o aumento da probabilidade de mutação piora os valores de função objetivo. Diferentemente do parâmetro anteriormente analisado, a diferença nos valores de função objetivo são mais significativos, sendo nitidamente pior o valor de 0,03 % e, portanto entre os demais valores analisados optou-se pelo valor de 0,01 % para a probabilidade de mutação como o mais adequado para o presente problema. Observa-se também que as barras de erros confirmam essa análise dos resultados.

4.2.1.3 Tamanho da população

O tamanho da população foi estudado para os valores de 10, 20 e 30. Neste caso utilizou-se a probabilidade de *crossover* de 90 %, a probabilidade de mutação de 0,01 % (melhor valor encontrado na análise anterior), o parâmetro de controle da população inicial de valor 0, o número máximo de gerações de 200 e sem elitismo. Tais resultados do tamanho da população encontram-se na Figura 24.

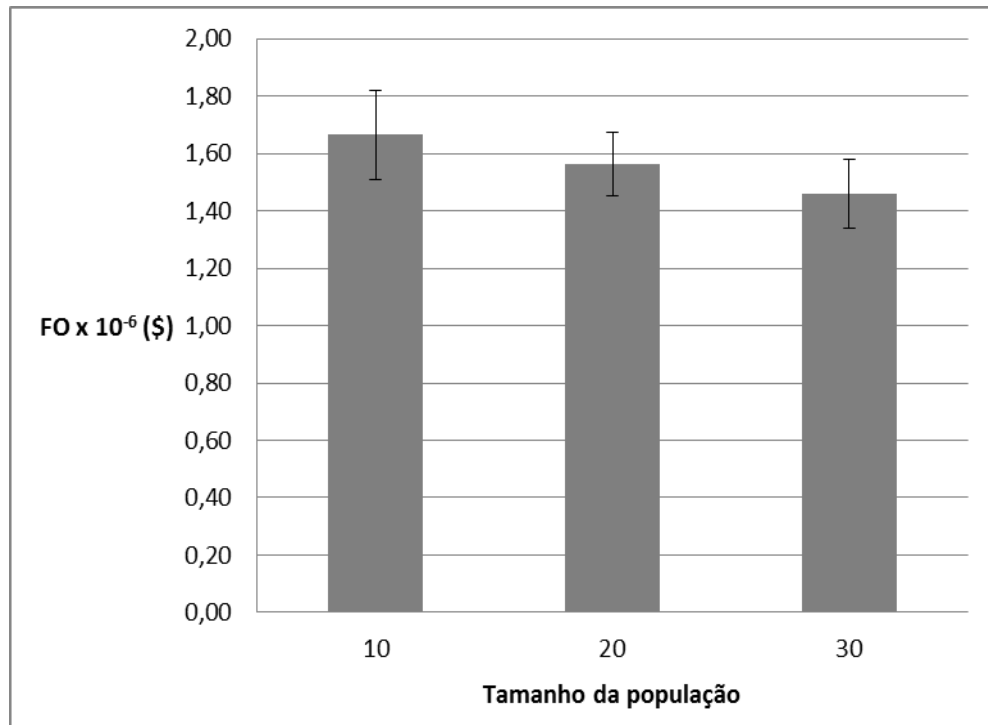


Figura 24– Análise do tamanho da população.

Entre os valores de tamanho da população investigados, a melhor opção encontrada corresponde a 30 indivíduos. Foram excluídos valores ainda maiores de tamanho de população, visando evitar um esforço computacional excessivo.

4.2.1.4 Parâmetro de controle da população inicial (*limpop*)

A programação das paradas resultantes do caso base 3 investigado com os parâmetros acima descritos (probabilidade de *crossover*, probabilidade de mutação e tamanho da população) possuem diferentes percentuais de limpeza que foram calculados da seguinte forma:

$$\% \text{ de limpezas} = \frac{\text{número de limpezas}}{(\text{número de períodos} \times \text{número de trocadores})} \quad (4.1)$$

Com base em tais percentuais de limpeza dos casos investigados do presente problema, notou-se que o percentual de limpeza da programação encontrava-se na faixa de 1

% a 3 % e por isso optou-se como melhor valor para o parâmetro de controle da população inicial 1 %.

Visando avaliar a efetividade do parâmetro abordado, estudou-se o parâmetro de controle da população inicial com 1 % de paradas e com 50 % de paradas (valor puramente randômico). Em ambos os casos utilizou-se a probabilidade de *crossover* de 90 %, a probabilidade de mutação de 0,01 %, o tamanho da população de 30 indivíduos (melhor valor encontrado na análise anterior), o número máximo de gerações de 200 e sem elitismo. Tais resultados do parâmetro de controle da população inicial de 1 % e 50 % encontram-se na Figura 4.4.

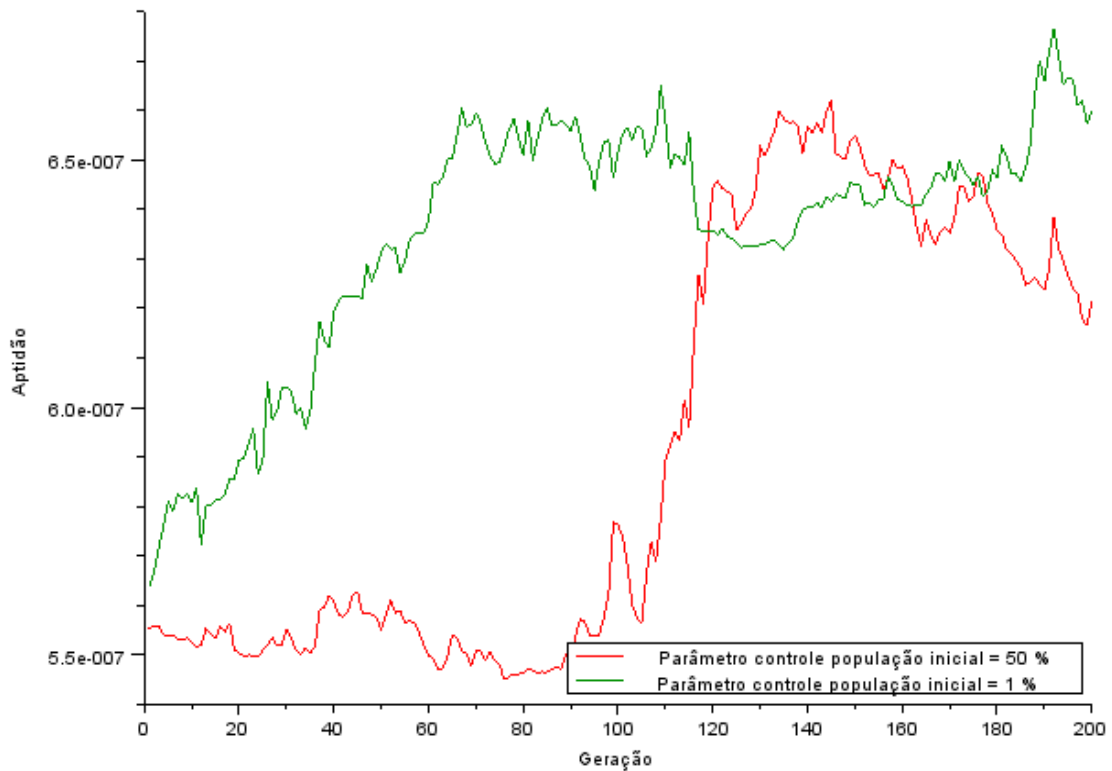


Figura 25– Análise do parâmetro de controle da população inicial.

Analisando a Figura 25 é notório que a otimização com população inicial de 50 % de limpezas tem como resultado uma evolução muito mais lenta, pois seus valores de aptidões são baixos comparados com os valores de aptidão encontrados quando a otimização utiliza uma população inicial com 1 % de limpezas. Desta forma, conclui-se que o valor de 1 % para o parâmetro de controle da população inicial é um valor adequado para o presente problema.

Sabe-se que o parâmetro de controle da população inicial também é influenciado pelo nível de deposição da rede e assim para diferentes redes é possível obter percentuais de limpeza bem distintos na programação resultante, devendo este parâmetro ser calibrado caso a caso.

4.2.1.5 Elitismo

A fim de se analisar a importância da manutenção do melhor indivíduo encontrado nas gerações futuras e uma vez que a otimização com elitismo ser propensa à convergência prematura dos resultados, primeiramente estudou-se a otimização com elitismo em diferentes valores de probabilidade de mutação, a fim de se aumentar a variabilidade genética, e posteriormente comparou-se o melhor resultado do caso com elitismo com o caso sem elitismo.

Estudou-se o elitismo com os seguintes valores de probabilidade de mutação: 0,01 %, 0,02 % e 0,04 %. Em todos os casos utilizou-se a probabilidade de *crossover* de 90 %, o tamanho da população de 30 indivíduos, o parâmetro de controle da população inicial de valor 1 %, o número máximo de gerações de 200. Tais resultados da otimização com elitismo em diferentes valores de probabilidade de mutação encontram-se na Figura 4.5.

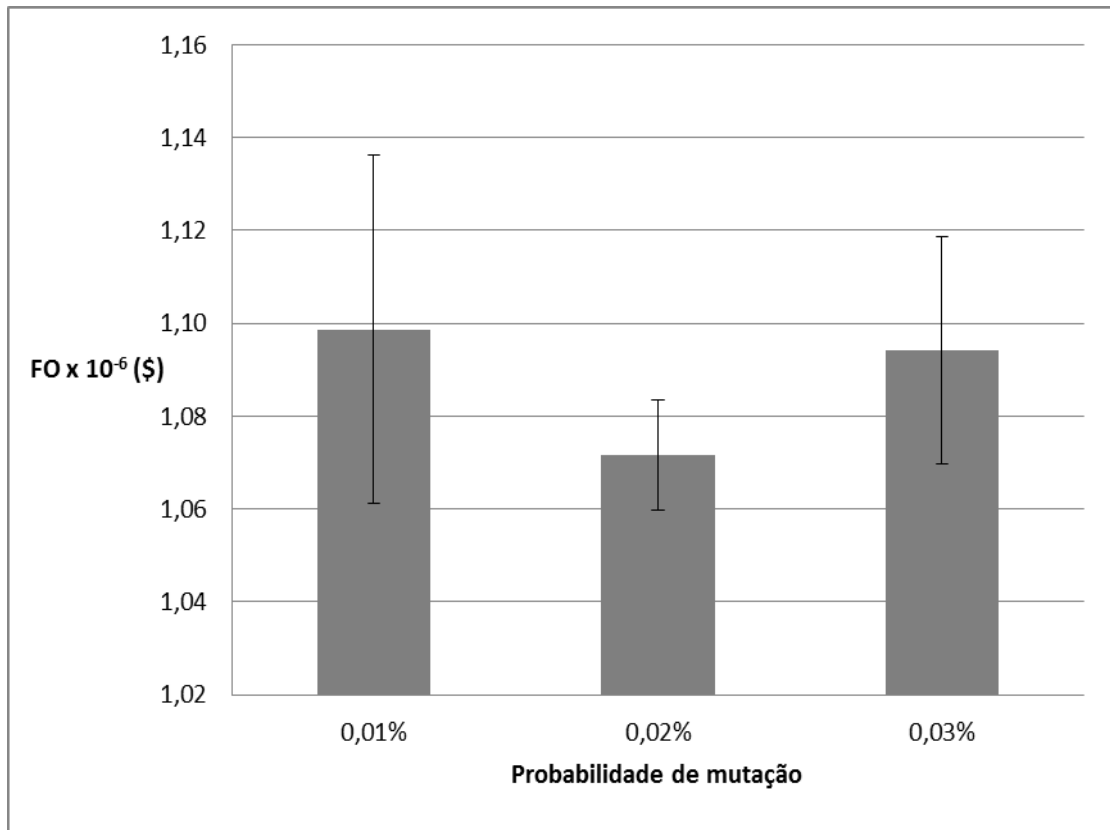


Figura 26– Análise da otimização com elitismo com diferentes valores de probabilidade de mutação.

Percebe-se, pela análise da Figura 26, que a otimização empregando o elitismo atinge resultados levemente melhores quando utiliza uma probabilidade de mutação de 0,02 %, pois atinge menores valores de função objetivo.

Tais resultados da otimização com elitismo e sem elitismo, em termos de função objetivo, encontram-se na Figura 27.

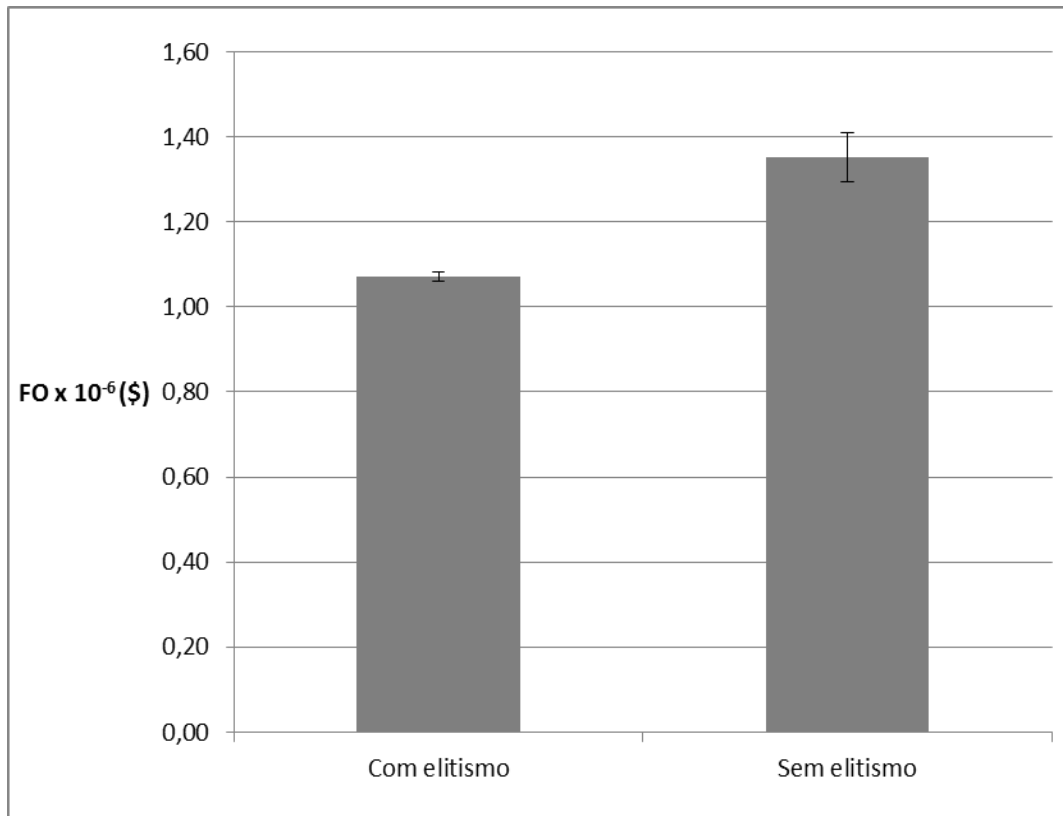


Figura 27– Análise do elitismo.

Portanto conclui-se que o caso com elitismo atinge melhores resultados do que o caso sem elitismo, pela comparação da função objetivo de ambos os casos como visto na Figura 27.

4.2.1.6 Parâmetros calibrados

Com base nos estudos acima apresentados conclui-se como melhor caso para o presente problema da programação das paradas os seguintes valores dos parâmetros do algoritmo genético de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4– Melhores valores encontrados dos parâmetros para o presente problema.

Parâmetro AG	Valor
Probabilidade de <i>crossover</i>	90 %
Probabilidade de mutação	0,02 %
Tamanho da população	30
Parâmetro de controle da população inicial	1 %
Elitismo	sim

4.3 Metodologia heurística

4.3.1 Análise da sequência dos conjuntos de movimentos

A evolução da programação da rede após cada conjunto de movimentos da metodologia heurística pode ser visualizada nas Figuras 28, 29 e 30 relativas ao caso base 3. A Tabela 5 contém as variações correspondentes da função objetivo e o número de simulações empregadas.

Visando facilitar a visualização das programações, os trocadores 32 a 44, 48, 50 a 54 e 57 a 61 encontram-se omissos, uma vez que não houve parada em nenhum período.

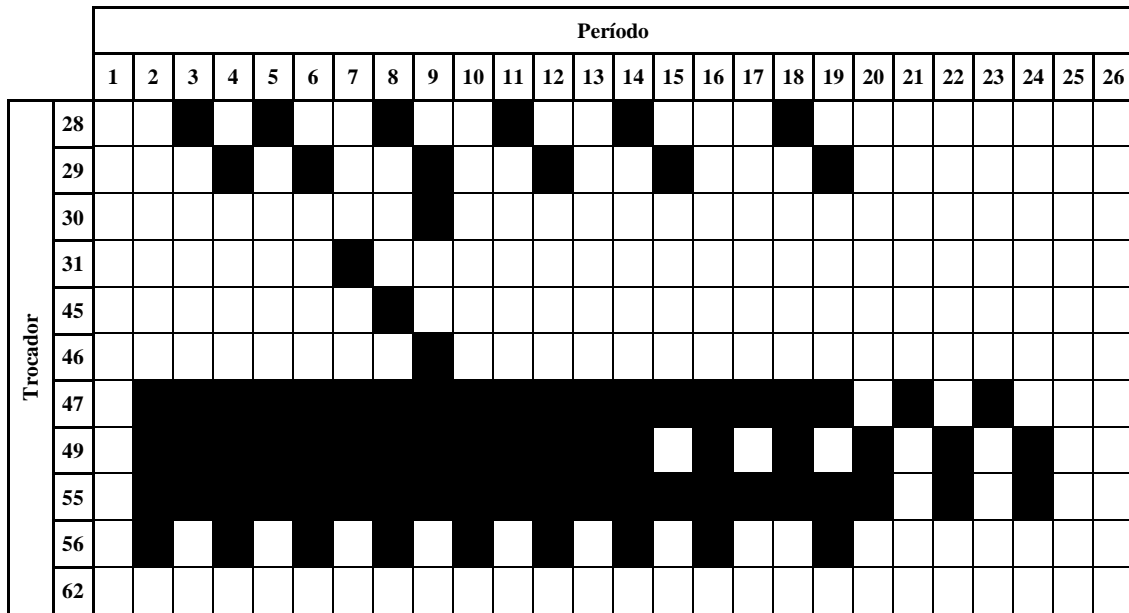


Figura 28– Programação das paradas após conjunto de movimentos zero.

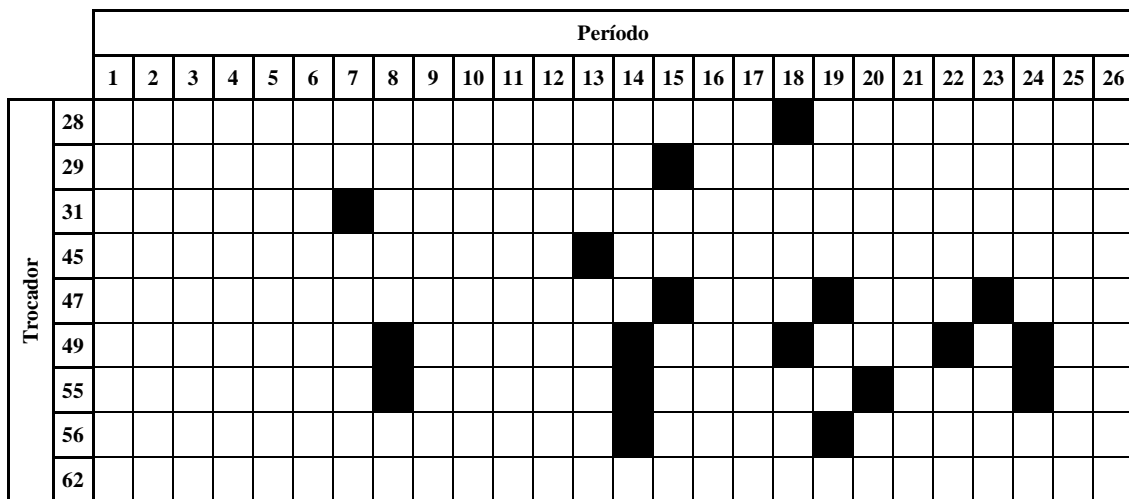


Figura 29– Programação das paradas após conjunto de movimentos um.

