



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**MARIA CLAUDIA AGUITONI**

**SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO ALGORITMOS  
GENÉTICOS E EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

**CURITIBA**

**2018**

**MARIA CLAUDIA AGUITONI**

**SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO ALGORITMOS  
GENÉTICOS E EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutora em Métodos Numéricos em Engenharia, pelo programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof Paulo Henrique Siqueira, DSc  
Coorientador: Prof Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani, DSc

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

---

AG284s      Aguitoni, Maria Claudia  
                 Síntese de redes de trocadores de calor utilizando algoritmos genéticos e evolução diferencial /  
                 Maria Claudia Aguitoni. – Curitiba, 2018.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, 2018.

Orientador: Paulo Henrique Siqueira.  
Coorientador: Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani.

1. Algoritmo genético. 2. Evolução diferencial. 3. Síntese de redes de trocadores de calor.  
I. Universidade Federal do Paraná. II. Siqueira, Paulo Henrique. III. Ravagnani, Mauro Antonio  
da Silva Sá. IV. Título.

CDD: 518.1

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MARIA CLAUDIA AGUITONI** intitulada: **SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS E EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 26 de Julho de 2018.



PAULO HENRIQUE SIQUEIRA  
Presidente da Banca Examinadora



LEANDRO MAGATÃO  
Avaliador Externo



SANDER JONER  
Avaliador Externo

por video conferência

LAUREANO JIMÉNEZ ESTELLER  
Avaliador Externo



SÉRGIO SCHEER  
Avaliador Interno

*Este trabalho é dedicado ao universo.*

## AGRADECIMENTOS

Já ouvi muito amigo dizer que chorou para fazer os agradecimentos. No caminho da minha vida, faço agora os meus agradecimentos.

Começo agradecendo a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que me concedeu o afastamento das minhas atividades docentes para a realização do doutorado.

Agradeço ao programa de pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em particular ao secretário Jair por sempre atender as minhas "urgências" tão prontamente, ao meu orientador Paulo Henrique pela disponibilidade sempre que precisei e ao professor Emílio pela grande ajuda com o  $\LaTeX$ .

Um especial agradecimento a Universidade Rovira i Virgili (Tarragona-Espanha) por me receber por um ano no meu doutorado sanduíche. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro nesse período e ao meu coorientador Laureano Jiménez por todo o suporte me dado nos estudos e na vida de modo geral. Obrigada por tudo Laure!

Ao meu querido coorientador Mauro Ravagnani, por fazer possível a realização desse trabalho. As suas palavras de incentivo fizeram toda a diferença e só por você, temos esse trabalho. Aqui faço um especial agradecimento ao Leandro Pavão por todo o conhecimento compartilhado nesse período. Fui muito bem direcionada na minha programação e devo isso a você Leandro.

Agradeço minha mãe pela paciência e por entender tão perfeitamente minha ausência física e mental. Estendo esse mesmo agradecimento a minha irmã Bárbara e aos meus sobrinhos amados: Naiara, Matheus, Gabriel e Laura.

Lu minha amiga, obrigada por simplesmente escutar as minhas loucuras e me permitir ser um pouco normal.

Ju e Naty, agradeço vocês pela parceria na hora de estudar e na hora de ir ao bar! Ju, meu especial agradecimento por me aguentar tantos dias aqui na sua casa nessa finalização da tese.

Minhas amigas Tássia e Dani, mesmo longe, nossos encontros durante esse tempo, sempre fizeram os meus dias mais felizes. Obrigada Tilapas!

Talvez esse seja o agradecimento que me faça chorar. Agradeço aos colegas do grupo SUSCAPE da Universidade Rovira i Virgili, em especial aos que hoje são meus amigos: Vitinho, Angelito e Lukinha. Aos meus amigos da "comida": Noelia, Sergiolico, Marc, Ignasi, Oscar e Oriol. Todos vocês, sem dúvidas nenhuma, estarão para sempre no meu coração. Os "pinchos", a praia, as compritas com Noelia, o GinTonic e as festas

serão sempre lembranças dos meus melhores dias. Les echo muchísimo de menos!

Faço aqui um agradecimento mais que especial a Oriol por me fazer ter tantas experiências "quase morte" em tão pouco tempo (desde o primeiro dia) e por fazer tantas comidas gostosas para mim.

Sou grata a todos os movimentos da vida, a toda a sincronicidade dos fatos, a todos os encontros e desencontros...enfim, eu só tenho que agradecer ao mistério da vida que me trouxe até aqui.

*“O mar não é um obstáculo: é um caminho.  
(Amyr Klink)”*

## RESUMO

A síntese de redes de trocadores de calor (RTC) é um problema da engenharia de processos que pode ser matematicamente caracterizado como altamente combinatório, não linear e não convexo. Todos esses aspectos dificultam a identificação de soluções localmente ótimas em tempo computacional aceitável. Neste trabalho propõe-se um algoritmo de otimização baseado em superestruturas considerando a mistura não isotérmica e a divisão nas correntes. As redes de trocadores de calor são otimizadas por meio da aplicação de um novo método híbrido de dois níveis que funciona em um nível superior com Algoritmo Genético (GA) para otimizar as variáveis discretas e em um nível inferior com Evolução Diferencial (ED) para otimizar cargas térmicas e frações das correntes divididas, visando encontrar soluções com o mínimo custo total anual (CTA). O método proposto é aplicado a oito casos estudados e foi eficiente em alcançar soluções com CTA comparáveis ou inferiores às reportadas anteriormente na literatura.