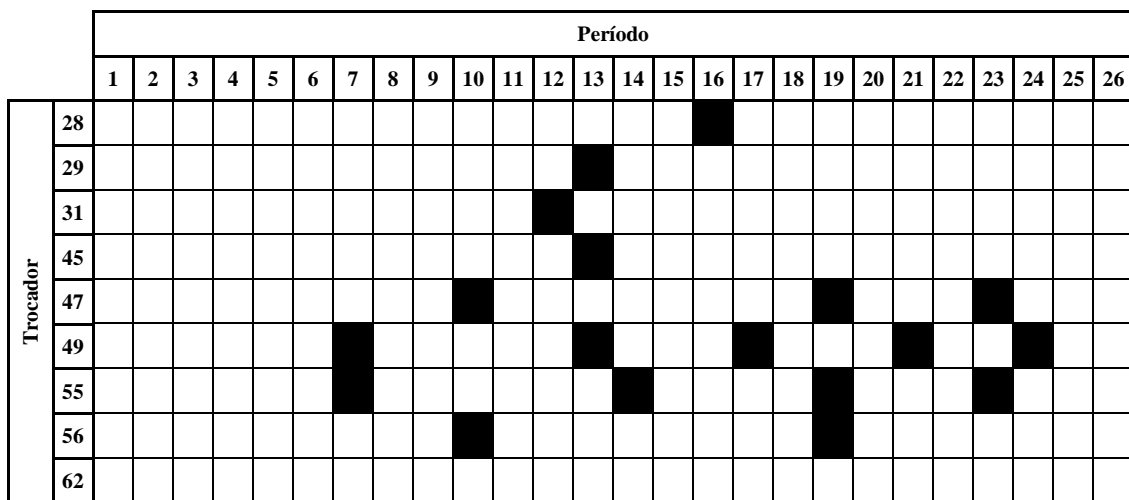


Figura 30– Programação das paradas após conjunto de movimentos dois.

Tabela 4. 1 – Resultados da metodologia heurística para o caso base 3.

Caso	FO (\$)	EC*
Início	1.800.618	1
Após conjunto de movimentos zero	1.397.724	910
Após conjunto de movimentos um	1.066.434	910
Após conjunto de movimentos dois	1.021.469	61
Total		1882

*EC (esforço computacional) baseado no número de simulações realizadas

A programação após o conjunto de movimentos zero descrita na Figura 28 contém um grande número de paradas e em sequência (total de 84 paradas) sendo nitidamente um resultado preliminar não realista. Após o conjunto de movimentos um, conforme indica a Figura 29, há um grande “enxugamento” ocasionando um resultado bem mais factível. Finalmente, após o conjunto de movimentos dois, como indicado na Figura 30, há um polimento na direção de um menor valor de função objetivo.

Pela análise da Tabela 5, nota-se a redução gradual da função objetivo no decorrer do conjunto de movimentos zero, um e dois, o que comprova a melhoria, em termos de função objetivo, na execução do conjunto de movimentos da metodologia heurística. Também como indica a Tabela 5 o esforço computacional total da metodologia heurística foi de 1882 simulações, o que corresponde a um número pequeno se comparado, por exemplo, com a metodologia estocástica que nos casos analisados demandou 6000 simulações.

4.3.2 Ordenação dos trocadores de calor

A fim de aperfeiçoamento do resultado heurístico, estudou-se a interferência da ordem dos trocadores na otimização da programação das paradas. Uma vez que os estudos até o presente momento foram realizados com a *string* orientada na ordem direta no qual os trocadores encontram-se na rede, analisou-se a ordem inversa dos trocadores, ou seja, na sequência do final da rede para o início. O estudo da ordem inversa teve como base a tendência das redes de trocadores sujam mais ao final da rede.

Na Figura 31 encontra-se o resultado da otimização com a ordem inversa dos trocadores em termos de função objetivo comparado com a ordem direta descrita no item anterior para o caso base 3.

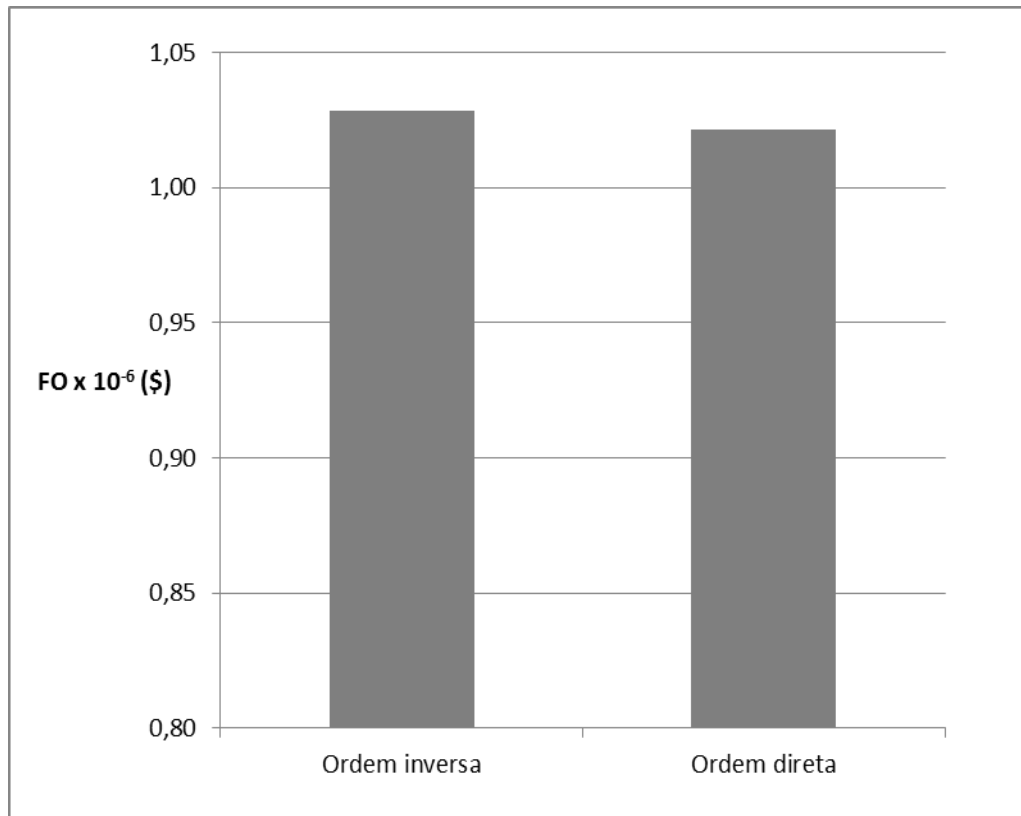


Figura 31– Resultados de diferentes ordenações dos trocadores na metodologia heurística em termos de função objetivo (FO).

Analisando o resultado da ordenação dos trocadores, ao contrário do que se esperava, nota-se que a ordem inversa não foi favorável à metodologia heurística para a otimização da programação das limpezas, embora a diferença seja pequena entre os dois casos (0,7 %). Assim, a ordenação não teve impacto em termos de função objetivo e no presente trabalho manteve-se a ordem direta dos trocadores de calor na rede.

4.3.3 Alternativa heurística investigada

As Figuras 32 e 32 contêm os resultados da metodologia heurística com os três conjuntos de movimentos em sequência e a metodologia heurística na forma recursiva. Nestas figuras é possível visualizar a função objetivo e o número de simulações correspondentes.

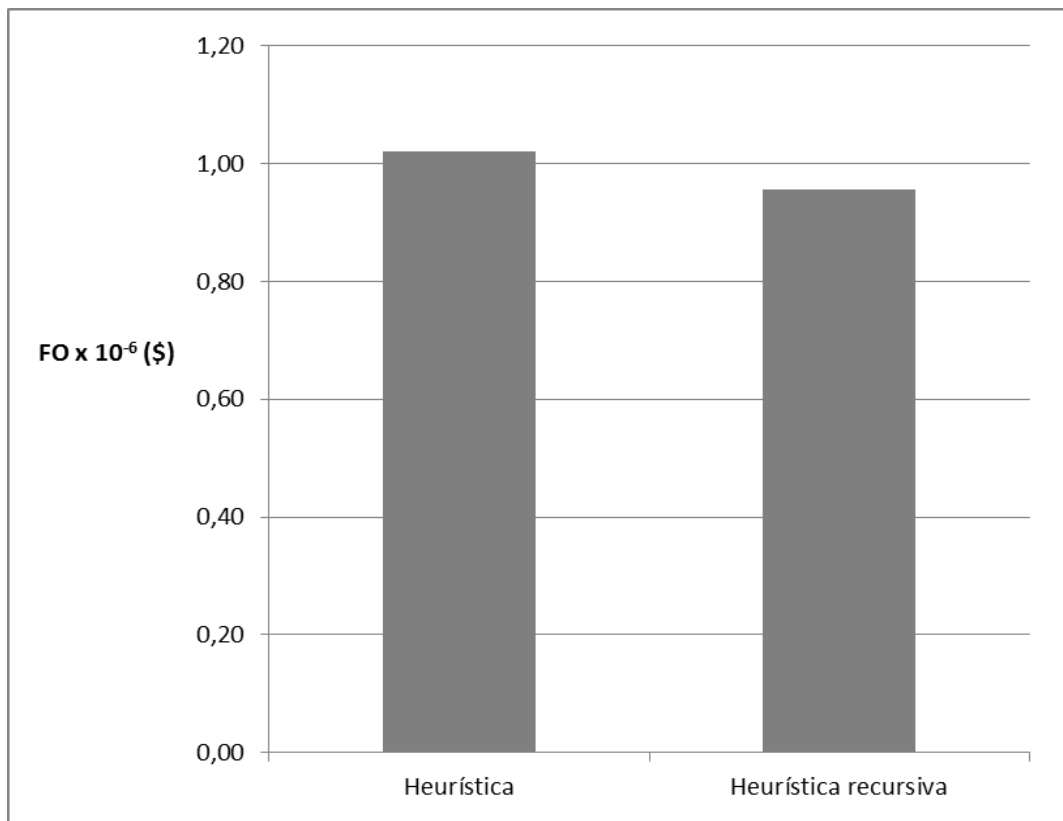


Figura 32– Resultados das heurísticas para o caso base 3 em termos de função objetivo (FO).

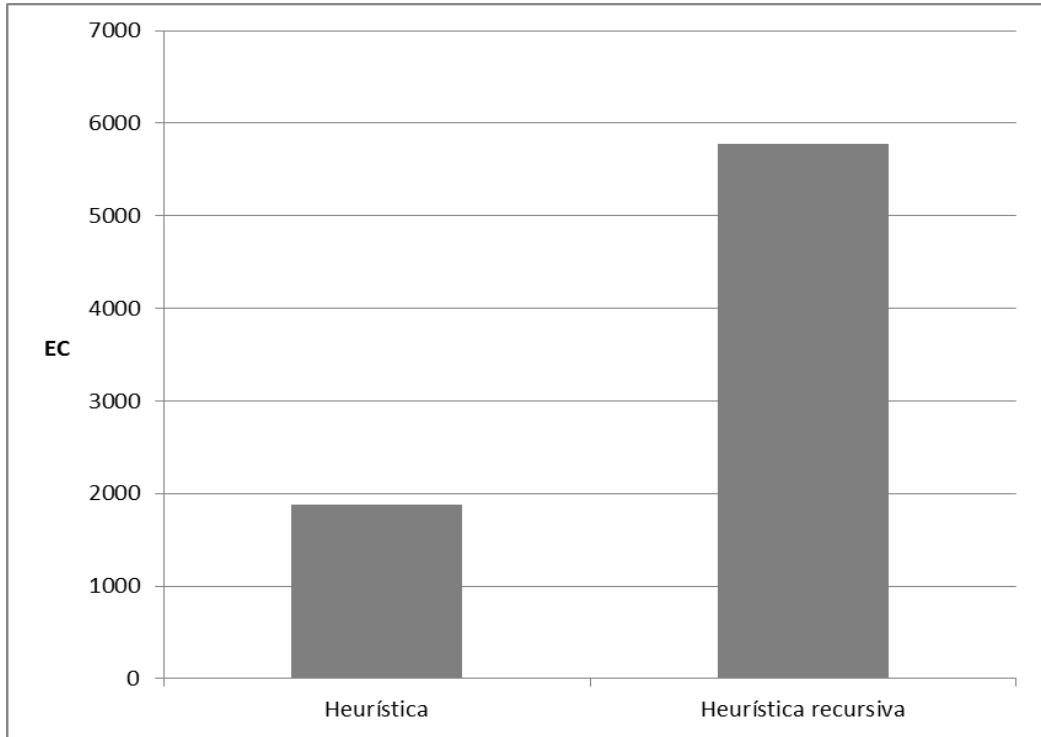


Figura 33 – Resultados das heurísticas para o caso base 3 em termos de esforço computacional (EC).

De forma complementar, a Figura 34 descreve a evolução da função objetivo em cada iteração na alternativa recursiva.

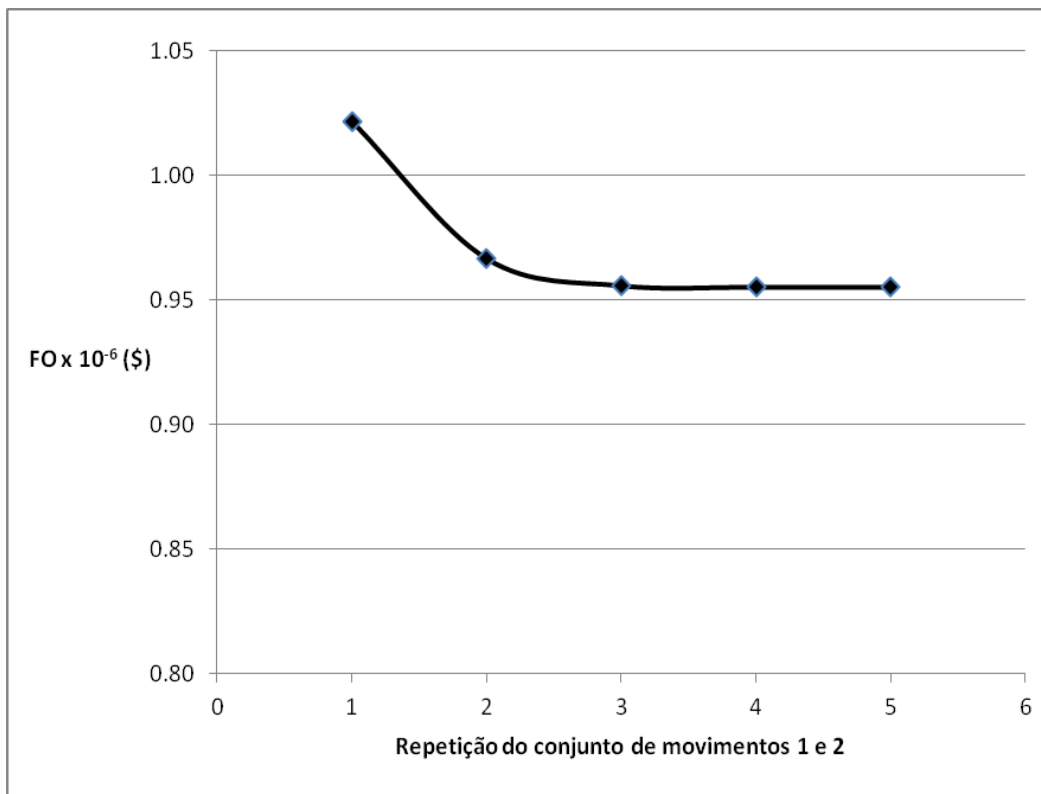


Figura 34– Evolução da heurística recursiva para o caso base 3 em termos de função objetivo (FO).

Comparando a otimização com o conjunto dos três movimentos em sequência com a otimização recursiva, encontra-se uma redução de função objetivo de 6,5 % enquanto o esforço computacional é 67,5 % maior na alternativa recursiva.

4.4 Metodologia híbrida

Tendo como referência os resultados dos estudos das metodologias estocástica e heurística, estudou-se a possibilidade de aprimoramento dos resultados obtidos em ambas as metodologias através do pós-processamento (algoritmo genético + metodologia heurística) e através do pré-processamento (metodologia heurística + algoritmo genético). Também estudou-se o híbrido do pré/pós processamento (metodologia heurística + algoritmo genético + metodologia heurística).

Com o pós-processamento investigou-se a possibilidade de aprimoramento dos resultados obtidos no algoritmo genético através da aplicação posterior do conjunto de movimentos um seguido do conjunto de movimentos dois conforme descrito no Capítulo 3.

Com o pré-processamento no algoritmo genético analisou-se a geração de populações iniciais que levassem a um melhor progresso do algoritmo genético. O pré-processamento foi estudado de 3 formas distintas:

- 1) Realizou-se o conjunto dos movimentos zero e a programação resultante deste movimento passou a ser um indivíduo da população inicial do algoritmo genético. Os demais indivíduos da população inicial foram selecionados de forma aleatória;

- 2) Realizou-se o conjunto dos movimentos zero e a programação resultante deste movimento passou a ser um indivíduo da população inicial do algoritmo genético. Os demais indivíduos a formar a população inicial do algoritmo genético foram os candidatos rejeitados do conjunto de movimentos zero ao serem encontrados candidatos melhores do que eles ao longo da busca. Caso o número de candidatos rejeitados fosse maior do que o tamanho da

população inicial, seriam selecionados os primeiros candidatos rejeitados, e caso fosse menor, a população inicial seria completada com indivíduos aleatórios;

3) Realizou-se o conjunto dos movimentos zero, um e dois em sequência e a programação resultante destes movimentos passou a ser um indivíduo da população inicial do algoritmo genético. Os demais indivíduos da população inicial foram selecionados de forma aleatória.

Na metodologia híbrida do pré/pós processamento, os procedimentos heurísticos antes dos algoritmos genéticos consistiram na sequência dos conjuntos de movimentos zero, um e dois enquanto os procedimentos heurísticos depois dos algoritmos genéticos consistiram na sequência dos conjuntos de movimentos um e dois.

Estudou-se a metodologia híbrida do pós-processamento (AG + Heurístico), do pré-processamento (Heurístico + AG) conforme as três formas descritas acima e do pré-processamento com pós-processamento (Heurístico + AG + Heurístico) para o caso base 3. Em todas as metodologias híbridas analisadas utilizou-se a probabilidade de *crossover* de 90 %, a probabilidade de mutação de 0,02 %, o tamanho da população de 30 indivíduos, o parâmetro de controle da população inicial de valor 1 %, o número máximo de gerações de 200 e com elitismo. Da mesma forma que no estudo paramétrico, também foram feitas triplicatas dos resultados a seguir relatados. Nas Figuras 35 e 36 encontram-se os resultados das metodologias híbridas em termos de função objetivo e de esforço computacional (EC), em que o esforço computacional foi medido em relação ao número de simulações realizadas.

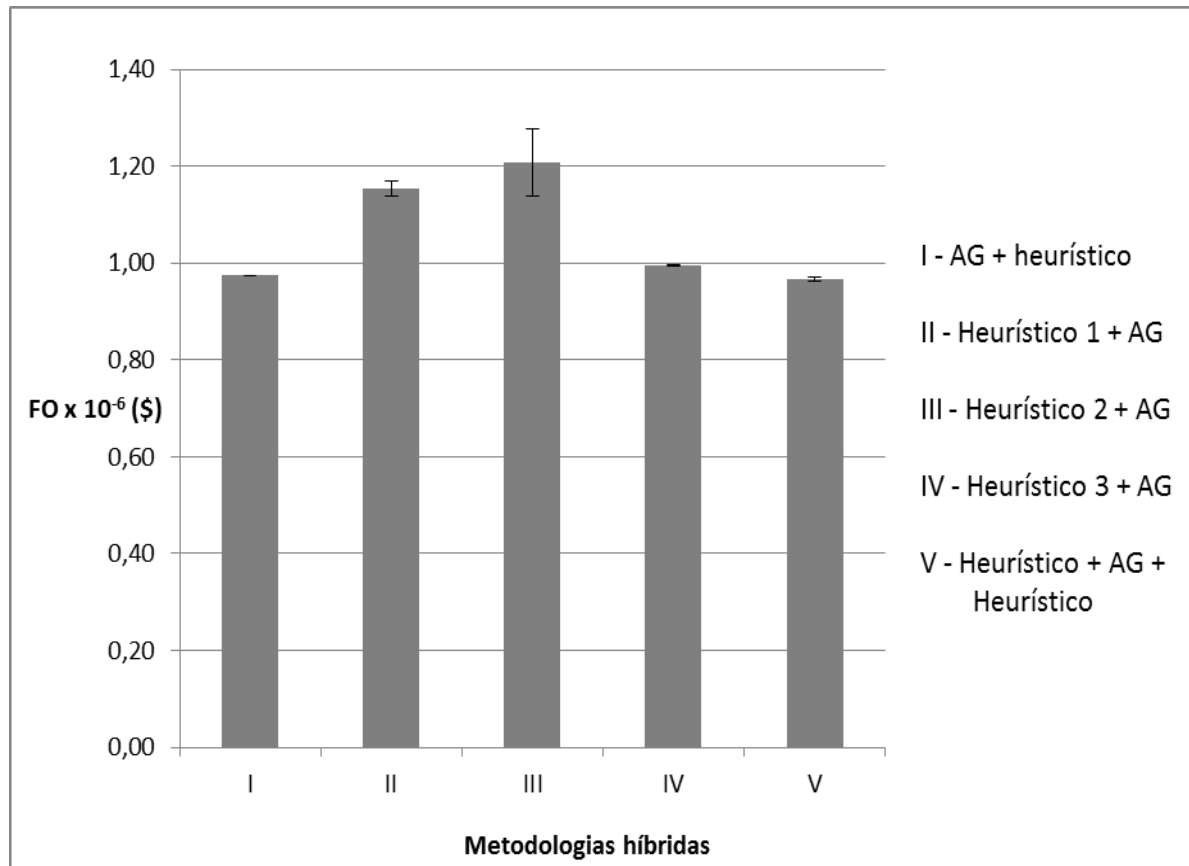


Figura 35– Resultados das metodologias híbridas para o caso base 3 em termos de função objetivo (FO).

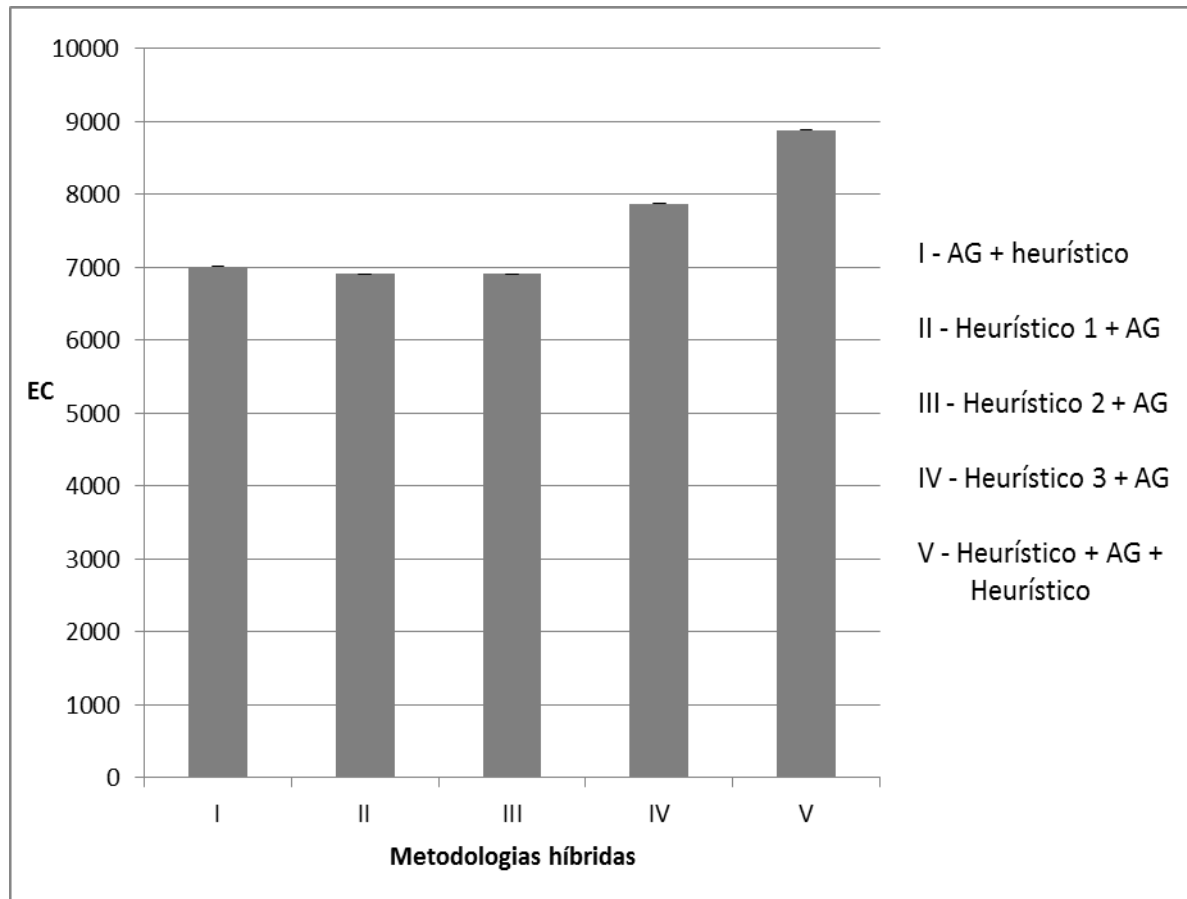


Figura 36– Resultados das metodologias híbridas para o caso base 3 em termos de esforço computacional (EC).

Pela análise da Figura 35, percebe-se que as metodologias híbridas I (pós-processamento), IV (pré processamento com heurístico 3) e V (pré/pós processamento) foram as que atingiram melhores resultados, em termos de função objetivo. Dentre elas, a metodologia híbrida V (pré/pós processamento) foi a que obteve melhor resultado, apesar da pequena diferença.

No entanto com relação ao esforço computacional, analisado na Figura 36, a metodologia híbrida V (pré/pós processamento) foi o pior enquanto as metodologias híbridas I, II e III apresentaram número de simulações menores.

Os estudos híbridos com pré-processamento (estudos II, III e IV) alcançaram piores resultados em relação às demais metodologias, em termos de função objetivo, e acredita-se que isso se deu devido à manutenção do melhor indivíduo nas gerações futuras com o elitismo levando a uma convergência prematura para um ponto de ótimo local de qualidade inferior.

4.5 Comparação de metodologias

A fim de comparar as metodologias empregadas na programação das paradas, empregou-se a rede do caso base 3 com trocadores inicialmente sujos (caso 3.1 conforme Anexo B).

Nas Figuras 37 e 38, encontram-se os melhores resultados de cada metodologia empregada (estocástica, heurística e híbrida) em termos de função objetivo e esforço computacional, respectivamente.

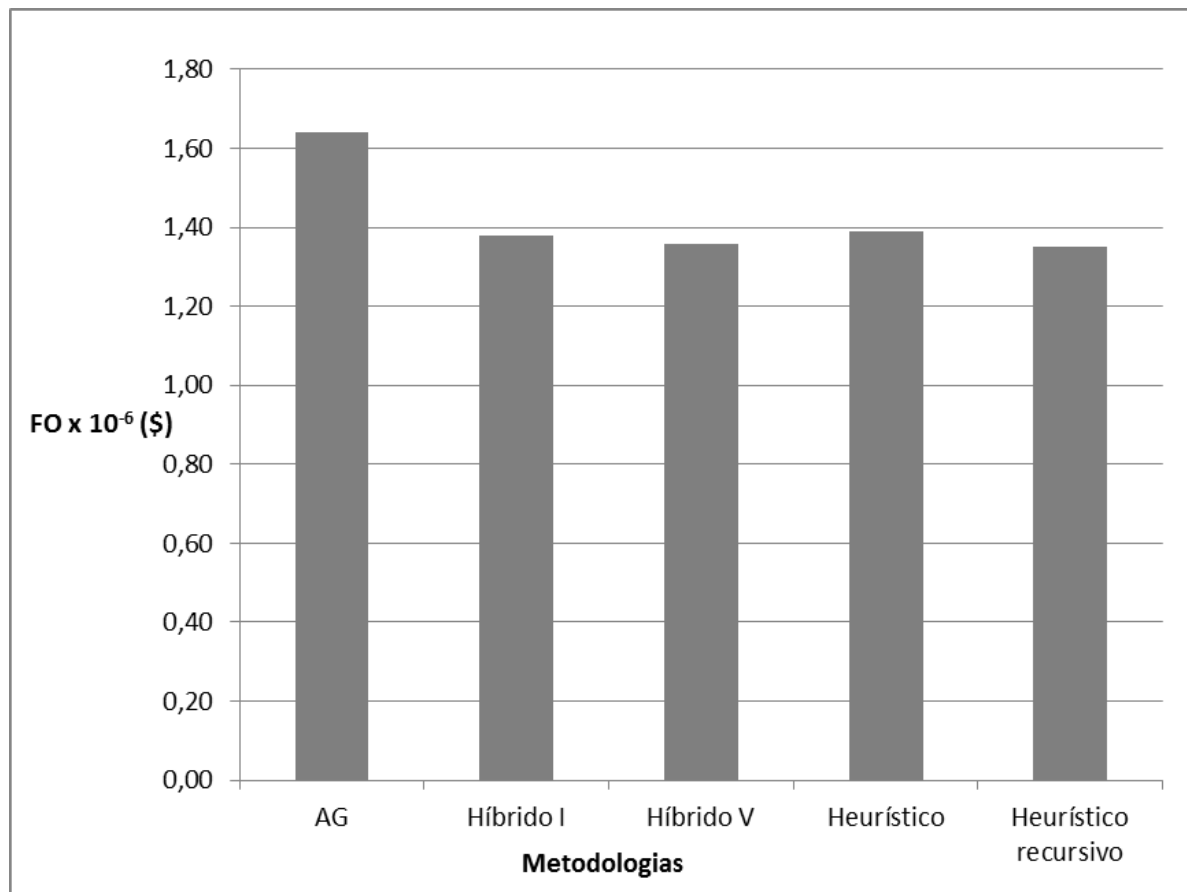


Figura 37– Melhores resultados de cada metodologia em termos de função objetivo (FO). Híbrido I: AG + Heurístico; Híbrido V: Heurístico + AG + Heurístico.

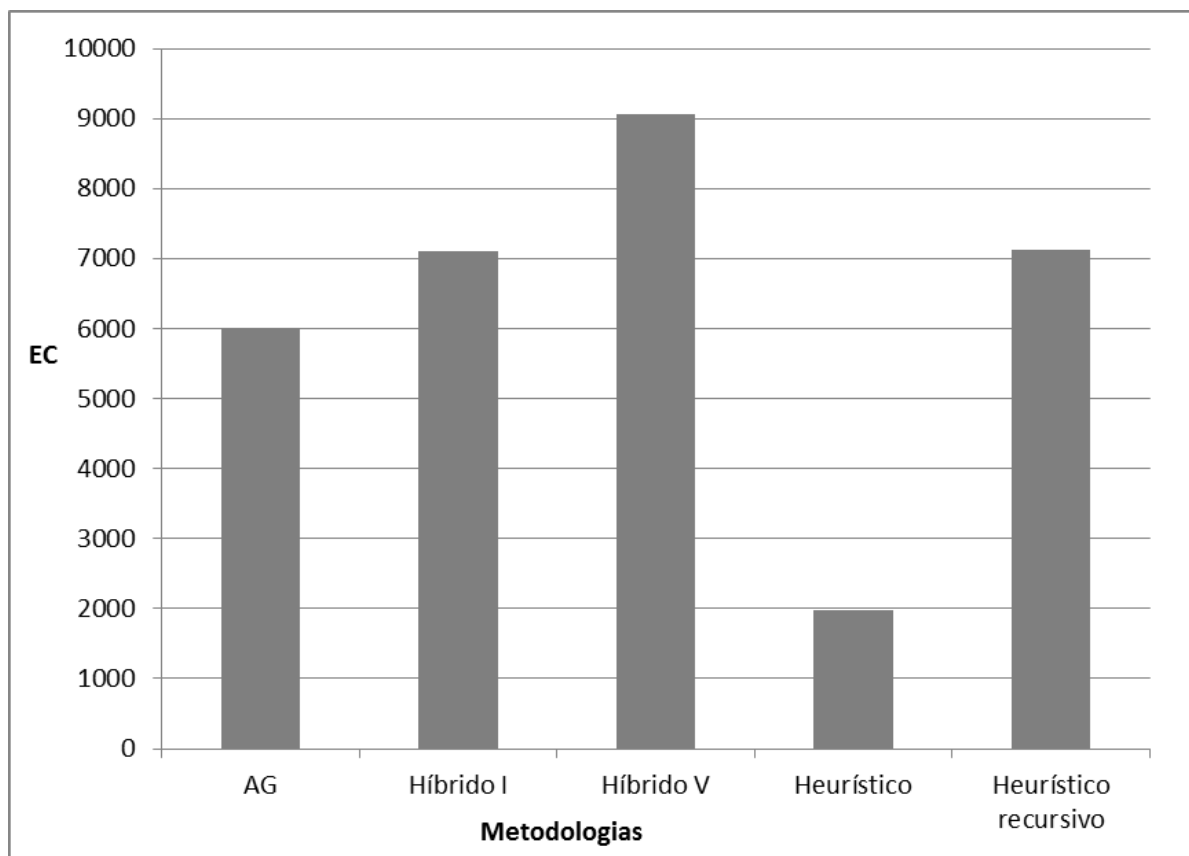


Figura 38– Melhores resultados de cada metodologia em termos de esforço computacional (EC). Híbrido I: AG + Heurístico; Híbrido V: Heurístico + AG + Heurístico.

Pela análise da Figura 37, percebe-se, em termos de função objetivo, que a metodologia estocástica (algoritmo genético) atingiu o pior resultado quando comparado com as outras metodologias analisadas. As metodologias híbrida I, híbrida V, heurística e heurística recursiva apresentaram resultados satisfatórios e semelhantes, no entanto a heurística recursiva foi a que atingiu o melhor resultado.

Com relação ao esforço computacional, que é baseado no número de simulações realizadas, observa-se na Figura 38 que a metodologia heurística atingiu o melhor resultado. Também é notável que as metodologias híbrida I e heurística recursiva obtiveram resultados semelhantes e que a metodologia híbrida V atingiu o pior resultado dentre todas as metodologias consideradas.

4.6 Análise do comportamento da solução

Nas seções a seguir explorar-se-á a análise de padrões de limpeza em relação a diferentes parâmetros do problema, utilizando como referência a rede de 6 trocadores contida no caso base 2.

A fim de facilitar a visualização gráfica da queda da temperatura nos subperíodos de limpeza, aumentou-se a quantidade de instantes do subperíodo de limpeza em três vezes. Dessa forma, a fim de manter o tempo total de análise, triplicou-se a quantidade de instantes do subperíodo de operação e dividiu-se por três a quantidade de dias que contém 1 instante.

Os resultados para o caso base 2 com relação ao perfil de temperatura final da rede e à programação ótima das paradas empregando a metodologia heurística não recursiva encontram-se nas Figuras 39 e 40.

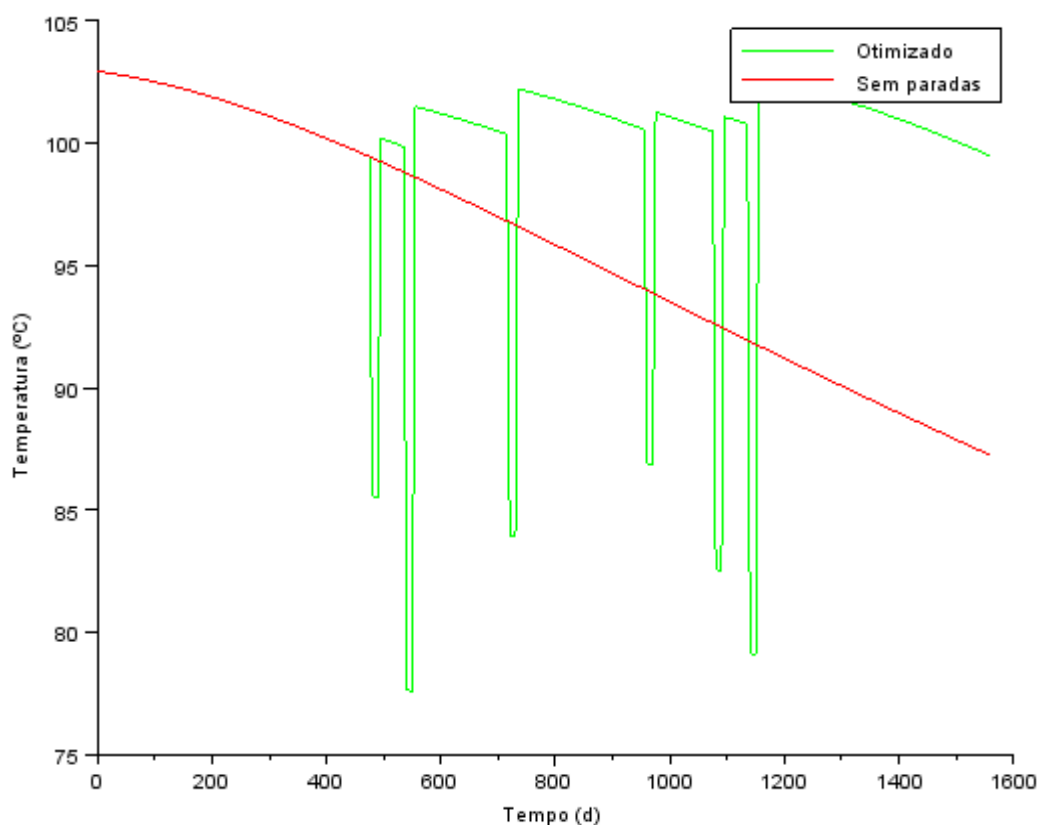


Figura 39– Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

		Período																										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Trocador	9									■								■										
	10													■						■								
	11										■										■							
	12									■									■									
	13													■							■							
	14										■											■						

Figura 40– Programação ótima das paradas para caso base 2 empregando metodologia heurística.

Observando a Figura 40, a programação ótima resultante apresenta certa padronização em relação à quantidade de paradas por trocador, pois todos os trocadores apresentam duas paradas na programação toda. Também é possível perceber que os primeiros trocadores da rede (9 e 12) pararam nos mesmos períodos de tempo, bem como para os trocadores intermediários da rede (10 e 13) e também para os últimos trocadores da rede (11 e 14). Ainda observando a Figura 40, nota-se que como os trocadores estavam inicialmente limpos, a programação ótima resultante não prevê paradas no início do tempo de campanha. Ao final da programação também não houve paradas, o que é satisfatório uma vez que não seria aproveitado o ganho energético da parada. Tal comportamento também é usual nas soluções encontradas na literatura (SMAĪLI et al., 2001a; SMAĪLI et al., 2002a; LAVAJA e BAGAJEWICZ, 2004).