**Palavras-chaves:** algoritmo genético. evolução diferencial. otimização. síntese de redes de trocadores de calor.

## ABSTRACT

Heat Exchanger Networks (HEN) synthesis is a process engineering problem that can be mathematically characterized as highly combinatorial, non-linear and non-convex. All these aspects bottleneck the identification of locally optimal solutions at acceptable computational time. This work proposes an optimization algorithm based on superstructures considering non-isothermal mixing and stream splitting. HENs are optimized through the application of a bi-level new hybrid method that works at an upper level with Genetic Algorithm (GA) to optimize discrete variables and at a lower level with Differential Evolution (DE) for optimizing heat loads and stream split fractions in order to find solutions with low total annual costs (TAC). The proposed method is applied to eight literature cases studied and was efficient in obtaining solutions with TAC comparable or lower than those previously reported.

**Key-words:** genetic algorithm. differential evolution. optimization. heat exchanger networks synthesis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO . . . . .	23
FIGURA 2 – SUPERESTRUTURA DE DOIS ESTÁGIOS PARA PROBLEMA COM QUATRO CORRENTES DE PROCESSO, DUAS QUENTES E DUAS FRIAS. . . . .	25
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GENERALIZADA DE UM PROBLEMA BASE- ADO EM SWS COM DOIS ESTÁGIOS ( $K = 1, 2$ ) PARA DUAS CORRENTES QUENTES E TRÊS FRIAS. $CU_i$ : UTILIDADE FRIA; $HU_j$ : UTILIDADE QUENTE . . . . .	42
FIGURA 4 – ESTRUTURA GERAL DO MÉTODO PROPOSTO GA-DE . . . . .	47
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DA TOPOLOGIA USADA NO GA . . . . .	47
FIGURA 6 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 1 . . . . .	53
FIGURA 7 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 2 . . . . .	55
FIGURA 8 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 3 . . . . .	56
FIGURA 9 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 4 . . . . .	58
FIGURA 10 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 5 . . . . .	59
FIGURA 11 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 6 SEM RESTRIÇÃO DE ÁREA	61
FIGURA 12 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 6 COM RESTRIÇÃO DE ÁREA	62
FIGURA 13 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 7 . . . . .	65
FIGURA 14 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 8 . . . . .	67
FIGURA 15 – EVOLUÇÃO DE SOLUÇÕES PARA AS 40 PRIMEIRAS GERA- ÇÕES DO NÍVEL SUPERIOR (GA) E PARA AS 100 PRIMEIRAS GERAÇÕES DE UMA APLICAÇÃO DE DE PARA UMA TOPOLO- GIA PROMISSORA PARA CASOS 6 E 7, E 50 GERAÇÕES DO GA E 200 DO DE PARA O CASO 8 . . . . .	69

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS DO GA . . . . .	48
TABELA 2 – PARÂMETROS DO DE . . . . .	50
TABELA 3 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 1 . . . . .	52
TABELA 4 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 1 . . . . .	53
TABELA 5 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 2 . . . . .	54
TABELA 6 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 2 . . . . .	55
TABELA 7 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 3 . . . . .	56
TABELA 8 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 3 . . . . .	56
TABELA 9 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 4 . . . . .	57
TABELA 10 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 4 . . . . .	57
TABELA 11 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 5 . . . . .	58
TABELA 12 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 5 . . . . .	60
TABELA 13 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 6 . . . . .	60
TABELA 14 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 6 . . . . .	63
TABELA 15 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 7 . . . . .	63
TABELA 16 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 7 . . . . .	64
TABELA 17 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 8 . . . . .	65
TABELA 18 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 8 . . . . .	67
TABELA 19 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 6 SEM RESTRI- ÇÃO DE ÁREA . . . . .	69
TABELA 20 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 6 COM RESTRI- ÇÃO DE ÁREA . . . . .	70
TABELA 21 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 7 . . . . .	70
TABELA 22 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 8 . . . . .	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

<b>ACO</b>	Otimização por Colônias de Formiga
<b>DE</b>	Evolução Diferencial
<b>DGB</b>	Decomposição Generalizada de Bender
<b>EMAT</b>	Exchanger Minimum Approach Temperature
<b>EROS</b>	Energy Recovery Optimization System
<b>GA</b>	Algoritmos Genéticos
<b>HRAT</b>	Heat Recovery Approach Temperature
<b>HS</b>	Busca Harmônica
<b>IDE</b>	Evolução Diferencial Integrado
<b>MPE</b>	Método do Ponto de Estrangulamento
<b>MRE</b>	Máxima Recuperação de Energia
<b>PEE</b>	Ponto de Estrangulamento Energético
<b>PL</b>	Programação Linear
<b>PLIM</b>	Programação Linear Inteira Mista
<b>PNL</b>	Programação Não Linear
<b>PNLIM</b>	Programação Não Linear Inteira Mista
<b>PSO</b>	Otimização por Enxame de Partículas
<b>RFO</b>	Rocket Fireworks Optimization
<b>RTC</b>	Rede de Trocadores de Calor
<b>RWCE</b>	Random Walking Algorithm of Compulsory Evolution
<b>SA</b>	Simulated Annealing
<b>SWS</b>	Stage-wise Superstructure
<b>TEMA</b>	Tubular Exchanger Manufacturers Association
<b>TP</b>	Tabela do Problema
<b>TS</b>	<i>Tabu Search</i> - Busca Tabu