4.6.1 Influência das resistências iniciais de depósito

Com base na rede do caso base 2 com todos os trocadores de calor com a mesma área de troca térmica (400 m^2), empregou-se a rede toda inicialmente suja. A resistência de depósito em todos os trocadores foi de $0,0026 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Os resultados desta análise encontram-se nas Figuras 41 e 42.

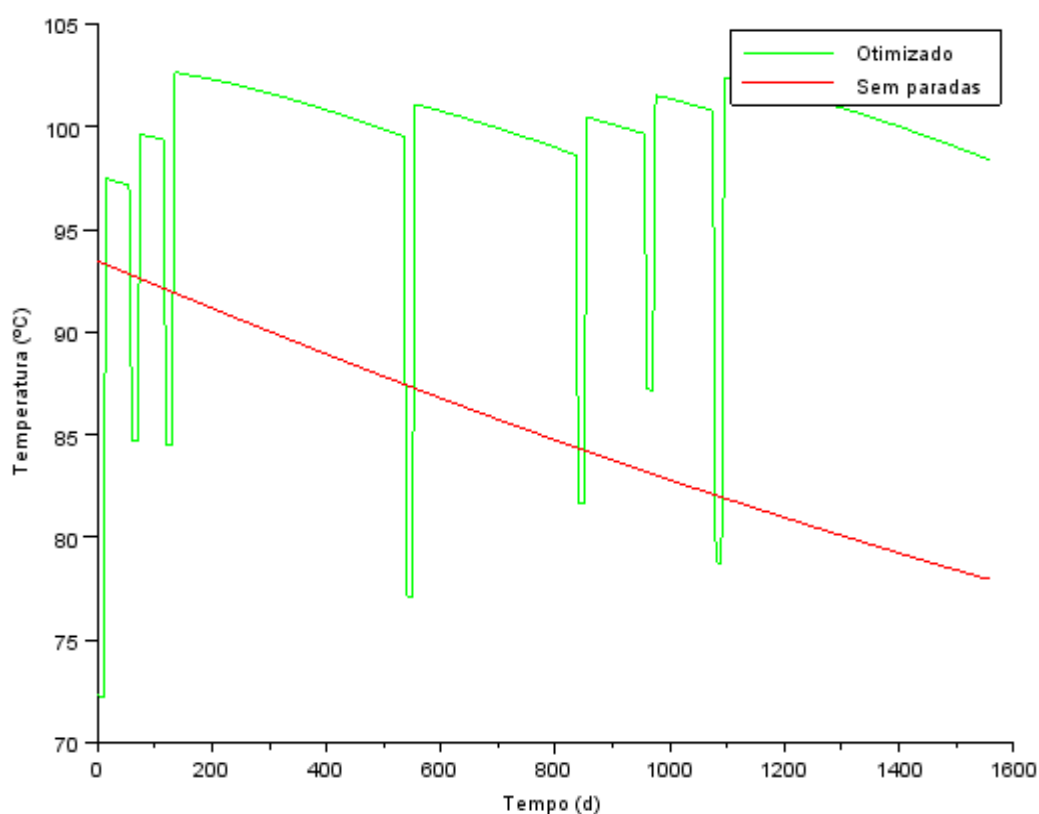


Figura 41– Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

		Período																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Trocador	9		■															■											
	10			■												■													
	11	■									■										■								
	12		■																■										
	13			■													■												
	14	■									■											■							

Figura 42– Programação ótima das paradas para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

Analisando-se os resultados da influência da resistência de depósito, observa-se que a programação ótima resultante obteve paradas no início do tempo de campanha, o que era esperado uma vez que os trocadores estavam inicialmente sujos.

4.6.2 Influência da taxa

Esta análise emprega o mesmo conjunto de dados utilizado no caso base, sendo que emprega maiores valores de taxas nos trocadores ao final da rede. Neste caso a taxa dos trocadores de calor 9, 10, 12 e 13 é de $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K/J}$ e nos trocadores 11 e 14 é de $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ K/J}$. Os resultados desta análise encontram-se nas Figuras 4.22 e 4.23.

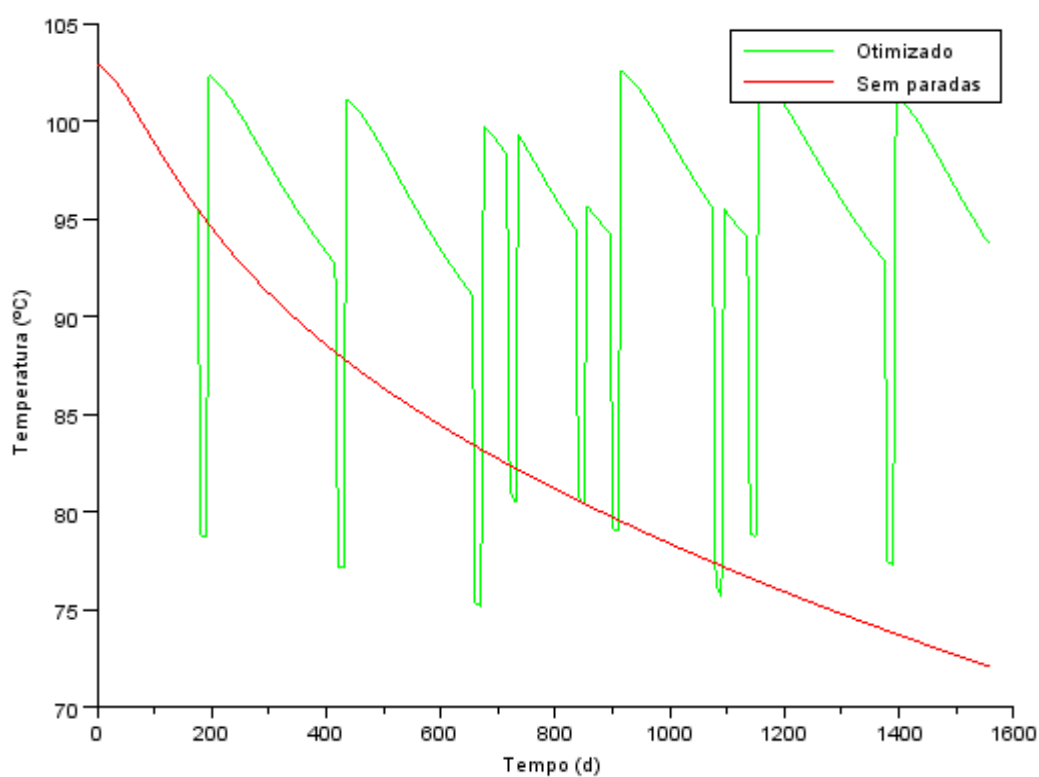


Figura 43– Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

		Período																												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26			
Trocador	9																													
	10																													
	11																													
	12																													
	13																													
14																														

Figura 44 – Programação ótima das paradas para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

Analisando-se os resultados da influência da taxa de deposição, observa-se que nos trocadores com maior taxa (11 e 14) houve uma maior quantidade de paradas (6) em relação aos trocadores com menor taxa (9, 10, 12 e 13).

4.6.3 Influência do custo das paradas

A fim de verificar a influência do custo das paradas no comportamento da solução da programação das paradas, empregou-se o mesmo conjunto de dados utilizado no caso base, sendo que com maior valor de custo das paradas. Utilizou-se o custo da parada como 1000 \$/parada. Os resultados desta análise encontram-se nas Figuras 45 e 46.

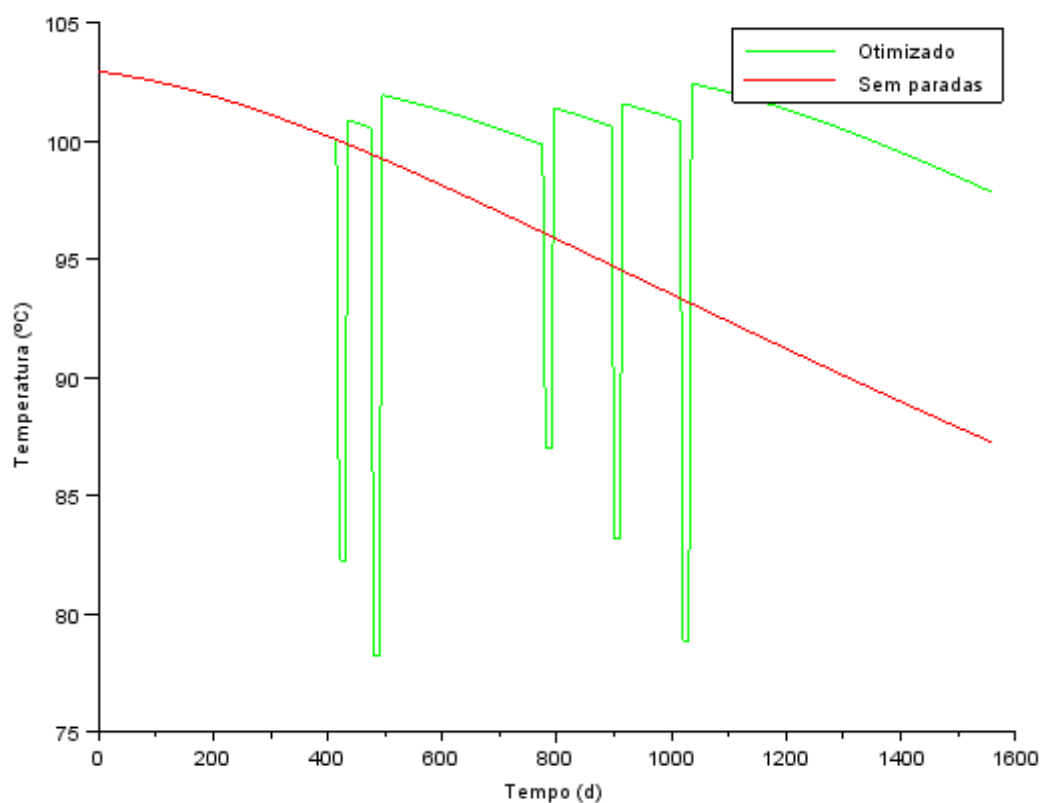


Figura 45– Perfil da temperatura final da rede para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

		Período																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Trocador	9																												
	10																												
	11																												
	12																												
	13																												
	14																												

Figura 46– Programação ótima das paradas para o caso base 2 empregando metodologia heurística.

Observando-se a Figura 46, nota-se que a programação resultante obteve um menor número de paradas (10 paradas) em relação à programação resultante com os custos originais, cujo número de paradas total foi 12. Isso pode ser justificado pelo maior custo da parada implicando em uma redução da sua utilização.

4.6.4 Análise do comportamento da solução para um problema de grande porte

Nesta análise empregou-se o caso base 3.2 conforme descrito no Anexo B. Os resultados para esse caso com relação ao perfil de temperatura final da rede e à programação ótima das paradas empregando a metodologia heurística não recursiva encontram-se nas Figuras 47 e 48.

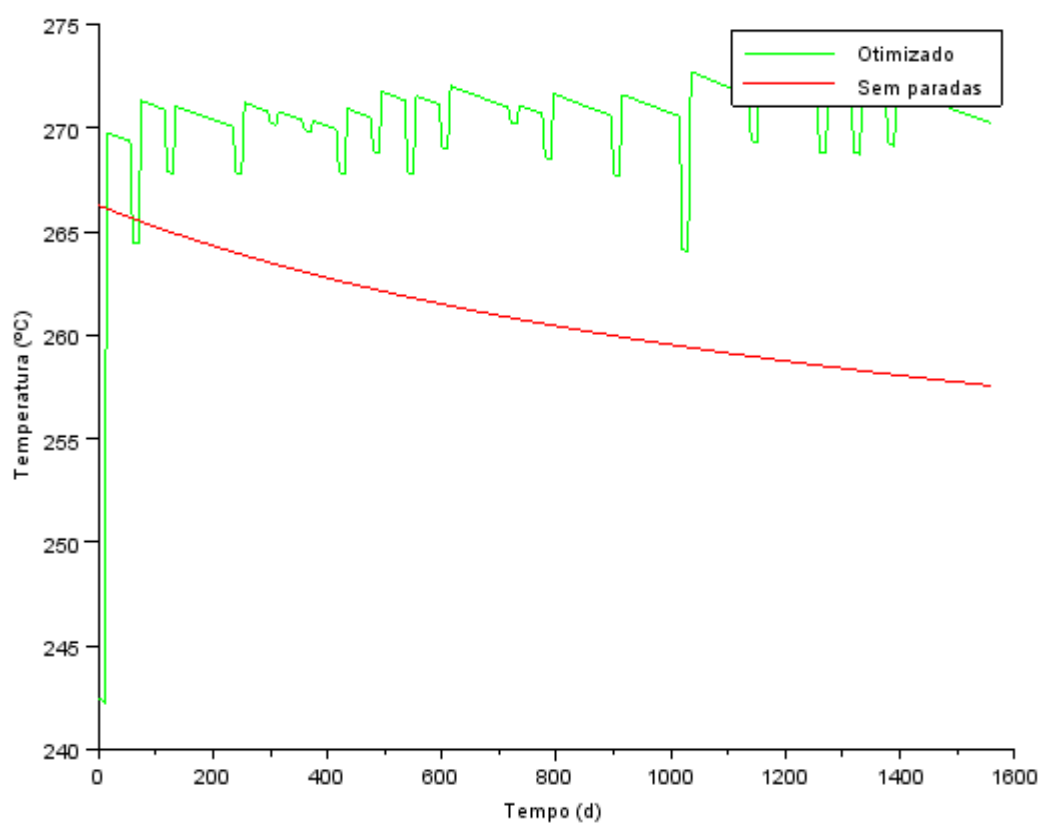


Figura 47– Perfil da temperatura final da rede para o caso base 3 empregando metodologia heurística.

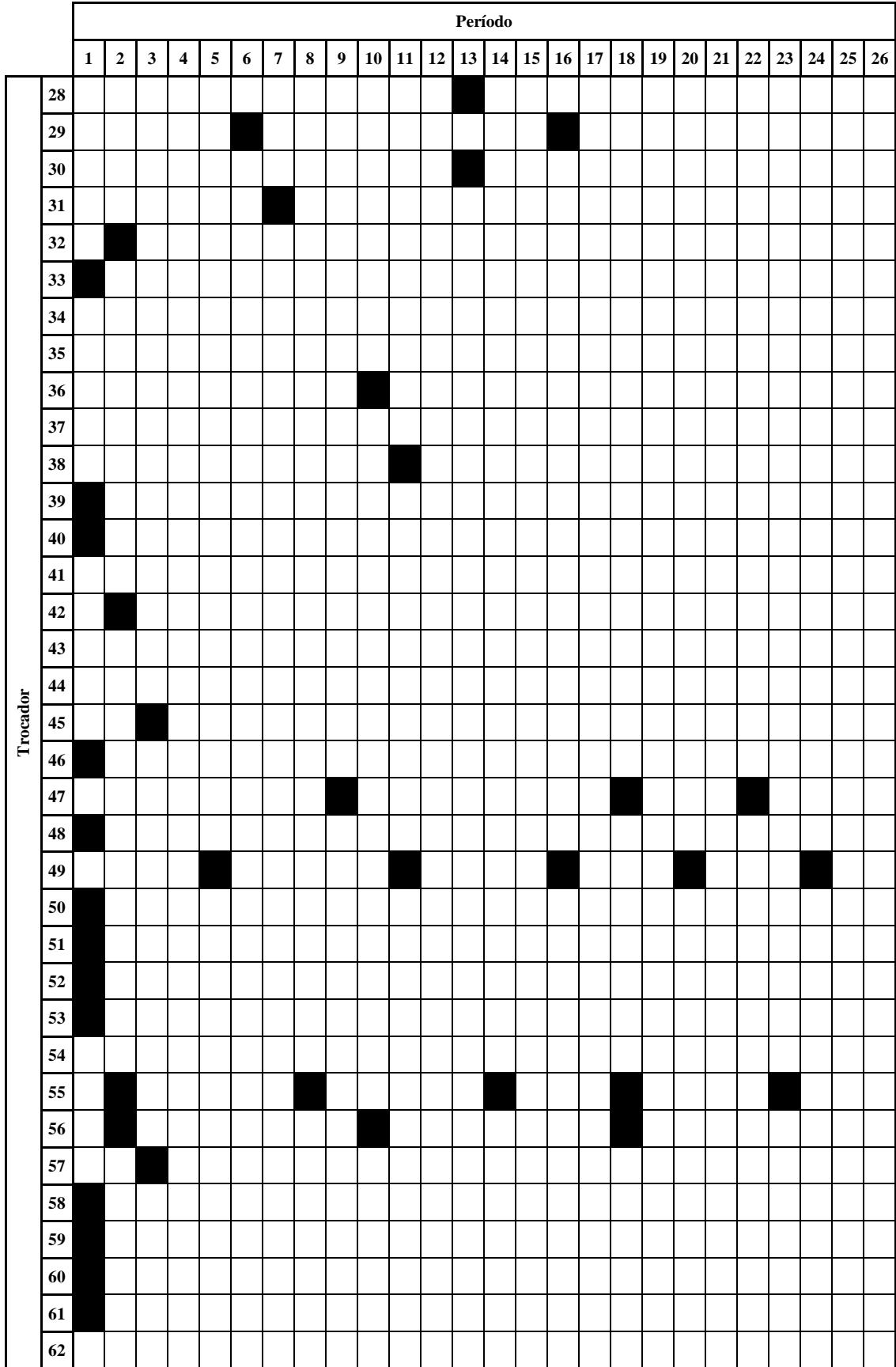


Figura 48– Programação ótima das paradas para o caso base 3 empregando metodologia heurística.

Analisando a Figura 48, observa-se que a programação ótima resultante contém 40 paradas totais durante os 26 períodos analisados. É perceptível que o início do período de campanha contém paradas em alguns trocadores, pois os trocadores apresentavam-se inicialmente sujos.

Entretanto, neste caso, há um número muito grande de paradas simultâneas do ponto de vista prático. Este aumento pode ser corrigido através da inclusão de restrições, tal como ilustrado na seção 4.7.

Também é notável um maior número de paradas nos trocadores no início dos ramais D e E da rede (trocadores 47, 49, 55 e 56) em relação aos demais trocadores da rede e isto pode ser devido a suas maiores taxas de deposição em relação ao demais trocadores da rede.

Para esse problema de grande porte, o tempo total de processamento foi de 5252,97 s, utilizando uma máquina com processador Intel(R) Core(TM) i7-2600K CPU @3.40 GHz, memória instalada (RAM) de 16,0 GB, e sistema operacional Windows 7 de 32 Bits.

4.7 Gerenciamento das restrições

Conforme descrito na formulação matemática no Capítulo 3, foram implementadas as restrições de número mínimo de trocadores operando e limites de temperatura no vértice ao final da rede de troca térmica.

A fim de facilitar a visualização dos resultados da implementação das restrições, foi utilizada a rede contida no caso base 2. As restrições de número mínimo de trocadores operando implementadas encontram-se na Tabela 6. A restrição de temperatura mínima de entrada do forno analisada foi de 85 °C.

Tabela 6– Restrições de número mínimo de trocadores operando.

Grupos de trocadores de calor	Número mínimo de trocadores operando
9 e 12	1
10 e 13	1
11 e 14	1
9, 10 e 11	2
12, 13 e 14	2

O perfil da temperatura final da rede e a programação das paradas para o caso sem restrições e com restrições, respectivamente, para a metodologia heurística recursiva encontram-se nas Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31.

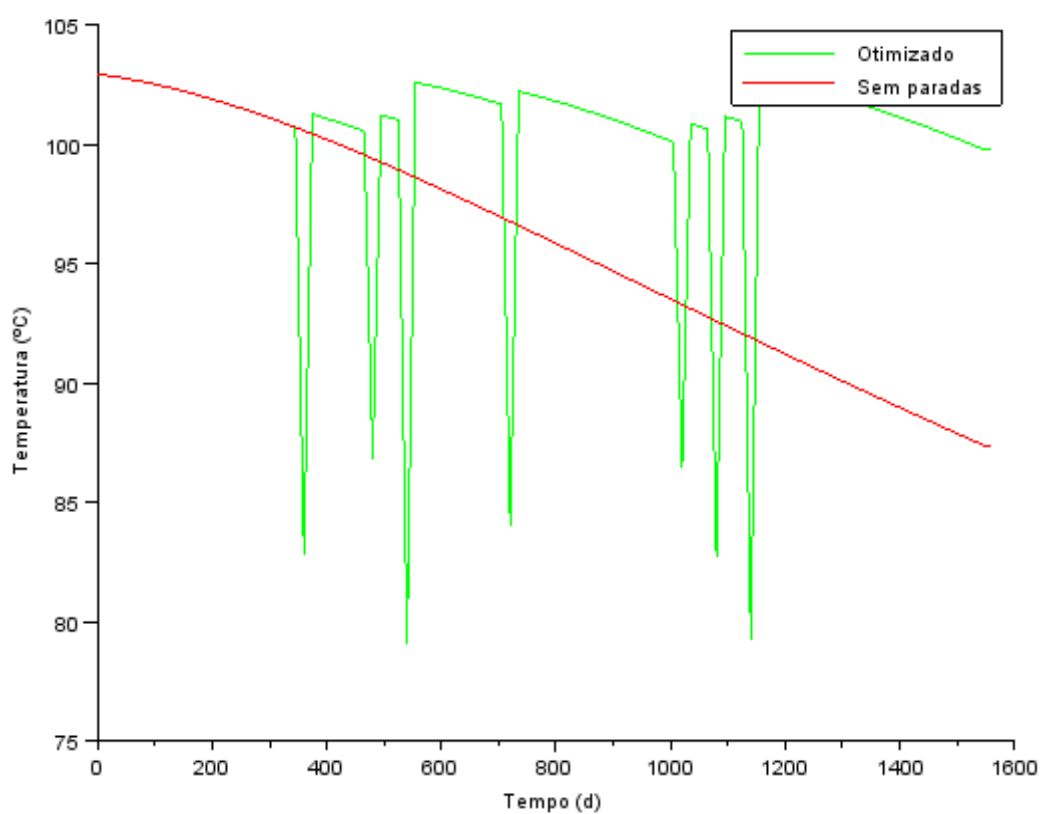


Figura 49– Perfil de temperatura final da rede em caso sem restrições utilizando metodologia heurística recursiva.

		Período																										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Trocador	9									■										■								
	10							■						■							■							
	11									■												■						
	12									■											■							
	13							■							■							■						
	14									■												■					■	

Figura 50– Programação das paradas em caso sem restrições utilizando metodologia heurística recursiva.

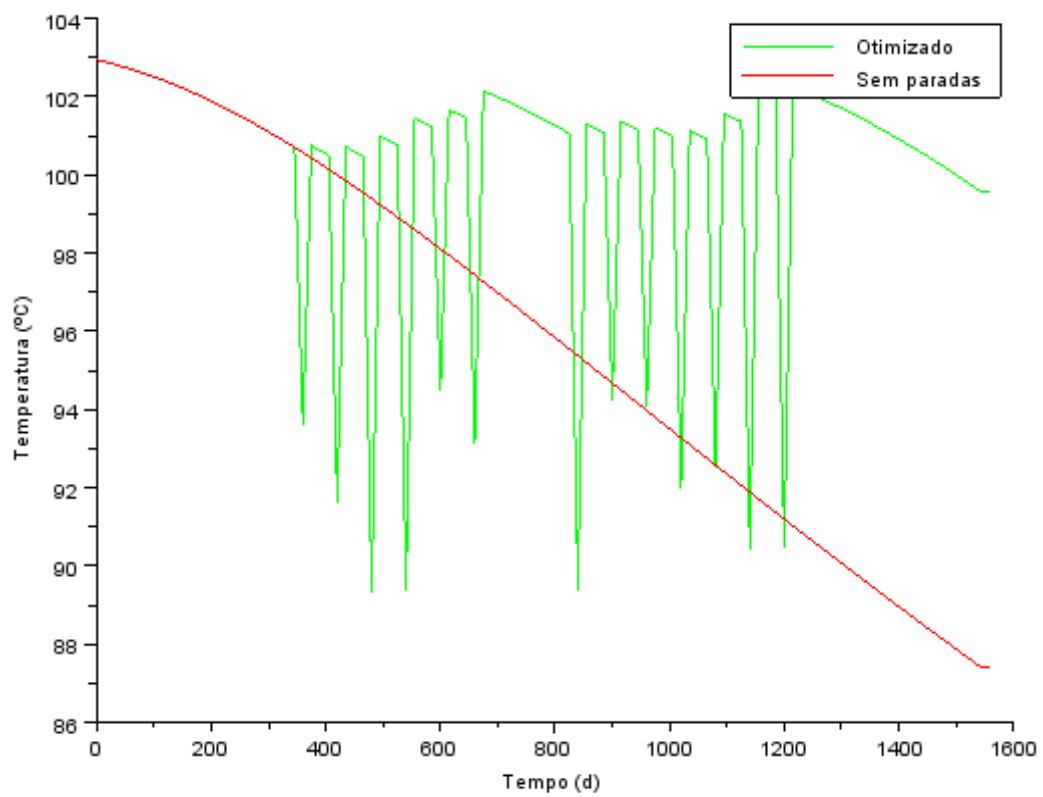


Figura 51– Perfil de temperatura final da rede em caso com restrições utilizando metodologia heurística recursiva.

		Período																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Trocador	9																												
	10																												
	11																												
	12																												
	13																												
	14																												

Figura 52– Programação das paradas em caso com restrições utilizando metodologia heurística recursiva.

A partir das Figuras 4.29 e 4.31, é possível notar que houve a eliminação de paradas simultâneas de acordo com os grupos de trocadores das restrições, como por exemplo, para os trocadores 9 e 12, que na análise sem restrições havia paradas simultâneas nos períodos 9 e 18, na análise com restrições tais paradas passaram a ocorrer em períodos distintos.

Observa-se também, pelas Figuras 49 e 51, que a programação respeitou o valor limite de temperatura de 85 °C não atingindo menores valores.

4.8 Comparações com a literatura

Visando avaliar o desempenho do algoritmo proposto, o método heurístico descrito foi aplicado a diversos exemplos presentes na literatura. Em cada programação das paradas ótima dos casos investigados da literatura foi feita a simulação térmica e calculada a respectiva função objetivo a partir das rotinas desenvolvidas no presente trabalho. Os resultados obtidos da literatura foram comparados com as programações das paradas resultantes das metodologias heurística e heurística recursiva.

Este procedimento de comparação visa garantir uma maior uniformidade nas análises, evitando-se eventuais discrepâncias associadas às pequenas diferenças no procedimento de integração, tolerâncias, etc.

Os exemplos utilizados na comparação com a literatura foram as redes contidas nos casos bases 1, 4, 5 e 6 conforme descrito no Anexo B.

A comparação entre as metodologias desenvolvidas e a literatura se deu pela análise da função objetivo e do ganho, que foi calculado da seguinte forma:

$$Ganho = \frac{Custo(sem\ paradas) - Custo(com\ paradas)}{Custo(sem\ paradas)} * 100 \quad (4.2)$$

4.8.1 Caso base 1

Os resultados da comparação das metodologias heurística e heurística recursiva com a literatura, em termos de função objetivo, para o caso base 1 (rede com 3 trocadores) encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7– Resultados das comparações entre as metodologias heurística e heurística recursiva com a literatura para o caso base 1.

	Método	FO (\$)	Ganho (%)	Número de paradas
<i>C_c = 0</i>				
	Sem paradas	162.883	-	0
	Heurístico	67.730	58,4	8
	Heurístico recursivo	63.096	61,3	10
	Smaïli et al. (2002a)	77.076	52,7	7
<i>C_c = 4000</i>				
	Sem paradas	162.883	-	0
	Heurístico	92.516	43,2	5
	Heurístico recursivo	91.713	43,7	5
	Smaïli et al. (2002a)	100.342	38,4	5

A partir da Tabela 7 é possível observar que a metodologia heurística e heurística recursiva obtiveram maiores ganhos percentuais do que a literatura para ambos valores analisados de $C_c = 0$ \$/parada e $C_c = 4000$ \$/parada.

A programação final para a metodologia heurística, para a metodologia heurística recursiva e a relatada em Smaili et al. (2002a), considerando o custo da parada como 0 \$/parada, encontram-se nas Figuras 53, 54 e 55.

		Mês																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trocador	7											■							
	8							■					■			■			
	9			■			■				■				■				

Figura 53– Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 1 com $C_c = 0$.

		Mês																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trocador	7							■					■						
	8					■				■			■			■			
	9			■			■				■				■				

Figura 54– Programação ótima pela metodologia heurística recursiva para caso base 1 com $C_c = 0$.

		Mês																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trocador	7					■					■						■		
	8				■					■									
	9						■							■					

Figura 55– Programação ótima por Smaili et al. (2002a) para caso base 1 com $C_c = 0$.

Observando-se as Figuras 53 e 54, percebe-se que as programações apresentam resultados relativamente semelhantes entre as metodologias heurística e heurística recursiva e isso também foi observado nos demais casos base investigados (4, 5 e 6), conforme descrito a seguir.

Comparando-se as Figuras 53 e 54 com a Figura 55, nota-se que são programações ótimas distintas, não sendo possível observar um padrão e isso se reflete na grande diferença da função objetivo conforme visto na Tabela 7.

4.8.2 Caso base 4

Os resultados da comparação das metodologias heurística e heurística recursiva com a literatura, em termos de função objetivo, para o caso base 4 (rede com 14 trocadores) encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8– Resultados comparativos para o caso base 4.

Método	FO (\$)	Ganho (%)	Número de paradas
$C_c = 4000$			
Sem paradas	1.353.082	-	0
Heurístico	808.405	40,3	19
Heurístico recursivo	799.889	40,9	22
Smaïli et al. (2001a) / Programação matemática	810.237	40,1	25
Smaïli et al. (2002b) / Algoritmo estocástico BTA	811.515	40,0	27

Analisando-se os resultados contidos na Tabela 8, é possível observar que, da mesma forma que no caso base 1, para o caso base 4 a metodologia heurística e heurística recursiva obtiveram maiores ganhos percentuais do que a literatura tanto para Smaïli et al. (2001a) como para Smaïli et al. (2002b).

A programação final para a metodologia heurística, para a metodologia heurística recursiva, a relatada em Smaïli et al. (2001a) e a relatada em Smaïli et al. (2002b), considerando o custo da parada como 4000 \$/parada, encontram-se nas Figuras 56, 57, 58 e 59.

Visando facilitar a visualização das programações, os períodos 2 a 5 e 33 a 35 encontram-se omissos, uma vez que não houve parada em nenhum trocador.

Comparando-se o caso base 5 com a literatura, observa-se pela Tabela 9 que neste caso a metodologia heurística atingiu ganho percentual inferior a Smaïli et al. (2002a) bem como inferior a Lavaja e Bagajewicz (2004), apesar de tal diferença ter sido baixa. Observa-se também que a metodologia heurística recursiva obteve ganhos percentuais praticamente iguais ao relatado em Smaïli et al. (2002a) e em Lavaja e Bagajewicz (2004).

A programação final para a metodologia heurística, para a metodologia heurística recursiva, a relatada em Smaïli et al. (2002a) e a relatada em Lavaja e Bagajewicz (2004), considerando o custo da parada como 0 \$/parada, encontram-se nas Figuras 60, 61, 62 e 63.

		Mês																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Trocador	5								■					■						■						

Figura 60– Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 5 com $C_c = 0$.

		Mês																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Trocador	5							■						■						■						

Figura 61– Programação ótima pela metodologia heurística recursiva para caso base 5 com $C_c = 0$.

		Mês																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Trocador	5						■					■					■					■				

Figura 62– Programação ótima por Smaïli et al. (2002a) para caso base 5 com $C_c = 0$.

		Mês																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Trocador	5					■					■					■					■					

Figura 63– Programação ótima das paradas por Lavaja e Bagajewicz (2004) para caso base 5 com $C_c = 0$.

Conforme pode ser visualizado nas Figuras 60, 61, 62 e 63, as programações proporcionaram certa periodicidade tanto nas metodologias heurísticas como em Smaïli et al. (2002a) e em Lavaja e Bagajewicz (2004). A diferença entre elas foi de aproximadamente 1 mês. Ambas metodologias heurísticas apresentaram 1 parada a menos em relação a Smaïli et al. (2002a) e em relação a Lavaja e Bagajewicz (2004).

4.8.4 Caso base 6

Os resultados da comparação das metodologias heurística e heurística recursiva com a literatura, em termos de função objetivo, para o caso base 6 (rede com 10 trocadores) encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10– Resultados comparativos para o caso base 6.

Método	FO (\$)	Ganho (%)	Número de paradas
$C_c = 0$			
Sem paradas	377.848	-	0
Heurístico	224.901	40,5	16
Heurístico recursivo	220.891	41,5	19
Smaïli et al. (2002a)	221.703	41,3	21
Lavaja e Bagajewicz (2004)	218.295	42,2	21
$C_c = 2000$			
Sem paradas	377.848	-	0
Heurístico	254.874	32,5	13
Heurístico recursivo	253.690	32,9	14
Smaïli et al. (2002a)	252.553	33,2	15
$C_c = 4000$			
Sem paradas	377.848	-	0
Heurístico	278.648	26,3	9
Heurístico recursivo	276.572	26,8	10
Smaïli et al. (2002a)	278.110	26,4	11
Lavaja e Bagajewicz (2004)	273.134	27,7	10

Pela análise da Tabela 4.8, percebe-se que, para este caso base 6, a metodologia heurística atingiu resultados um pouco menores do que as demais metodologias para os 3 valores investigados de custo de paradas (0, 2000 e 4000) em termos de ganhos percentuais de função objetivo. No entanto a metodologia heurística recursiva apresentou maiores ganhos do

que Smaili et al. (2002a) considerando o custo de parada como 0 \$/parada e para 4000 \$/parada.

Observa-se também nos resultados contidos na Tabela 10, que Lavaja e Bagajewicz (2004) obtiveram melhores resultados do que a metodologia heurística recursiva para ambos os valores estudados de custo de paradas (0 e 4000) embora a diferença seja pequena.

A programação final para a metodologia heurística, para a metodologia heurística recursiva, a relatada em Smaïli et al. (2002a) e a relatada em Lavaja e Bagajewicz (2004), considerando o custo da parada como 4000 \$/parada, encontram-se nas Figuras 64, 65, 66 e 67.

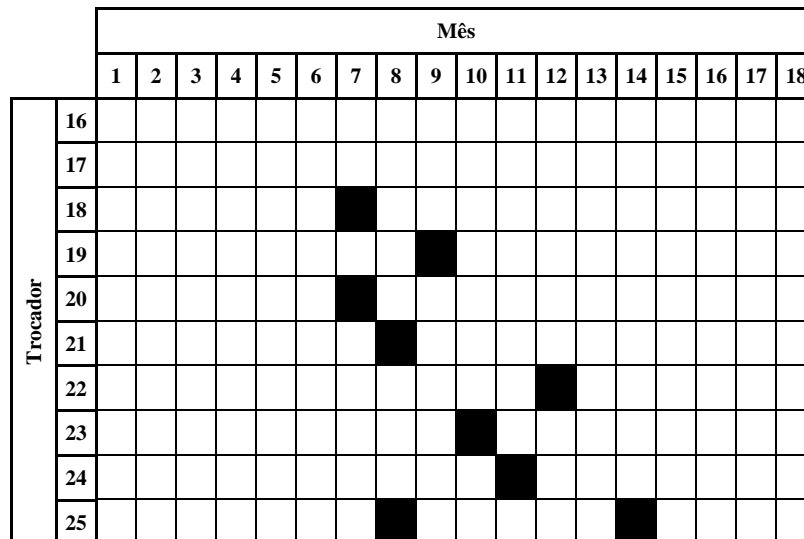


Figura 64– Programação ótima pela metodologia heurística para caso base 6 com $C_c = 4000$.

Mês

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trocador	16																		
	17																		
	18							■											
	19										■								
	20							■											
	21											■							
	22													■					
	23											■							
	24							■					■						
	25								■							■			

Figura 65– Programação ótima pela metodologia heurística recursiva para caso base 6 com $C_c = 4000$.

		Mês																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trocador	16																		
	17										■								
	18									■									
	19								■										
	20										■								
	21								■										
	22							■											
	23										■								
	24							■					■						
	25					■							■						

Figura 66– Programação ótima por Smaïli et al. (2002a) para caso base 6 com $C_c = 4000$.

		Mês																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trocador	16																		
	17																		
	18									■									
	19											■							
	20										■								
	21								■										
	22										■								
	23											■							
	24								■						■				
	25					■								■					

Figura 67– Programação ótima por Lavaja e Bagajewicz (2004) para caso base 6 com $C_c = 4000$.

Conforme visto nas Figuras 64, 65, 66 e 67, as programações ótimas encontradas nas metodologias heurística, em Smaïli et al. (2002a) e em Lavaja e Bagajewicz (2004) apresentaram soluções distintas o que corrobora a existência de uma multiplicidade de ótimos locais.

Como é possível observar diante do conjunto de resultados, a metodologia heurística proposta neste trabalho possui desempenho equivalente aos melhores resultados relatados na literatura.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Em face aos problemas ligados ao decréscimo da eficiência de troca térmica nas redes de trocadores de calor devido à deposição, foram propostas técnicas adequadas à otimização da programação das limpezas nestes problemas.

Neste contexto, no presente trabalho foram desenvolvidas três técnicas de otimização distintas: uma abordagem estocástica baseada nos algoritmos genéticos, uma abordagem heurística e uma abordagem híbrida.

Abordagem estocástica

Os parâmetros dos algoritmos genéticos como probabilidade de *crossover*, probabilidade de mutação, tamanho da população, parâmetro de controle da população inicial e elitismo foram devidamente calibrados para o problema em questão.

A probabilidade de *crossover* foi calibrada utilizando-se o cruzamento simples com um ponto de cruzamento. Encontrou-se 90 % como o melhor valor para a probabilidade de *crossover* para o presente trabalho. A mutação foi empregada neste trabalho bit a bit com probabilidade de mutação otimizada de 0,01 %.

O desempenho do algoritmo genético é sensível ao tamanho da população e desta forma caso este número seja pequeno demais, poderá não haver espaço suficiente para a variedade genética, e caso seja grande demais pode implicar em esforço computacional excessivo. O valor de tamanho da população apropriado à otimização da programação das limpezas de redes de trocadores de calor foi de 30 indivíduos. A geração da população inicial foi realizada de forma aleatória embora com uma distribuição não uniforme. O parâmetro de controle da população inicial pode ser influenciado pelo nível de deposição da rede e assim para diferentes redes é possível obter percentuais de limpeza bem distintos na programação resultante. O parâmetro de controle da população inicial foi calibrado para o devido problema com o valor de 1 %.

A manutenção do melhor indivíduo dentro da população (elitismo) pode, apesar de sua simplicidade, colaborar de forma acentuada para a melhoria do desempenho do algoritmo genético. No presente trabalho isso foi comprovado e o elitismo foi empregado na otimização via algoritmos genéticos visando evitar uma convergência prematura neste caso a probabilidade de mutação foi calibrada para 0,02 %, valor determinado em testes empíricos.

Abordagem heurística

A otimização heurística foi desenvolvida e estudada na sua forma básica através da sequência do conjunto dos movimentos zero, um e dois. Sua análise foi relativa à inserção, retirada e deslocamento de paradas para a direita ou para a esquerda. A sequência do conjunto de movimentos heurísticos atingiu bons resultados e foi possível observar o refinamento da programação no decorrer dos movimentos atingindo resultado mais factível com a realidade.