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Índices

$i$	-	Correntes quentes
$j$	-	Correntes frias
$k$	-	Estágios
$K$	-	Último estágio na superestrutura

### Conjuntos

$N_H$	-	Conjunto de correntes quentes
$N_C$	-	Conjunto de correntes frias
$N_S$	-	Conjunto de estágios

### Parâmetros

$NH$	-	Número de correntes quentes
$NC$	-	Número de correntes frias
$ST$	-	Número de estágios
$CHU$	[\$/k, kBtu]	Custo das utilidades quentes
$CCU$	[\$/kJ, kBtu]	Custo das utilidades frias
$TinH$	[K, °F, °C]	Temperatura inicial das correntes quentes
$ToutH$	[K, °F, °C]	Temperatura final(target) das correntes quentes
$TinC$	[K, °F, °C]	Temperatura inicial das correntes frias
$ToutC$	[K, °F, °C]	Temperatura final(target) das correntes frias
$CPc$	[J/kgK, J/Kg°C, Btu/h°F]	Capacidade térmica das correntes frias
$CPH$	[J/kgK, J/Kg°C, Btu/h°F]	Capacidade térmica das correntes quentes
$hh$	[kW/m <sup>2</sup> K, kBtu/h.ft <sup>2</sup> °F]	Coeficiente de transferência de calor nas correntes quentes

$hc$	$[kW/m^2K, kBtu/h.ft^2\text{ }^\circ F]$	Coeficiente de transferência de calor nas correntes frias
$hhu$	$[kW/m^2K, kBtu/h.ft^2\text{ }^\circ F]$	Coeficiente de transferência de calor nas utilidades quentes
$hhc$	$[kW/m^2K, kBtu/h.ft^2\text{ }^\circ F]$	Coeficiente de transferência de calor nas utilidades frias
$C$	$[\$/m^2, \$/(\text{ft})^2]$	Coeficiente de custo da área
$CF$	$[\$]$	Custo fixo do trocador de calor
$B$	-	Expoente de custo da área
$EMAT$	-	Temperatura Mínima de Aproximação

### Variáveis

$Z$	-	Variável binária representando a existência do trocador de calor
$Zhu$	-	Variável binária representando a existência do aquecedor
$Zcu$	-	Variável binária representando a existência do resfriador
$Q$	$[kW, Btu]$	Carga térmica do trocador de calor
$Qhu$	$[kW, Btu]$	Carga térmica do aquecedor
$Qcu$	$[kW, Btu]$	Carga térmica do resfriador
$Qmax$	$[kW, Btu]$	Carga máxima do trocador de calor
$FH$		Fração das correntes quentes divididas
$FC$		Fração das correntes frias divididas
$A$	$[m^2, (\text{ft})^2]$	área do trocador de calor
$Ahu$	$[m^2, (\text{ft})^2]$	área do aquecedor
$Acu$	$[m^2, (\text{ft})^2]$	área do resfriador
$LMTD$	$[K, \text{ }^\circ F, \text{ }^\circ C]$	Diferença de temperatura média logarítmica nos trocadores de calor

$LMTD_{hu}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Diferença de temperatura média logarítmica nos aquecedores
$LMTD_{cu}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Diferença de temperatura média logarítmica nos resfriadores
$U$	$[kW/m^2K, kBtu/h.ft^2^\circ F]$	Coefficiente global de transferência de calor nos trocadores de calor
$U_{hu}$	$[kW/m^2K, kBtu/h.ft^2^\circ F]$	Coefficiente global de transferência de calor nos aquecedores
$U_{cu}$	$[kW/m^2K, kBtu/h.ft^2^\circ F]$	Coefficiente global de transferência de calor nos resfriadores

### Símbolos

$CTA$		Custo total anual
$T_{hin}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura inicial da corrente quente
$T_{hout}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura saída da corrente quente
$T_{cin}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura inicial da corrente fria
$T_{cout}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura saída da corrente fria
$T_{inChu}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura entrada na utilidade quente
$T_{outChu}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura saída na utilidade quente
$T_{inHcu}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura entrada na utilidade fria
$T_{outHcu}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura saída na utilidade fria
$T_{mixH}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura de saída da corrente quente no ponto de mistura
$T_{mixC}$	$[K, ^\circ F, ^\circ C]$	Temperatura de saída da corrente fria no ponto de mistura
$Pen$	-	Função penalidade