Estudou-se a metodologia heurística alternativa denominada de metodologia heurística recursiva na qual os conjuntos de movimentos um e dois foram empregados recursivamente até que não fosse mais encontrado melhoria em termos de função objetivo.

Abordagem híbrida

A técnica de otimização híbrida avaliou o desempenho do pré-processamento, do pós-processamento e do pré/pós processamento na programação das limpezas. O pós-processamento correspondeu a algoritmo genético seguido da metodologia heurística, o pré processamento se deu por procedimentos heurísticos seguido do algoritmo genético e o pré/pós processamento foi procedimentos heurísticos seguidos dos algoritmos genéticos seguidos de procedimentos heurísticos. O pré/pós processamento apresentou os melhores resultados em termos de função objetivo, no entanto seu esforço computacional foi significativamente maior.

Análise comparativa

Dentre as três técnicas de otimização empregadas, a abordagem heurística foi a que apresentou os melhores resultados para o problema da otimização da programação das limpezas de redes de trocadores de calor. Destaca-se também que a abordagem heurística recursiva também apresentou resultados satisfatórios com um ganho de 6,5 %, em termos de função objetivo, em relação à heurística básica para um exemplo de grande porte (caso base 3).

Comparações com a literatura

As metodologias heurística e heurística recursiva apresentaram bons resultados para a programação da limpeza de redes de trocadores de calor quando comparadas com exemplos relatados na literatura. Para a rede de 3 trocadores contida no caso base 1, as metodologias heurística e heurística recursiva atingiram ganhos maiores do que Smaïli et al. (2002a). Para o exemplo da rede de 14 trocadores presente no caso base 4, as metodologias heurística e heurística recursiva também atingiram melhores resultados do que Smaïli et al. (2001a) e do que Smaïli et al. (2002b).

Para a rede de 10 trocadores exemplificada no caso base 6, a metodologia heurística recursiva alcançou ganho maior do que Smaïli et al. (2002a) para os três valores de custo de parada analisados (0, 2000 e 4000 \$/parada) e apresentou resultados pouco menores do que Lavaja e Bagajewicz (2004).

Conclusão geral

A metodologia heurística desenvolvida se mostrou competitiva frente às abordagens comparadas da literatura, além de ter se mostrado robusta e não ter apresentado problemas de

não convergência. O simulador utilizado foi de fácil implementação e não demandou *solvers* poderosos.

O software Scilab utilizado foi eficiente para a execução dos cálculos com certa rapidez, sendo que em redes com grande número de trocadores, os resultados eram gerados mais lentamente.

Sugestões

Como propostas para futuros trabalhos, os seguintes assuntos são sugeridos:

- Desenvolvimento de algoritmo para a otimização da programação das paradas via metodologia estocástica e heurística que leve em conta os aspectos hidráulicos como a perda de carga nos trocadores com o avanço da deposição;
- Análises alternativas dos algoritmos genéticos empregando outras relações de função aptidão em relação à função objetivo, tal como a diferença entre o custo da programação sem paradas e o custo da programação proposta; empregando outros tipos de operadores genéticos como *crossover* de dois pontos, *crossover* aritmético, *crossover* heurístico, mutação de limite, mutação não-uniforme, mutação não-uniforme múltipla, mutação gaussiana, seleção por torneio, seleção pelo método de amostragem estocástica uniforme e seleção local (GOLDBERG, 1989; HAUPT e HAUPT, 2004; LINDEN, 2008);
- Estudo de outras técnicas de otimização estocásticas, como o *simulated annealing* (SA) e o método de enxame de partículas (PSO), ou ainda outra técnica de otimização heurística com outros tipos de conjunto de movimentos, como deslocamento das paradas para cima ou para baixo.

REFERÊNCIAS

ASSIS, B. C. G. *Aplicação de técnicas de otimização no gerenciamento da deposição em redes de trocadores de calor*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ASSIS, B. C. G.; LEMOS, J. C.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P.; LIPORACE, F. S.; OLIVEIRA, S. G.; COSTA, A. L. H. *Optimal allocation of cleanings in heat exchanger networks*, Applied Thermal Engineering, v. 58, p. 605-614, 2013a.

ASSIS, B. C. G.; GONÇALVES, C. O.; LIPORACE, F. S.; OLIVEIRA, S. G.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P.; COSTA, A. L. H. *Constrained thermohydraulic optimization of the flow rate distribution in crude preheat trains*, Chemical Engineering Research and Design, v. 91, p. 1517-1526, 2013b.

BAILEY, K. *Optimize heat exchanger operations by minimizing fouling*, Hydrocarbon Processing, v. 78, n. 6, p. 113-116, 1999.

BOTT, T. R. *Fouling of heat exchangers*, Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 0444821864, 1995.

BUENO, F. *Métodos heurísticos – Teoria e Implementações*, IFSC, Araranguá, 2009.

DALLAGNOL, V. A. F.; VAN DER BERG, J.; MOUS, L. *Portfolio management using value at risk: a comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization*, International Journal of Intelligent Systems, v. 24, p. 766-792, 2009.

EBERT, W.; PANCHAL, C. B. *Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data*, Proceedings of mitigation of fouling in industrial heat exchangers, San Luis Obispo, 1995.

EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M.; LASDON, L. S. *Optimization of chemical processes*, 2nd ed., McGraw-Hill, Nova York, 2001.

FURMAN, K. C.; SAHINIDIS, N. V. *A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century*, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 41, p. 2335-2370, 2002.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms – In search, optimization & machine learning*, Addison Wesley, 1989.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. *Practical Genetic Algorithms*, Wiley-Interscience, 2nd ed., Publicação John Wiley & Sons., New Jersey, 2004.

ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I. *Thermo-hydraulic channeling in parallel heat exchangers subject to fouling*, Chemical Engineering Science, v. 63, p.3400-3410, 2008.

ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I. *The effect of fouling on heat transfer, pressure drop, and throughout in refinery preheat trains*, Heat Transfer Engineering, v. 30, p. 805-814, 2009a.

ISHIYAMA, E. M.; PATERSON, W. R.; WILSON, D. I. *Platform for techno-economic analysis of fouling mitigation option in refinery preheat trains*, Energy & Fuels, v. 23, p. 1323-1337, 2009b.

ISHIYAMA, E. M.; HEINS, A. V.; PATERSON, W. R.; SPINELLI, L.; WILSON, D. I. *Scheduling cleaning in a crude oil preheat train subject to fouling: incorporating desalter control*, Applied Thermal Engineering, v. 30, p. 1852-1862, 2010.

JERÓNIMO, M. A. S.; MELO, L. F.; BRAGA, A. S.; FERREIRA, P. J. B. F.; MARTINS, C. *Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchangers: a simplified method*, Experimental Thermal and Fluid Science, v. 14, p. 455-463, 1997.

KAKAÇ, S.; LIU, H. *Heat Exchangers selection, rating, and thermal design*, 2. ed., CRC Press, Department of Mechanical Engineering, University of Miami, Florida, 2002.

KEMP, I. C. *Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*. 2. ed., USA, 2007.

KERN, D. Q.; SEATON, R. E. *A theoretical analysis of thermal surface fouling*. British Chemical Engineering, v. 4, 1959 apud KAKAÇ, S.; LIU, H. *Heat Exchangers selection, rating, and thermal design*, 2nd ed., CRC Press, Department of Mechanical Engineering, University of Miami, Florida, 2002.

LAVAJA, J. H.; BAGAJEWICZ, M. J. *On a new MILP model for the planning of heat-exchanger network cleaning*, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 43, p. 3924-3938, 2004.

LAVAJA, J. H.; BAGAJEWICZ, M. J. *On a new MILP model for the planning of heat-exchanger network cleaning, Part II: throughput loss considerations*, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 44, p. 8046-8056, 2005a.

LAVAJA, J. H.; BAGAJEWICZ, M. J. *On a new MILP model for the planning of heat-exchanger network cleaning, Part III: multiperiod cleaning under uncertainty with financial risk management*, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 44, p. 8136-8146, 2005b.

LINDEN, R. *Algoritmos genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional*. 2. ed., Rio de Janeiro: BRASPORT, 2008.

LIPORACE, F. S.; OLIVEIRA, S. G. *Real time fouling diagnosis and heat exchanger performance*, Taylor & Francis, Heat Transfer Engineering, v. 28, p. 193-201, 2007.

MAH, R. S. H. *Chemical process structures and information flows*. Elsevier Science & Technology Books, 1990.

McCABE, W. L.; ROBINSON, C. S. *Evaporator scale formation*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 16, 1924 apud KAKAÇ, S.; LIU, H. *Heat Exchangers: Selection, Rating and*

Thermal Design. 2. ed., CRC Press, Department of Mechanical Engineering, University of Miami, Florida, 2002.

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

OLIVEIRA FILHO, L. O. *Uma abordagem matricial para modelagem e simulação de redes de trocadores de calor com aplicações para o gerenciamento da deposição*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

OLIVEIRA FILHO, L. O.; QUEIROZ, E. M.; COSTA, A. L. H. *A Matrix approach for steady-state simulation of heat exchanger networks*, Applied Thermal Engineering, vol. 27, p. 2385-2393, 2007.

OLIVEIRA FILHO, L. O.; LIPORACE, F. S.; QUEIROZ, E. M.; COSTA, A. L. H. *Investigation of an alternative operating procedure for fouling management in refinery crude preheat trains*, Applied Thermal Engineering, v. 29, p. 3073–3080, 2009.

PACHECO, M. A. C. *Algoritmos genéticos: princípios e aplicações*, ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, versão 1, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.

PANCHAL, C. B.; KURU, W. C.; LIAO, C. F.; EBERT, W. A. *Threshold conditions of crude oil fouling*, In: Understanding Heat Exchanger Fouling and Mitigation, Begell House, Nova York, 1999.

PANCHAL, C. B.; HUANGFLU, E. *Effects of mitigating fouling on the energy efficiency of crude-oil distillation*, Heat Transfer Engineering, v. 21, p. 3-9, 2000.

POLLEY, G. T.; WILSON, D. I.; YEAP, B. L.; PUGH, S. J. *Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains*, Applied Thermal Engineering, v. 22, p. 777-788, 2002.

POLLEY, G. T.; WILSON, D. I.; PUGH, S. J.; PETITJEAN, E. *Extraction of crude oil fouling model parameters from plant exchanger monitoring*, 6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities, Hans Müller-Steinhagen Editors, Engineering Conferences, Volume RP2, 2005.

RODRIGUEZ, C.; SMITH, R. *Optimization of operating conditions for mitigating fouling in heat exchanger networks*, Chemical Engineering Research and Design, v. 85, p. 839-851, 2007.

SCILAB, software livre. Versão 5.3.3. IRIA, 2011, Disponível em: <www.scilab.org>.

SMAÏLI, F.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. *Mitigation of fouling in refinery heat exchanger networks by optimal management of cleaning*, Energy & Fuels, v. 15, p. 1038-1056, 2001a.

SMAÏLI, F.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. *Mitigation of fouling at the plant scale by strategic cleaning: potential, pitfalls, and needs*, 4th International conference, Heat exchanger fouling, p. 325-332, 2001b.

SMAÏLI, F.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. *Optimization of cleaning schedules in heat exchanger networks subject to fouling*, Chemical Engineering Communications, v. 189, p. 1517-1549, 2002a.

SMAÏLI, F.; VASSILIADIS, V. S.; WILSON, D. I. *Long-Term scheduling of cleaning of heat exchanger networks*, Trans IChemE, v. 80, 2002b.

STEINHAGEN, H. M. *Fouling of heat exchanger surfaces*. In: STEPHAN, P. (Editor-in-chief). *VDI Heat Atlas*, 2nd ed., Springer, 2010.

TAVARES, V. B. G. *Modelagem, simulação e otimização termo-hidráulica de redes de trocadores de calor*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TAVARES, V. B. G.; QUEIROZ, E. M.; COSTA, A. L. H. *Thermohydraulic simulation of heat exchanger networks*, Ind. Eng. Chem. Res., v. 49, 4756-4765, 2010.

WATKINSON, A. P. *Deposition from crude oils in heat exchangers*, Heat Transfer Engineering, v. 28, p. 177-184, 2005.

WHITLEY, D. *A genetic algorithm tutorial*, Computer Science Department, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, Statistics and Computing, v. 4, p. 65-85, 1994.

WILSON, D. I.; POLLEY, G. T.; PUGH, S. J. *Mitigation of crude oil preheat train fouling by design*, Heat Transfer Engineering., v. 23, p. 24-37, 2002.

YEAP, B. L.; WILSON, D. I.; POLLEY, G. T.; PUGH, S. J. *Mitigation of crude oil refinery heat exchanger fouling through retrofits based on thermo-hydraulic fouling models*, Chemical Engineering Research and Design, v. 82, p. 53-71, 2004.

YEAP, B. L.; WILSON, D. I.; POLLEY, G. T.; PUGH, S. J. *Retrofitting crude oil refinery heat exchanger networks to minimize fouling while maximizing heat recovery*, Heat Transfer Engineering, v. 26, p. 23-34, 2005.

ANEXO A: PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Neste anexo é apresentada a produção científica desenvolvida durante o curso de mestrado relacionado ao gerenciamento da deposição. Um artigo específico sobre os resultados da presente dissertação será submetido em breve. Serão apresentados os resumos ou apenas a primeira página do artigo completo.

Congresso: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ 2012. De 09 à 12 de setembro de 2012. Atlântico Búzios Convention & Resort. Búzios, RJ, Brasil.

⇒ Título: Otimização da Distribuição das Vazões em Redes de Trocadores de Calor Considerando o Comportamento Dinâmico da Deposição. Autores: Bruna C. G. de Assis, Caroline de O. Gonçalves, Fábio S. Liporace, Sérgio G. Oliveira, Eduardo M. Queiroz, Fernando L. P. Pessoa, André L. H. Costa.

Congresso: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ 2012. De 09 à 12 de setembro de 2012. Atlântico Búzios Convention & Resort. Búzios, RJ, Brasil.

⇒ Título: Influência da Deposição em Baterias de Pré-Aquecimento de Petróleo – Aspectos Térmicos e Hidráulicos. Autores: Joana L. Borges, Caroline de O. Gonçalves, Júlia C. Lemos, R. Guinancio, Eduardo M. Queiroz, Fábio S. Liporace, Sérgio G. Oliveira, Fernando L. P. Pessoa, André L. H. Costa.

Periódico: Chemical Engineering Research and Design (Elsevier Editorial System), volume 91, 2013.

⇒ Título: Constrained Thermohydraulic Optimization of the Flow Rate Distribution in Crude Preheat Trains. Autores: Bruna C. G. de Assis, Caroline de O. Gonçalves, Fábio S. Liporace, Sérgio G. Oliveira, Eduardo M. Queiroz, Fernando L. P. Pessoa, André L. H. Costa.



COBEQ2012
XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE
ENGENHARIA QUÍMICA

09 a 12 de setembro de 2012
Búzios, RJ

OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS VAZÕES EM REDES DE TROCADORES DE CALOR CONSIDERANDO O COMPORTAMENTO DINÂMICO DA DEPOSIÇÃO

B. C. G. de ASSIS¹, C. O. GONÇALVES¹, F. S. LIPORACE², S. G. OLIVEIRA², E. M. QUEIROZ³, F. L. P. PESSOA³ e A. L. H. COSTA¹

¹ PPG-EQ/UERJ - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

² Gás, Energia e Gás Química/CENPES/PETROBRAS - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello - Petróleo Brasileiro S.A.

³ EQ/UFRJ - Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro

E-mail para contato: andrehc@uerj.br

RESUMO – Apesar do grande esforço devotado nos últimos anos para a investigação da deposição em trocadores de calor, este problema ainda causa consideráveis prejuízos, tais como, a necessidade de equipamentos com maior área de troca térmica, gastos adicionais com o consumo de utilidades, custos referentes à limpeza de trocadores, etc. No âmbito das redes de trocadores de calor, é possível tentar mitigar os efeitos da deposição através da otimização da distribuição das vazões entre os diversos equipamentos existentes, considerando diferentes níveis de deposição nos trocadores de calor em operação. Entretanto, a redistribuição das vazões entre os trocadores da rede também é capaz de alterar as taxas de deposição, o que pode levar a resultados desfavoráveis no futuro. Neste contexto, este trabalho apresenta a formulação da otimização da distribuição das vazões em uma rede considerando o comportamento dinâmico da deposição. A função objetivo envolve a minimização da energia requerida para o aquecimento das correntes frias durante o horizonte de operação e as restrições correspondem às equações de balanço de massa e energia acopladas às equações de cálculo de trocadores de calor. O comportamento dinâmico da deposição é representado por equações de taxa de deposição em função de variáveis operacionais. A formulação resultante corresponde a um problema de programação não-linear, capaz de ser resolvido no ambiente de otimização GAMS.

1. INTRODUÇÃO

Redes de trocadores de calor são estruturas que permitem a transferência de calor entre correntes de processo, possibilitando assim a redução do consumo de utilidades em plantas industriais. Devido ao aumento dos custos de energia, o projeto deste tipo de sistema tem atraído grande atenção da literatura a partir da década de 80 do século passado (Furman e Sahinidis, 2002). Entretanto, os aumentos de eficiência térmica

INFLUÊNCIA DA DEPOSIÇÃO EM BATERIAS DE PRÉ-AQUECIMENTO DE PETRÓLEO – ASPECTOS TÉRMICOS E HIDRÁULICOS

J. L. BORGES¹, C. O. GONÇALVES², J. C. LEMOS², R. GUINANCIO³, E. M. QUEIROZ³,
F. S. LIPORACE⁴, S. G. OLIVEIRA⁴, F. L. P. PESSOA³ e A. L. H. COSTA²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEQ/COPPE

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Química

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química/DEQ

⁴ PETROBRAS/CENPES/PEDS/Gás Natural

E-mail para contato: jborges@peq.coppe.ufrj.br

RESUMO – Baterias de pré-aquecimento em refinarias de petróleo existem para minimizar o consumo de combustível necessário para aquecer o cru antes da destilação atmosférica. Durante esta etapa, as superfícies térmicas dos trocadores de calor estão sujeitas à deposição. A deposição afeta a efetividade térmica dos trocadores de calor ao adicionar resistências térmicas ao sistema, dando também origem a restrições hidráulicas ao reduzir a área dentro e fora dos tubos dos trocadores de calor. A literatura contém diversos trabalhos que estudam as conseqüências térmicas da deposição, porém apenas alguns consideram aspectos hidráulicos que podem restringir a vazão processada devido às limitações das bombas existentes. Com objetivo de mostrar uma metodologia para avaliar aspectos hidráulicos em conjunto com aspectos térmicos vinculados à deposição, este trabalho faz uma estimativa de parâmetros que permite a determinação simultânea das espessuras dos depósitos ao longo da bateria e de sua condutividade efetiva, a partir do conhecimento de séries temporais de dados operacionais da queda de pressão, vazão e das resistências de depósito em trechos de uma bateria de pré-aquecimento de uma refinaria brasileira.

1. INTRODUÇÃO

Em refinarias de petróleo, as baterias de pré-aquecimento recebem o óleo cru a ser processado à temperatura ambiente e o aquecem até aproximadamente 270-290°C (Coletti e Macchietto, 2011), utilizando como fontes de energia correntes de processo e refluxos circulantes das torres de destilação. Comumente ao final da bateria há um forno que garante a complementação do aquecimento e o controle da temperatura de alimentação da primeira coluna de destilação (destilação atmosférica). Estas baterias são responsáveis por disponibilizar aproximadamente 60-70% da energia necessária para a destilação (Panchal e Huangfu, 2000).



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Chemical Engineering Research and Design

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cherd

IChemE

Constrained thermohydraulic optimization of the flow rate distribution in crude preheat trains

Bruna C.G. Assis^{a,1}, Caroline de O. Gonçalves^a, Fábio S. Liporace^b, Sérgio G. Oliveira^b, Eduardo M. Queiroz^c, Fernando L.P. Pessoa^c, André L.H. Costa^{a,*}

^a Rio de Janeiro State University (UERJ), Rua São Francisco Xavier, 524, Instituto de Química, Rio de Janeiro, RJ, CEP 20550-900, Brazil

^b Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), Avenida Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21949-900, Brazil

^c Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco E, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, CEP 21945-970, Brazil

ABSTRACT

Crude preheat trains are heat exchanger networks which heat the crude oil stream in the petroleum distillation using hot product streams and pumparounds. The final heating step is executed in a furnace. The thermal efficiency of this process is strongly dependent on the crude preheat train performance, and, during the refinery operation, the heat load of the exchangers may decrease due to fouling. Associated to the reduction of the thermal effectiveness of the heat exchangers, fouling also causes an increase of the flow resistances along the thermal equipment. A potential approach to mitigate this problem is based on the optimization of the distribution of the flow rates in the crude preheat train for maximizing the final crude temperature. In this context, this paper presents a constrained nonlinear programming formulation for this task. The equality constraints encompass mass, energy and mechanical energy balances and heat exchanger equations for describing the thermal and hydraulic behavior of the system. The performance of the proposed approach is explored using two examples, a simple network and a crude preheat train based on a real Brazilian refinery.

© 2013 The Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Fouling; Heat exchanger; Petroleum refining; Optimization.

1. Introduction

The first main stage of petroleum refining is the atmospheric distillation. In this operation, the crude stream fed to the tower must be heated to about 380 °C. Around 60–70% of the necessary thermal energy is supplied by hot streams from the distillation tower through a heat exchanger network called crude preheat train (CPT). The rest of the heating is provided by a fired heater. However, during the refinery operation, there is a continuous decrease of the CPT heat load due to fouling. This effect brings economic and environmental penalties because of the necessary additional fuel consumption (Panchal and Huang, 2000).

CPT fouling can be caused by different mechanisms: depending on the position of the heat exchanger in relation to the desalter (equipment designed to remove water, dissolved salts and suspended solids in the crude oil). Fouling in heat exchangers located upstream of the desalter is influenced by the presence of particulate matter and salts. In the heat exchangers located downstream of the desalter, chemical reaction fouling becomes important due to the presence of asphaltenes subjected to higher temperatures (Bennett et al., 2007).

Because of the magnitude of this problem, the literature reports several approaches for fouling management in this kind of system, e.g. fouling monitoring (Liporace and Oliveira,

* Corresponding author. Tel.: +55 21 83052084.

E-mail address: andrelho@uerj.br (A.L.H. Costa).

Received 30 September 2012; Received in revised form 4 June 2013; Accepted 5 June 2013

¹ Present address: Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), Avenida Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21949-900, Brazil.

0953-4762/\$ – see front matter © 2013 The Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2013.06.005>

ANEXO B: CASOS INVESTIGADOS

B.1 Caso 1

Este caso está contido no trabalho de Smaïli et al. (2002a) e a Figura B.1 mostra o seu fluxograma com a numeração de seus elementos.

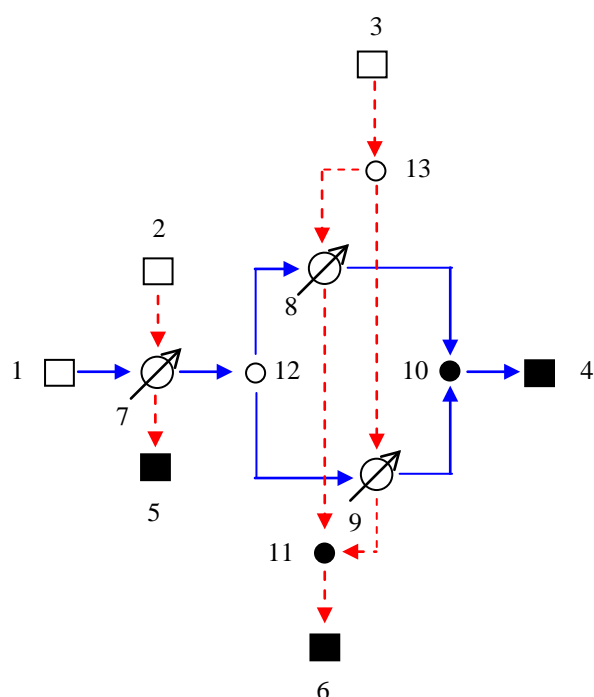


Figura B. 1 – Fluxograma caso 1. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (SMAÏLI et al., 2002a).

Como pode ser observado na Figura B.1, a rede é constituída por três trocadores de calor, com arranjo em série e paralelo, dois misturadores de correntes e dois divisores de correntes. As especificações das correntes de entrada desta rede estão exibidas na Tabela B.1. Os calores específicos das correntes são considerados constantes ao longo da rede.

Tabela B. 1 – Caso 1: Especificações das correntes de entrada.

Suprimento	Temperatura (°C)	Vazão (kg s⁻¹)	Calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹)
1	100	41,7	2400
2	250	17,8	2800
3	350	17,8	2800

Nesta rede sem incrustação inicialmente, o coeficiente global de transferência de calor limpo utilizado é de $200 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ e os divisores estão ajustados para uma fração de 0,5. A área de troca térmica de cada trocador é de 800 m^2 . As correntes frias passam pelo lado dos tubos e as correntes quentes pelo lado do casco dos trocadores de calor, no sentido contracorrente, considerando-se que os trocadores são do tipo casco e tubo. Adicionalmente consideram-se desprezíveis as resistências condutivas nos tubos dos trocadores.

Com relação à deposição, utilizou-se o modelo de deposição linear com taxa em cada trocador de acordo com a Tabela B.2.

Tabela B. 2 – Caso 1: Taxa de deposição para o modelo linear.

Trocador	Taxa x 10¹¹ (m² K J⁻¹)
7	8,3
8	16,5
9	16,5

Quanto à natureza da função objetivo, utilizou-se um custo da energia de 0,01 \$/kWh, eficiência de energia no elemento final da rede de 75 % e o custo da parada como 0 \$/parada e como 4000 \$/parada. A temperatura base para determinação do consumo de energia foi de 256 °C.

O horizonte de tempo de operação contém 18 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 1 instante cada, os sub-períodos de operação contém 4 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 6 dias.

As restrições utilizadas de número mínimo de trocadores que devem estar operando foram:

$$y_7 + y_8 + y_9 \geq 1 \quad (\text{B.1})$$

$$y_8 + y_9 \geq 1 \quad (\text{B.2})$$

B.2 Caso 2

Este caso está contido no trabalho de Assis et al. (2013a) e a Figura B.2 mostra o seu fluxograma com a numeração de seus elementos.

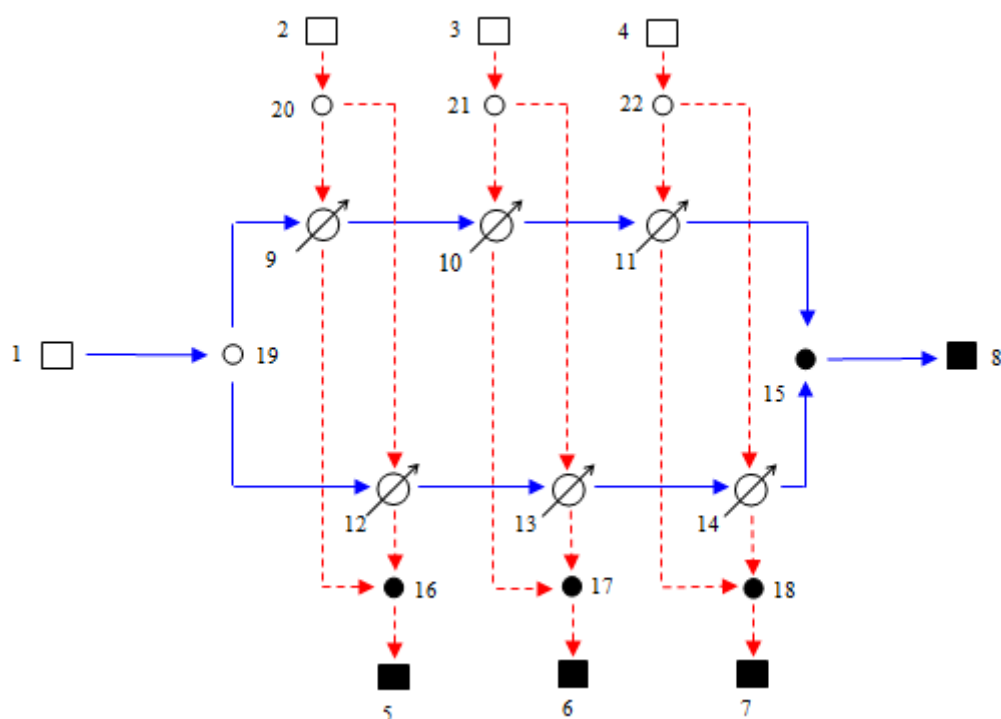


Figura B. 2 – Fluxograma caso 2. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (ASSIS et al., 2013a).

Como pode ser observado na Figura B.2, a rede é constituída por seis trocadores de calor, com arranjo em série e paralelo, quatro misturadores de correntes e quatro divisores de correntes. As especificações das correntes de entrada desta rede estão exibidas na Tabela B.3. Os calores específicos das correntes são considerados constantes ao longo da rede.

Tabela B. 3 – Caso 2: Especificações das correntes de entrada.

Suprimento	Temperatura (°C)	Vazão (kg s ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
1	30,00	200	2100
2	130,00	50	2500
3	151,14	50	2500
4	172,29	50	2500

Nesta rede sem incrustação inicialmente, os divisores estão ajustados para uma fração de 0,5. Os trocadores possuem 400 m² de área de troca térmica, 1 passe no casco, 2 passes nos tubos e o fluido que encontra-se no lado dos tubos é o frio. O diâmetro externo dos tubos dos trocadores é de 19,05 mm e o diâmetro interno é de 14,85 mm. A condutividade térmica da parede dos tubos é de 55 W m⁻¹ K⁻¹ e o número total de tubos é 428. O coeficiente de película base no lado do tubo é de 2000 W m⁻² K⁻¹ e no lado do casco é de 1500 W m⁻² K⁻¹. A vazão base no lado do tubo é 100 kg.s⁻¹ e no lado do casco é 25 kg.s⁻¹. Empregou-se a equação a seguir para o cálculo dos coeficientes de película (h):

$$h = h_{base} \left(\frac{m}{m_{base}} \right)^r \quad (\text{B.3})$$

onde m é vazão mássica da corrente e o expoente r é igual a 0,8 para o lado dos tubos e 0,6 para o lado do casco.

Com relação à deposição, utilizou-se o modelo de deposição linear com taxa de 3×10^{-11} m² K J⁻¹ em cada trocador.

Quanto à natureza da função objetivo, utilizou-se um custo da energia de 0,01 \$/kWh e o custo da parada como 4000 \$/parada. A temperatura base para determinação do consumo de energia foi de 274,74 °C.

O horizonte de tempo de operação contém 26 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 1 instante cada, os sub-períodos de operação contém 3 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 15 dias.

Na análise do gerenciamento das restrições, utilizou-se o peso de 30 para o cálculo da penalização (Pen) na função objetivo.

B.3 Caso 3

Esse caso é mais complexo que os demais e trata de uma bateria de preaquecedores de uma refinaria brasileira existente, estudada no trabalho de Liporace e Oliveira (2007) e em Oliveira Filho (2007), sendo alguns parâmetros adaptados no âmbito do presente trabalho diferindo parcialmente das referências originais. As Figuras B.3 e B.4 mostram os fluxogramas desta rede com a numeração de seus elementos.

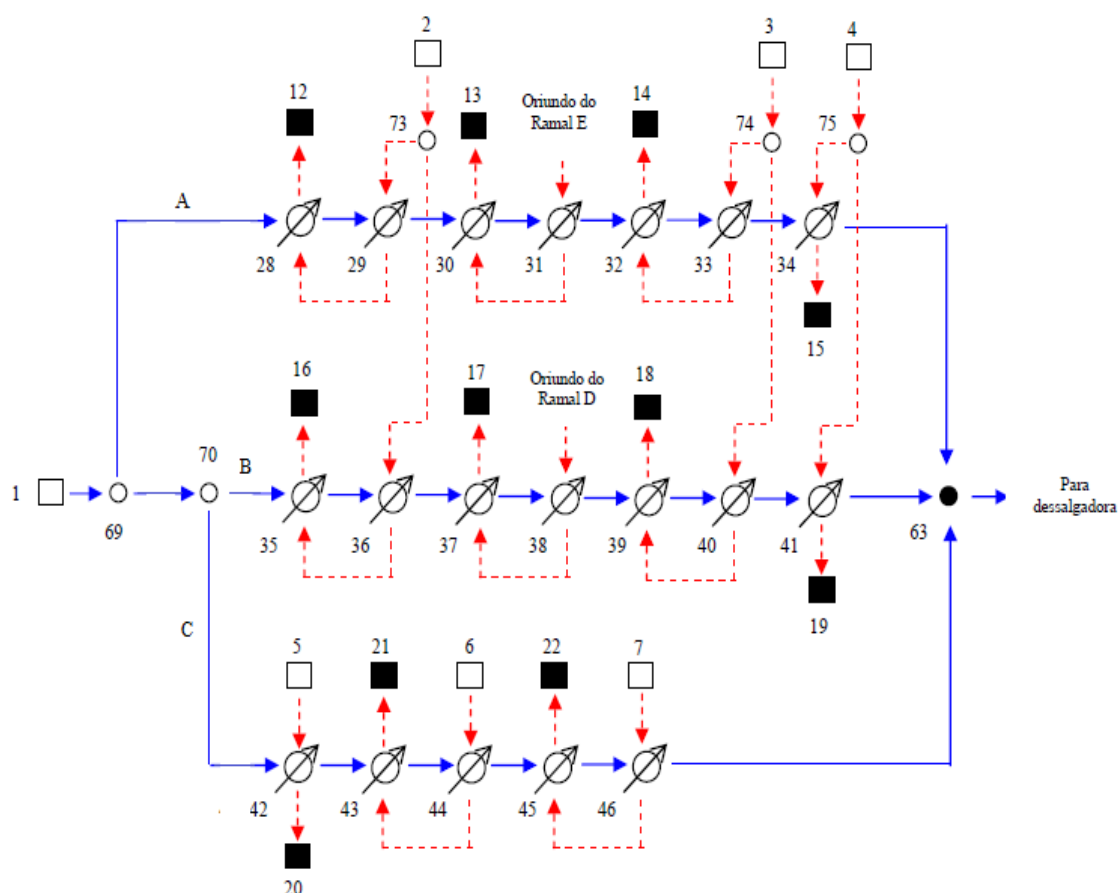


Figura B. 3 – Fluxograma caso 3: do armazenamento até a entrada da dessalgadora. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (OLIVEIRA FILHO, 2007).

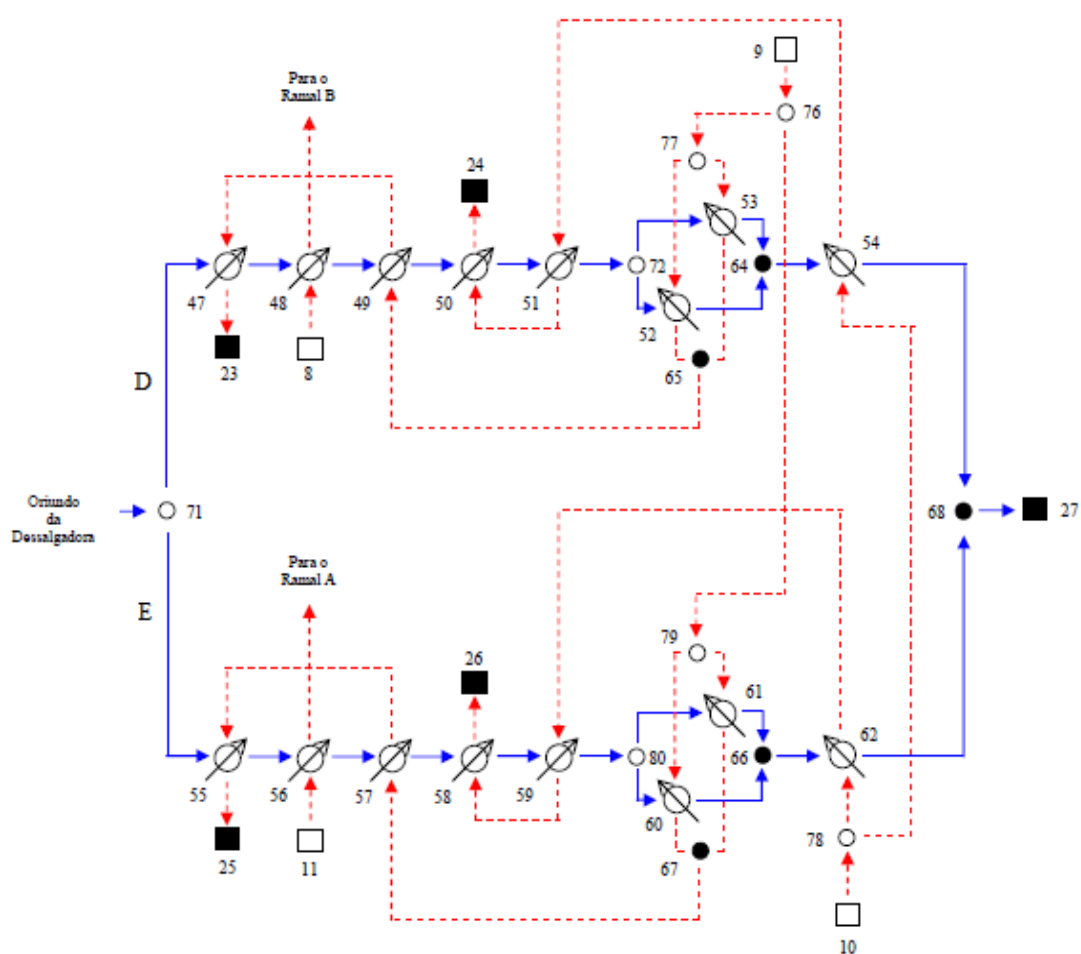


Figura B. 4 – Fluxograma caso 3: após a dessalgadora. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes (OLIVEIRA FILHO, 2007).

Como pode ser observado nas Figuras B.3 e B.4, a rede é constituída por trinta e cinco trocadores de calor, com arranjo em série e paralelo, seis misturadores de corrente, doze divisores de corrente e uma dessalgadora (sendo a dessalgadora modelada com um decréscimo de temperatura entre a entrada e saída igual a $22,76\text{ }^{\circ}\text{C}$). A rede está estruturada em cinco ramais (A, B, C, D e E) de preaquecedores. As especificações das correntes de entrada desta rede estão exibidas na Tabela B.4. Os calores específicos das correntes são considerados constantes ao longo da rede.

Tabela B. 4 – Caso 3: Especificações das correntes de entrada.

Suprimento	Temperatura (°C)	Vazão (kg s⁻¹)	Calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹)
1	32,5	274,74	2134
2	120,6	223,06	2300
3	167,3	113,05	2248
4	240,9	87,51	2364
5	174,0	92,09	2286
6	210,6	21,17	2429
7	238,7	102,73	2519
8	251,2	36,06	2464
9	312,9	170,04	2586
10	271,7	96,24	2528
11	314,0	36,35	2464

Nesta rede sem incrustação inicialmente, os divisores estão ajustados para uma fração de 0,5. Os parâmetros relevantes de cada trocador da rede encontram-se nas Tabelas B.5 e B.6. Os coeficientes de película base e as vazões base encontram-se na Tabela B.7.

Tabela B. 5 – Caso 3: Parâmetros dos trocadores de calor.