$C_1$	-	Constante de penalidade
$C_2$	-	Constante de penalidade
$N_C$	-	Número de variáveis contínuas
$N_F$	-	Número de variáveis de fração das correntes divididas
$N_Q$	-	Número de variáveis de cargas de calor
$N_Z$	-	Número de variáveis binárias
$N_T$	-	Número total de variáveis
<i>FITNESS</i>		Fitness do indivíduo
<i>Top</i>		População inicial de topologias
<i>Couples</i>	-	Número de cruzamento por geração
$P_M$	-	Probabilidade de mutação
$P_C$	-	Probabilidade de cruzamento
<i>iterMaxD</i>	-	Número máximo de gerações nas variáveis discretas
$X$	-	População genérica
$X_{mut}$	-	População genérica de indivíduos mutados
$X_{cross}$	-	População genérica de indivíduos cruzados
$F$	-	Fator de mutação
<i>iterMax</i>	-	Número máximo de gerações nas variáveis contínuas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.1.1	Objetivos Específicos	21
1.2	IMPORTÂNCIA E LIMITAÇÕES DO TRABALHO	21
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>27</b>
3.1	SÍNTESE SEQUENCIAL E SIMULTÂNEA	27
3.2	MÉTODOS ESTOCÁSTICOS	34
3.2.1	Algoritmos Genéticos	35
3.2.2	Simulated Annealing	36
3.2.3	Otimização por Enxame de Partículas	37
3.2.4	Evolução Diferencial	38
3.2.5	Otimização por Colônia de Formigas	39
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>41</b>
4.1	FORMULAÇÃO DO MODELO	41
4.2	ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO	46
4.2.1	Nível Superior - Algoritmos Genéticos	46
4.2.1.1	Inicialização	47
4.2.1.2	Função de Avaliação	48
4.2.1.3	Operações Genéticas	48
4.2.1.4	Nova População	49
4.2.2	Nível Inferior - Evolução Diferencial	50
4.2.2.1	Inicialização	50
4.2.2.2	Função de Avaliação	50
4.2.2.3	Operações Genéticas	51
4.2.2.4	Nova População	51
<b>5</b>	<b>CASOS ESTUDADOS</b>	<b>52</b>
5.1	CASO 1	52
5.2	CASO 2	54
5.3	CASO 3	55

		18
5.4	CASO 4 . . . . .	57
5.5	CASO 5 . . . . .	58
5.6	CASO 6 . . . . .	60
5.7	CASO 7 . . . . .	62
5.8	CASO 8 . . . . .	64
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das formas de diminuir o consumo de energia e, conseqüentemente, as emissões de poluentes, é incorporar a integração eficiente de calor em plantas industriais. Para esse fim, o nível de aquecimento e resfriamento das correntes do processo é avaliado e a energia disponível é usada dentro do processo por meio de uma Rede de Trocadores de Calor (RTC). O setor industrial é responsável por grande parte do consumo de energia em todo o mundo e, portanto, grandes economias potenciais podem ser obtidas.

Nos últimos 40 anos, muitos trabalhos sobre síntese de RTC surgiram e, após uma revisão crítica de muitos trabalhos, Furman e Sahinidis (2002) propuseram uma classificação baseada na abordagem, em métodos sequenciais e métodos simultâneos.

Os métodos sequenciais reduzem a complexidade computacional dividindo o problema principal em uma série de subproblemas. Dentro dessa classificação, a Tecnologia Pinch merece atenção especial por seu trabalho pioneiro (Linnhoff e Hindmarsh (1983), Linnhoff (1982)) em que os problemas são resolvidos na seguinte ordem: (1) consumo mínimo de energia; (2) número mínimo de unidades de troca de calor; e (3) custo de área mínima, ou seja, custo mínimo de rede fixa.

Conceitos estabelecidos pela Tecnologia Pinch são bastante utilizados em aplicações industriais. Vale ressaltar a adaptação de um Modelo de Transbordo ao problema de síntese de RTC proposto por Papoulias e Grossmann (1983), aplicado em etapas sequenciais. O modelo foi usado para encontrar o custo mínimo das utilidades usando uma formulação de Programação Linear (PL) e para gerar uma rede com um número mínimo de utilidades, uma formulação de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Os resultados deste trabalho foram utilizados como ponto de partida para gerar uma superestrutura que pôde ser formulada como um problema de Programação Não Linear (PNL) no notável trabalho de Floudas, Ciric e Grossmann (1986). Dividir o problema em subproblemas reduz significativamente o espaço de busca e, portanto, melhora a eficiência computacional. No entanto, deve-se notar que, dada a redução de espaço, essa abordagem também pode levar à perda de redes promissoras com custos quase ótimos.

Métodos simultâneos são formulados e resolvidos em uma única etapa, sem qualquer decomposição. Eles são baseados na definição de superestruturas e os modelos de otimização derivados são adaptados para a minimização de custos de utilidades e equipamentos, simultaneamente. Um dos modelos simultâneos mais aceitos foi desenvolvido por Yee e Grossmann (1990). O modelo possui uma formulação de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), desenvolvido a partir de uma superestrutura proposta e foi utilizado para otimizar simultaneamente o custo de energia,

o número de trocadores e o custo de capital (custo da área de trocadores). Ao final de cada um dos estágios da superestrutura, o modelo assume que a mistura das correntes divididas é isotérmica, o que simplifica os cálculos evitando os balanços de calor nos misturadores.

Outra proeminente abordagem simultânea foi apresentada por Ciric e Floudas (1991), que propuseram um modelo com a formulação de PNLIM, que foi resolvido usando a Decomposição Generalizada de Bender (DGB). O modelo emprega o modelo de hiperestrutura usado em Floudas e Ciric (1989) para selecionar a configuração da RTC e uma versão melhorada do modelo de transbordo de Papoulias e Grossmann (1983) para encontrar cargas térmicas ideais.