Trocador de calor	Área (m²)	Passes do casco e do tubo	Fluido no lado do tubo	Trocador de calor	Área (m²)	Passes do casco e do tubo	Fluido no lado do tubo
28	642	1-2	Quente	46	684	1-4	Quente
29	642	1-2	Quente	47	543	1-2	Frio
30	277	1-2	Quente	48	334	1-4	Quente
31	277	1-2	Quente	49	581	1-2	Frio
32	729	1-4	Frio	50	583	1-2	Frio
33	729	1-4	Frio	51	622	1-2	Frio
34	692	1-4	Frio	52	624	1-2	Frio
35	642	1-2	Quente	53	624	1-2	Frio
36	642	1-2	Quente	54	659	1-2	Frio
37	277	1-2	Quente	55	543	1-2	Frio
38	277	1-2	Quente	56	334	1-4	Quente
39	729	1-4	Frio	57	581	1-2	Frio
40	729	1-4	Frio	58	583	1-2	Frio
41	692	1-4	Frio	59	622	1-2	Frio
42	392	1-2	Quente	60	624	1-2	Frio
43	377	1-4	Quente	61	624	1-2	Frio
44	377	1-4	Quente	62	659	1-2	Frio
45	684	1-4	Quente				

Tabela B. 6 – Caso 3: Parâmetros dos trocadores de calor.

Trocador de calor	Diâmetro externo dos tubos (mm)	Diâmetro interno dos tubos (mm)	Condutividade térmica dos tubos ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Número total de tubos
28	19,05	14,83	55	1814
29	19,05	14,83	55	1814
30	19,05	14,83	55	775
31	19,05	14,83	55	775
32	19,05	14,83	55	2064
33	19,05	14,83	55	2064
34	19,05	14,83	32	1954
35	19,05	14,83	55	1814
36	19,05	14,83	55	1814
37	19,05	14,83	55	775
38	19,05	14,83	55	775
39	19,05	14,83	55	2064
40	19,05	14,83	55	2064
41	19,05	14,83	32	1954
42	19,05	14,83	32	1101
43	19,05	14,83	55	1058
44	19,05	14,83	55	1058
45	19,05	14,83	32	1933
46	19,05	14,83	32	1933
47	19,05	14,83	32	1520
48	19,05	14,83	32	930
49	19,05	14,83	55	1628
50	19,05	14,83	55	1640
51	19,05	14,83	32	1750
52	19,05	14,83	32	1750
53	19,05	14,83	32	1750
54	25,40	22,10	19	1403
55	19,05	14,83	32	1520
56	19,05	14,83	32	930
57	19,05	14,83	55	1628
58	19,05	14,83	55	1640
59	19,05	14,83	32	1750
60	19,05	14,83	32	1750
61	19,05	14,83	32	1750
62	25,40	22,10	19	1403

Tabela B. 7 – Caso 3: Coeficientes de película base (h) e vazões base (m).

Trocador de calor	h_{tubo} (W m ⁻² K ⁻¹)	h_{casco} (W m ⁻² K ⁻¹)	m_{tubo} (kg s ⁻¹)	m_{casco} (kg s ⁻¹)
28	1553,20	423,27	117,25	103,16
29	1647,81	540,95	117,25	103,16
30	525,27	1015,32	36,35	106,04
31	721,26	1039,97	36,35	106,04
32	945,97	474,36	106,04	58,36
33	1077,97	513,84	106,04	58,36
34	1324,89	263,54	106,04	43,53
35	1430,82	402,53	105,81	93,40
36	1519,45	507,52	105,81	93,40
37	792,76	958,76	36,06	96,29
38	887,61	1025,56	36,06	96,29
39	883,42	467,37	96,29	54,68
40	996,31	501,83	96,29	54,68
41	1246,44	275,31	96,29	43,98
42	875,01	742,64	92,09	78,18
43	957,52	807,56	21,17	78,18
44	1039,26	875,74	21,17	78,18
45	1876,30	1034,11	102,73	78,18
46	2001,57	1774,45	102,73	78,18
47	2150,78	1238,56	137,95	110,77
48	1552,50	1597,07	36,06	137,95
49	2226,08	1344,21	137,95	110,77
50	1557,35	374,23	137,95	34,35
51	1704,76	413,26	137,95	34,35
52	1618,08	879,23	68,98	55,38
53	1618,08	879,23	68,98	55,38
54	1729,58	433,50	137,95	34,35
55	1690,15	736,25	136,79	59,27
56	1429,28	1803,39	36,35	136,79
57	1723,37	822,03	136,79	59,27
58	1467,37	509,63	136,79	61,89
59	1814,30	609,75	136,79	61,89
60	1316,73	555,06	68,40	29,64
61	1316,73	555,06	68,40	29,64
62	1277,68	637,08	136,79	61,89

Com relação à deposição, utilizaram-se os modelos de deposição constante e o linear para cada trocador de calor de acordo com a Tabela B.8.

Tabela B. 8 – Caso 3: Modelos de deposição.

Trocador de calor	Modelo de deposição	Taxa x 10 ¹¹ (m ² K J ⁻¹)	Trocador de calor	Modelo de deposição	Taxa x 10 ¹¹ (m ² K J ⁻¹)
28	Linear	3,08	46	Linear	0,78
29	Linear	3,08	47	Linear	5,09
30	Linear	0,89	48	Constante	-
31	Linear	0,89	49	Linear	6,40
32	Constante	-	50	Constante	-
33	Constante	-	51	Constante	-
34	Constante	-	52	Constante	-
35	Linear	2,64	53	Constante	-
36	Linear	2,64	54	Constante	-
37	Linear	1,23	55	Linear	6,64
38	Linear	1,23	56	Linear	1,87
39	Constante	-	57	Constante	-
40	Constante	-	58	Constante	-
41	Constante	-	59	Constante	-
42	Constante	-	60	Constante	-
43	Constante	-	61	Constante	-
44	Constante	-	62	Constante	-
45	Linear	0,78			

Quanto à natureza da função objetivo, utilizou-se um custo da energia de 0,01 \$/kWh e o custo da parada como 4000 \$/parada. A temperatura base para determinação do consumo de energia foi de 274,74 °C.

O horizonte de tempo de operação contém 26 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 1 instante cada, os sub-períodos de operação contém 3 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 15 dias.

B.3.1 Caso 3.1

Este caso é semelhante ao caso base 3 com as seguintes diferenças descritas a seguir.

Com base em Assis et al. (2013a), considerou-se o comportamento linear e as taxas de incrustação de $0,7 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K/J}$ e $1,6 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K/J}$ nos trocadores, respectivamente, a montante e a jusante da dessalgadora. As resistências iniciais de depósito para cada trocador encontram-se na Tabela B.9.

Tabela B. 9 – Resistências iniciais de depósito (ASSIS et al., 2013a).

Trocador de	Rf x 10⁴	Trocador de	Rf x 10⁴
calor	(m² K/W)	calor	(m² K/W)
28	8,61	46	16,70
29	8,61	47	10,50
30	7,06	48	58,30
31	7,06	49	7,32
32	26,50	50	20,70
33	26,50	51	2,41
34	0,00	52	12,00
35	11,00	53	12,00
36	11,00	54	1,20
37	8,61	55	19,30
38	8,61	56	13,20
39	38,10	57	3,44
40	38,10	58	3,96
41	0,00	59	4,99
42	8,70	60	9,64
43	6,03	61	9,64
44	6,03	62	27,50
45	16,70		

B.3.2 Caso 3.2

Este caso é semelhante ao caso base 3 com as seguintes diferenças descritas a seguir.

O horizonte de tempo de operação contém 26 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 3 instante cada, os sub-períodos de operação contém 9 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 5 dias.

Outra alteração de dados feita nesta análise foi a utilização das resistências iniciais de depósito presentes na Tabela B.9.

B.4 Caso 4

Este caso está contido no trabalho de Smaïli et al. (2001a) e em Smaïli et al. (2002b) e a Figura B.5 mostra o seu fluxograma com a numeração de seus elementos.

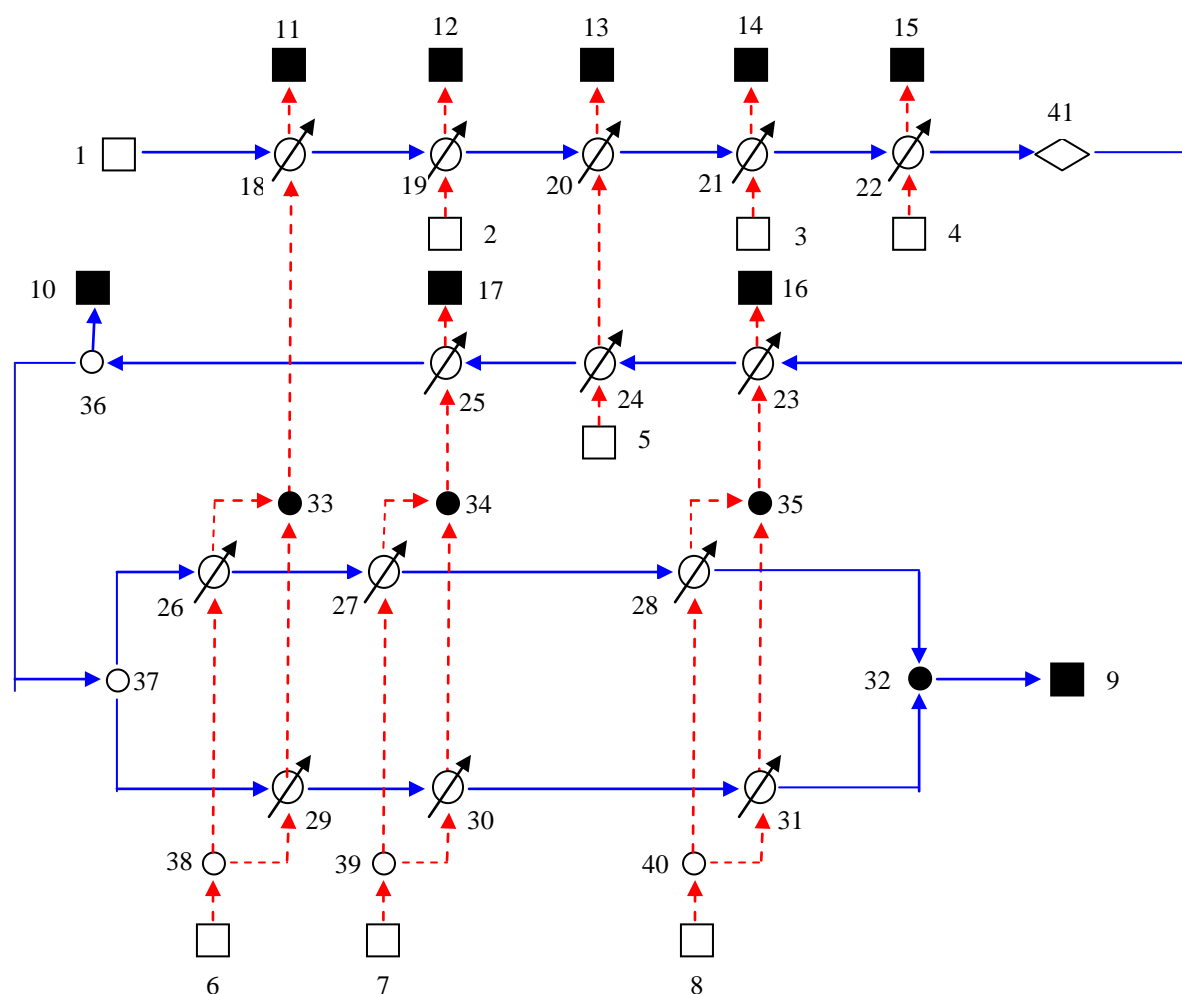


Figura B. 5 – Fluxograma caso 4. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo; círculos em branco: divisores de correntes; círculos em preto: misturadores de correntes; losango em branco: dessalgadora (SMAÏLI et al., 2001a).

Como pode ser observado na Figura B.5, a rede é constituída por quatorze trocadores de calor, com arranjo em série e paralelo, quatro misturadores de correntes, cinco divisores de correntes e uma dessalgadora (sendo a dessalgadora – vértice 41 – modelada com um decréscimo de temperatura entre a entrada e saída igual a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ainda com relação à estrutura da rede deste caso, é descrita uma torre de pré-flash que separa os componentes leves do cru, sendo representada por uma divisão de corrente fixa de 0,03 da corrente total de

cru. As especificações das correntes de entrada desta rede estão exibidas na Tabela B.10. Os calores específicos das correntes são considerados constantes ao longo da rede.

Tabela B. 10 – Caso 4: Especificações das correntes de entrada.

Suprimento	Temperatura (°C)	Vazão (kg s⁻¹)	Calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹)
1	26	95,0	1920
2	296	3,3	2900
3	170	49,7	2600
4	237	49,7	2600
5	205	55,8	2600
6	249	19,1	2800
7	286	45,5	2900
8	334	34,8	2800

Nesta rede sem incrustação inicialmente, o coeficiente global de transferência de calor limpo utilizado é de $500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ e os divisores estão ajustados para uma fração de 0,5. As áreas de troca térmica dos trocadores desta rede encontram-se na Tabela B.11.

Tabela B. 11 – Caso 4: Áreas de troca térmica dos trocadores desta rede.

Trocador de calor	Área (m²)	Trocador de calor	Área (m²)
18	56,6	25	67,1
19	8,9	26	91,0
20	208,3	27	61,3
21	112,9	28	55,6
22	121,6	29	91,0
23	110,1	30	61,3
24	67,2	31	55,6

As correntes frias passam pelo lado dos tubos e as correntes quentes pelo lado do casco dos trocadores de calor. Consideram-se desprezíveis as resistências condutivas nos tubos dos trocadores.

Com relação à deposição, utilizou-se o modelo de deposição linear com taxa em cada trocador de calor de acordo com a Tabela B.12.

Tabela B. 12 – Caso 4: Taxa de deposição para o modelo linear.

Trocador	Taxa x 10¹¹ (m² K J⁻¹)
18	0,6
19	0,9
20	0,6
21	0,8
22	0,8
23	1,5
24	1,1
25	1,5
26	1,6
27	1,8
28	1,9
29	1,6
30	1,8
31	1,9

Quanto à natureza da função objetivo, utilizou-se um custo da energia de 0,01 \$/kWh, eficiência de energia no elemento final da rede de 75 % e o custo da parada como 4000 \$/parada. A temperatura base para determinação do consumo de energia foi de 233 °C.

O horizonte de tempo de operação contém 36 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 1 instante cada, os sub-períodos de operação contém 1 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 15 dias.

As restrições utilizadas de número mínimo de trocadores que devem estar operando foram:

$$y_{18} + y_{26} + y_{29} \geq 2 \quad (\text{B.4})$$

$$y_{23} + y_{28} + y_{31} \geq 2 \quad (\text{B.5})$$

$$y_{25} + y_{27} + y_{30} \geq 2 \quad (\text{B.6})$$

$$y_{31} + y_{28} \geq 1 \quad (\text{B.7})$$

$$y_{30} + y_{27} \geq 1 \quad (\text{B.8})$$

$$y_{29} + y_{26} \geq 1 \quad (\text{B.9})$$

$$y_{31} + y_{30} + y_{29} \geq 2 \quad (\text{B.10})$$

$$y_{28} + y_{27} + y_{26} \geq 2 \quad (\text{B.11})$$

$$y_{25} + y_{24} + y_{23} \geq 2 \quad (\text{B.12})$$

$$y_{22} + y_{21} + y_{20} + y_{19} + y_{18} \geq 2 \quad (\text{B.13})$$

B.5 Caso 5

Este caso está contido no trabalho de Smaïli et al. (2002a) e a Figura B.6 mostra o seu fluxograma com a numeração de seus elementos.

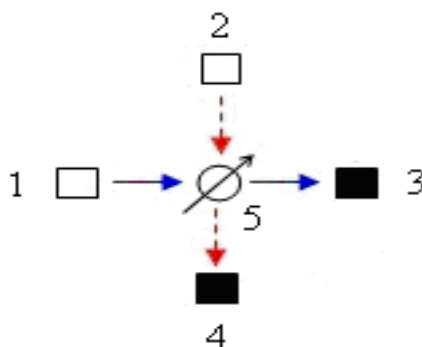


Figura B. 6 – Fluxograma caso 5. Linhas contínuas: correntes frias; linhas tracejadas: correntes quentes; blocos em branco: suprimento de processo; blocos em preto: demanda de processo (SMAÏLI et al., 2002a).

Como pode ser observado na Figura B.6, este caso contém apenas um trocador de calor. As especificações das correntes de entrada deste caso estão exibidas na Tabela B.13. Os calores específicos das correntes são considerados constantes.

Tabela B. 13 – Caso 5: Especificações das correntes de entrada.

Suprimento	Temperatura (°C)	Vazão (kg s⁻¹)	Calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹)
1	175	81,8	2400
2	333	26,2	2810

Neste caso sem incrustação inicialmente, o coeficiente global de transferência de calor limpo utilizado é de $500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. A área de troca térmica do trocador é de $116,8 \text{ m}^2$. A corrente fria passa pelo lado dos tubos e as correntes quentes pelo lado do casco do trocador de calor, no sentido contracorrente. Adicionalmente consideram-se desprezíveis as resistências condutivas nos tubos do trocador.

Com relação à deposição, utilizou-se o modelo de deposição linear com taxa de $1,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K J}^{-1}$.

Quanto à natureza da função objetivo, utilizou-se um custo da energia de $0,01 \text{ \$/kWh}$, eficiência de energia no elemento final da rede de 75% e o custo da parada como $0 \text{ \$/parada}$. A temperatura base para determinação do consumo de energia foi de 205 °C .

O horizonte de tempo de operação contém 24 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 1 instante cada, os sub-períodos de operação contém 4 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 6 dias.

Tabela B. 14 – Caso 6: Especificações das correntes de entrada.

Suprimento	Temperatura (°C)	Vazão (kg s⁻¹)	Calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹)
1	20	90,9	1920
2	295	9,3	2930
3	220	53,3	2600
4	236	54,0	2600
5	267	17,8	2830
6	280	35,6	2880
7	333	26,2	2810

Neste caso sem incrustação inicialmente, o coeficiente global de transferência de calor limpo utilizado é de $500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. As áreas de troca térmica dos trocadores desta rede encontram-se na Tabela B.15.

Tabela B. 15 – Caso 6: Áreas de troca térmica dos trocadores desta rede.

Trocador de calor	Área (m²)	Trocador de calor	Área (m²)
16	43,2	21	50,7
17	26,7	22	45,7
18	110,7	23	40,6
19	138,2	24	82,2
20	17,0	25	116,8

A corrente fria passa pelo lado dos tubos e as correntes quentes pelo lado do casco dos trocadores de calor, no sentido contracorrente. Adicionalmente consideram-se desprezíveis as resistências condutivas nos tubos do trocador.

Com relação à deposição, utilizou-se o modelo de deposição linear com taxa em cada trocador de calor de acordo com a Tabela B.16.

Tabela B. 16 – Caso 6: Taxa de deposição para o modelo linear.

Trocador	Taxa x 10¹¹ (m² K J⁻¹)
16	0,6
17	0,9
18	0,6
19	0,8
20	1,5
21	1,1
22	1,5
23	1,6
24	1,8
25	1,9

Quanto à natureza da função objetivo, utilizou-se um custo da energia de 0,01 \$/kWh, eficiência de energia no elemento final da rede de 75 % e o custo da parada como 0 \$/parada, 2000 \$/parada e 4000 \$/parada. A temperatura base para determinação do consumo de energia foi de 205 °C.

O horizonte de tempo de operação contém 18 períodos, os sub-períodos de limpeza contém 1 instante cada, os sub-períodos de operação contém 4 instantes cada e os instantes estão distribuídos em intervalos de 6 dias.

As restrições utilizadas de número mínimo de trocadores que devem estar operando foram:

$$y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{19} \geq 3 \quad (\text{B.14})$$

$$y_{20} + y_{21} + y_{22} \geq 2 \quad (\text{B.15})$$