Os modelos de síntese de RTC são difíceis de resolver, uma vez que problemas combinatoriais associados à não-linearidade e à não-convexidade estão tipicamente presentes. Dessa forma, os modelos simultâneos acima mencionados dão origem a vários trabalhos que procuram encontrar melhores soluções e melhorar as formulações. Abordagens de soluções baseadas em heurísticas, programação matemática e métodos estocásticos estão sendo desenvolvidas e, com avanços computacionais, melhores soluções têm sido encontradas para os casos mais complexos (Short et al. (2016), Pavão, Miranda et al. (2018)).

Os métodos estocásticos usam apenas informações da avaliação da função objetivo não exigindo que sejam diferenciáveis. O efeito das descontinuidades não é complexo de se lidar e a função objetivo pode ser tratada como uma “caixa preta”. Exemplos importantes de métodos estocásticos são aqueles motivados por analogias com a natureza, tais como Algoritmos Genéticos (GA) do inglês “*Genetic Algorithms*”, o Recozimento Simulado (SA) do inglês *Simulated Annealing*, a Otimização por Enxame de Partículas (PSO) do inglês “*Particle Swarm Optimization*”, a Otimização por Colônias de Formiga (ACO) do inglês “*Ant Colony Optimization*” e Evolução Diferencial (DE) do inglês “*Differential Evolution*”.

Em relação a síntese de RTC, os métodos estocásticos alcançaram resultados notáveis e estes são apresentados no decorrer deste trabalho.

GA e DE são algoritmos evolutivos capazes de lidar com funções multimodais não diferenciais, não lineares, não convexas e trabalham com parâmetros discretos ou contínuos (ou com uma combinação deles). Eles são fáceis de implementar, robustos e versáteis. Devido a essas particularidades, os GA têm sido extensivamente explorado com bons resultados em muitos problemas de engenharia, incluindo-se a síntese de RTC. A DE tem sido usada recentemente como uma alternativa promissora para a obtenção de resultados interessantes, como por exemplo, na otimização de trajetórias de veículos lançadores de satélites ((GHOSH; CHATTOPADHYAY, 2015)) e no gerenciamento de congestionamentos em sistemas de energia ((SUGANTHI et al., 2018)), porém em problemas de síntese de RTC, seu desempenho é ainda pouco explorado.

Assim, a combinação desses dois algoritmos evolutivos emergiu como uma ideia interessante, a qual foi implementada neste trabalho. Um GA é usado para encontrar topologias de RTC ideais, enquanto a DE é empregada para realizar a otimização contínua, encontrando cargas de calor e frações das correntes divididas ideais para as topologias propostas pelo GA.

O presente trabalho busca contribuir com problemas de síntese simultânea de RTC, por meio de uma nova abordagem híbrida aplicada a um modelo matemático baseado na superestrutura de Yee e Grossmann (1990), considerando a mistura não isotérmica e divisão nas correntes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método de otimização simultânea utilizando duas técnicas não determinísticas: GA e DE, para a síntese das redes de trocadores de calor com esforço computacional aceitável.

#### 1.1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Desenvolver um modelo matemático baseado na superestrutura de Yee e Grossmann (1990).
- b) Avaliar o desempenho e limitações do modelo desenvolvido por meio do ambiente de programação MATLAB aplicando o algoritmo que combina os métodos estocásticos Algoritmos Genéticos (GA) e Evolução Diferencial (DE).
- c) Comparar outros métodos estocásticos aplicados ao modelo com o método GA-DE.

## 1.2 IMPORTÂNCIA E LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Realizar uma integração energética eficiente em uma planta industrial, pode reduzir o consumo de utilidades externas, diminuindo os gastos energéticos da planta. Encontrar uma rede de trocadores de calor que minimize esses gastos, possibilita uma grande avanço na tentativa de diminuir o consumo de energia.

No presente trabalho, o algoritmo pode ter tido a sua eficiência limitada pelo ambiente de programação MATLAB, já que, trabalhar com problemas com um número de variáveis muito grande, demandaria um elevado esforço computacional.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, incluindo-se esta introdução.

O capítulo 2 é dedicado à descrição do problema. São abordados alguns conceitos básicos que desencadeiam na síntese de redes de trocadores de calor. As diferentes alternativas para realizar a síntese também são apresentadas, bem como a estratégia proposta.

No capítulo 3 faz-se uma revisão da literatura sobre a síntese de redes de trocadores de calor e está dividido em duas seções. Na primeira seção, os conceitos mais importantes e primordiais referentes aos métodos sequenciais e simultâneos são apresentados com o objetivo de situar a presente proposta no estado da arte. A segunda seção é dedicada a apresentação dos métodos estocásticos, na qual os mais relevantes estudos são expostos em cada um dos exemplos citados.

O capítulo 4 é dividido em duas seções. A primeira é dedicada a formulação do modelo, onde são mostradas as suas principais características e estratégias para lidar com a violação de restrições. Na segunda seção, o algoritmo proposto GA-DE, é descrito.

O algoritmo é aplicado a oito casos estudados na literatura e estes resultados são mostrados no capítulo 5. No capítulo 6, é feita uma análise dos resultados encontrados e a performance do algoritmo é avaliada nos problemas com maiores números de variáveis.

O trabalho finaliza com as conclusões da pesquisa no capítulo 7.

## 2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

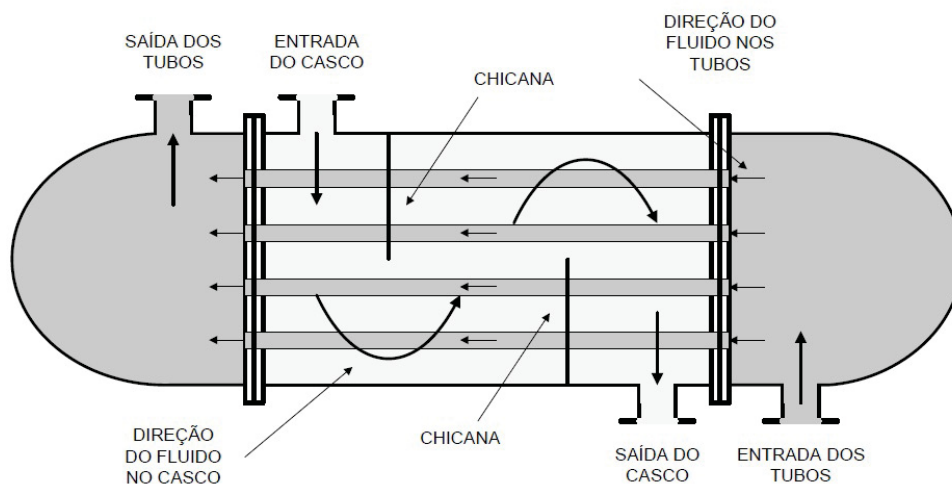
Os equipamentos utilizados para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas são chamados de Trocadores de Calor.

Os fluidos de processo que são transportados de um equipamento a outro, são chamados de correntes de processo. Essas correntes, quando necessitam ser aquecidas, são chamadas de correntes frias e quando necessitam ser resfriadas, são chamadas de correntes quentes. O equipamento responsável pela troca térmica entre duas correntes de processo é classificado como recuperador de calor e a região onde elas se encontram, é chamada de região de recuperação.

Quando o calor disponível nas correntes quentes não é o suficiente para aquecer as correntes frias, essas são aquecidas por equipamentos chamados aquecedores que empregam utilidades externas ao processo. O mesmo ocorre com as correntes quentes com calor disponível na região de recuperação. Se há calor excedente, um resfriador será necessário para realizar o equilíbrio térmico, por meio do emprego de uma utilidade fria.

Dentre os vários tipos de trocadores de calor, o mais empregado é o trocador casco e tubo, ou carcaça e tubo, ou ainda, trocador de calor multitubular. Isto porque possui uma construção resistente, um projeto flexível, além de ser facilmente adaptável às condições de operações do processo. Este tipo de equipamento é o objeto de estudo deste trabalho. A FIGURA 1 apresenta um exemplo de um trocador do tipo casco e tubo.

FIGURA 1 – TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO



FONTE: Suárez e S.S. Ravagnani (2012)

Ele é composto por um casco cilíndrico, contendo um conjunto de tubos, colocados paralelamente ao eixo longitudinal do casco. Esses tubos são presos em suas extremidades a placas perfuradas denominadas espelhos e são suportados pelas chicanas, que são placas perfuradas que direcionam o fluido que escoar por fora dos tubos. Um dos fluidos escoará pelo interior dos tubos e outro por fora. O trocador de calor do exemplo é classificado como contracorrente, pois os fluidos entram por lados opostos no trocador, já aqueles que permitem os fluidos entrarem do mesmo lado são chamados de trocadores com escoamento concorrente ou paralelo.

Uma rede de trocadores de calor é formada por um conjunto de recuperadores, aquecedores e resfriadores. A tarefa de estruturar as trocas ocorridas entre as correntes, escolher os fluidos que irão trocar calor, e conseqüentemente, configurar a rede dos equipamentos de troca térmica, é o que denomina-se de síntese de redes de trocadores de calor (RTC).

A síntese de RTC é um problema extremamente complexo, pois quando várias correntes quentes e frias de processos e utilidades estão disponíveis, as escolhas das correntes ou utilidades que deverão trocar calor em um equipamento têm natureza combinatorial. Além disso, as propriedades físicas dos fluidos envolvidos variam com a temperatura e influenciam na transferência de calor a tal ponto de influenciar nas decisões a serem tomadas em relação a materiais de construção e ao projeto do equipamento. Há também uma série de considerações referentes à segurança ou restrições operacionais que influenciam na síntese da rede.

Com tantas características, é difícil classificar tais problemas. Furman e Sahinidis (2002) reclassificaram os métodos existentes em dois novos grupos: os que se utilizam de técnicas sequenciais e os que usam técnicas simultâneas.

As técnicas sequenciais têm como estratégia dividir o problema em uma série de subproblemas, sendo que cada subproblema possui um objetivo diferente, mas todos eles impactam no custo total anual da rede. Duas técnicas sequencias foram muito difundidas na literatura. A primeira delas ficou conhecida como Análise Pinch, que é baseada em conceitos termodinâmicos e regras heurísticas. A segunda técnica utiliza-se de métodos de programação matemática. Neste tipo de abordagem, três problemas distintos são resolvidos. Primeiramente determina-se o consumo mínimo de utilidades por meio da solução de um problema de Programação Linear (PL), que pode ser feita na forma do problema de transporte, conforme o trabalho de Cerda e Westerburg (1983) ou como na forma de um problema de transbordo, conforme o trabalho de Papoulias e Grossmann (1983), que inclui restrições adicionais para a transferência de calor entre correntes. Após isto, o problema é dividido pelo ponto Pinch em sub-redes com o objetivo de minimizar o número de trocadores, utilizando Programação Linear Mista Inteira (PLIM), que pode não ter solução única. Finalmente, a rede final pode ser obtida por meio de uma formulação de Programação Não Linear (PNL) utilizando-se uma

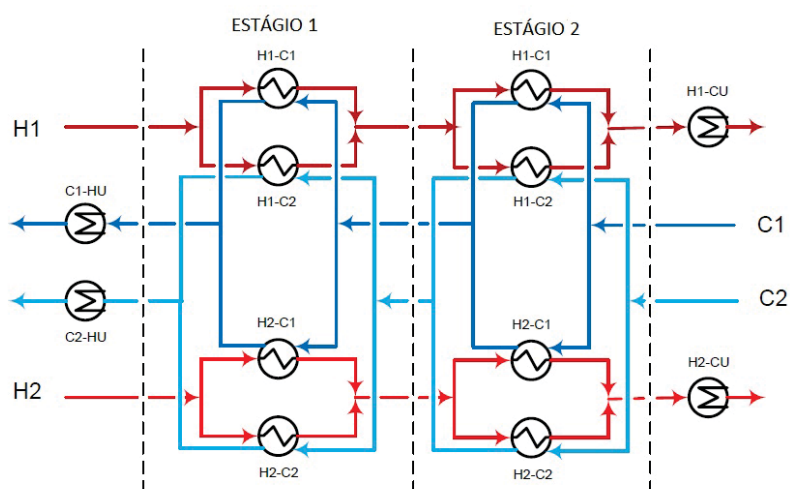
superestrutura para determinar o mínimo de custo de investimento, como proposto por Floudas, Ciric e Grossmann (1986).

Os trabalhos que utilizam técnicas sequenciais baseados em conceitos termodinâmicos têm como destaque o método de projeto Pinch (Pinch Design Method) conduzido por Linnhoff ((LINNHOFF; HINDMARSH, 1983), (LINNHOFF; AHMAD, 1990), (AHMAD; LINNHOFF; SMITH, 1990), (LINNHOFF, 1993)).

Com relação às técnicas de otimização simultâneas, a síntese da rede de trocadores de calor é realizada em uma única etapa e o modelo de otimização é baseado em uma superestrutura.

O modelo simultâneo mais aceito foi desenvolvido Yee e Grossmann (1990) e é também conhecido como *Modelo Synheat*, baseado em uma superestrutura conhecida como Stage-wise Superstructure (SWS). Essa superestrutura apresenta estágios e foi previamente apresentada por Yee, Grossmann e Kravanja (1990). Em cada estágio dividido em intervalos de temperatura, supõe-se a troca de calor entre todos os pares possíveis de correntes quentes e frias. O modelo tem a formulação de um problema de PNLIM, que pode gerar redes em que o custo de utilidades, o número de trocadores, a área desses trocadores e a seleção de combinações podem ser otimizados simultaneamente. Além disso, o modelo não depende da suposição de abordagens de temperatura fixa, nem da previsão do ponto Pinch para a divisão em sub-redes. Ao final de cada estágio, o modelo traz a consideração de que a mistura de correntes seja isotérmica. Como resultado, os balanços de energia nos pontos de mistura podem ser eliminados e o resultado é que as restrições do problema tornam-se lineares. Assim, o modelo fica robusto e pode ser resolvido com relativa facilidade.

FIGURA 2 – SUPERESTRUTURA DE DOIS ESTÁGIOS PARA PROBLEMA COM QUATRO CORRENTES DE PROCESSO, DUAS QUENTES E DUAS FRIAS.



FONTE: adaptado de Escobar (2011)

A FIGURA 2 apresenta uma superestrutura baseada em dois estágios (etapas) para duas correntes quentes ( $H1$ ,  $H2$ ) e duas correntes frias ( $C1$ ,  $C2$ ), com uma utilidade quente  $HU$  e uma utilidade fria  $CU$ . Os círculos representam os trocadores de calor em contracorrente. As linhas tracejadas representam as fronteiras dos estágios na superestrutura e servem para localizar as posições das temperaturas das correntes de processo.

Alguns dos principais resultados da literatura referentes aos métodos sequencial e simultâneo, são apresentados no capítulo 3.

No presente trabalho, a síntese de redes de trocadores de calor é realizada simultaneamente utilizando a superestrutura proposta por Yee e Grossmann (1990) sem considerar a mistura isotérmica. Os trocadores de calor utilizados são do tipo casco e tubo contracorrente. As redes (estruturas/topologias) são otimizadas pelos algoritmos genéticos e as cargas térmicas e frações das correntes divididas são otimizadas pelo algoritmo de evolução diferencial.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Diante da importância das redes de trocadores de calor no custo global dos processos industriais, muito se tem estudado sobre o assunto.

O referencial bibliográfico apresentado neste capítulo, faz uma abordagem das principais referências que embasaram a teoria de síntese de redes de trocadores de calor, dando maior destaque à síntese sequencial e simultânea e aos métodos estocásticos. Dentre os métodos sequenciais, o que causou maior impacto foi o Método do Projeto Pinch e por esse motivo, os principais resultados que desencadearam na Tecnologia Pinch são apresentados. Paralelamente ao desenvolvimento desses métodos sequenciais, os métodos simultâneos surgem para "dar mais fôlego à teoria". Com a complexidade dos problemas, as técnicas de otimização estavam demandando um esforço computacional cada vez maior e diversos modelos com simplificações das superestruturas surgiram com o uso dos métodos estocásticos.

#### 3.1 SÍNTESE SEQUENCIAL E SIMULTÂNEA

A síntese de processos começou a ser estudada em meados dos anos 60 com trabalhos em síntese de caminhos de reação e síntese de fluxograma. Segundo Hlaváček (1978), o desenvolvimento de um fluxograma de um processo envolve quatro estágios básicos: a seleção de uma reação apropriada, a síntese do caminho da reação escolhida, a síntese da sequência de separação e a síntese da rede de trocadores de calor do sistema. Cada estágio tem um nível relativamente elevado de complexidade e, portanto, é tratado separadamente, com metodologias próprias para a solução do problema. Embora os primeiros trabalhos sobre a síntese de redes de trocadores de calor (RTC) tenham sido publicados na década de 1960, com Hwa (1965) usando métodos de programação separável e com Kesler e Parker (1969) usando programação linear, foi somente a partir da década seguinte, com a crise mundial de energia, que a síntese de redes de trocadores de calor veio a tornar-se uma área de interesse de pesquisadores, tornando-se assim um dos ramos mais estudados da síntese de processos.

O primeiro trabalho de relevância na área, apesar de não prever a divisão de correntes e nem a geração de redes cíclicas, é o trabalho de Masso e Rudd (1969). Os autores desenvolveram um método heurístico para realização da síntese da rede de trocadores de calor utilizando um procedimento que habilitava o computador a "aprender" e a obter sequências "ótimas", baseando-se nos ajustes de pesos que representavam a experiência adquirida em tentativas anteriores, técnica essa chamada de aprendizagem adaptativa. O método era muito simples e fácil, mas não garantia a

geração de redes ótimas.

Lee, Masso e Rudd (1970) utilizaram para a resolução do problema uma técnica matemática de ramificação e bifurcação, conhecida como *Branch and Bound*. O elevado número de soluções alternativas, ainda que a maioria destas não fossem factíveis, foi reduzido, mas não o suficiente para tornar a técnica eficaz. Entretanto, além de não garantir uma rede globalmente ótima, visto que não era permitido a divisão de correntes, os maiores problemas resolvidos por essa técnica envolviam no máximo dez correntes.

A primeira abordagem sequencial, foi iniciada na tese de doutorado de Hohmann (1971). Este trabalho foi o primeiro a introduzir o critério do consumo mínimo de utilidades antes da síntese da rede por meio do uso de diagramas termodinâmicos. Além deste critério, o autor propôs também uma regra para determinação do número mínimo de trocadores de calor em uma malha. Nessa época trabalhava-se exclusivamente com métodos matemáticos e por essa razão seu trabalho teve pouca contribuição com os estudos do momento. Porém, posteriormente, os conceitos introduzidos por ele foram muito bem aproveitados no desenvolvimento da Tecnologia Pinch, mais tarde denominada Análise Pinch devido à suas potencialidades.

A proposição feita por Kesler e Parker (1969) foi aperfeiçoada por Kobayashi, Umeda e Ichikawa (1971), tratando o problema de síntese como um caso de otimização em que a rede seria gerada por meio da minimização de uma função custo com a formulação de um problema de programação linear. No entanto, como a solução acabava sendo restringida e não era possível garantir a geração de redes ótimas, eles utilizaram uma técnica baseada na divisão das correntes de processo em pequenos elementos de calor, os quais chamaram de *exchangelets*. Por meio desses elementos de igual tamanho eram feitos os cruzamentos entre as correntes, diminuindo as dificuldades do problema original. O método ainda propunha critérios para a divisão de correntes e a possibilidade de redes cíclicas. Com isso foi estruturado um diagrama que também foi fundamental para o desenvolvimento dos conceitos para as bases da Tecnologia Pinch. Baseado neste trabalho, ainda neste ano, Nishida, Kobayashi e Ichikawa (1971) propuseram um método gráfico um tanto trabalhoso e impreciso de otimização para minimizar a área total de troca térmica.

No ano seguinte, McGilliard e Westerberg (1972) apresentaram o primeiro trabalho incorporando a análise de sensibilidade na síntese da rede. Por ser esta uma das tarefas mais comuns na simulação de um processo industrial, este trabalho tem uma grande importância histórica.

A maioria dos trabalhos apresentados até o momento exigia um esforço computacional muito elevado para os equipamentos da época. No entanto, em 1974 foi desenvolvido um método sequencial simples, de fácil implementação e que consumia pequeno esforço computacional. Este método, desenvolvido por Ponton e Donaldson

(1974) e conhecido como “*fast-method*”, consistia no cruzamento da corrente quente com maior temperatura de entrada com a corrente fria com maior temperatura de saída. Entretanto, apesar de sua simplicidade, o método produzia resultados distantes do ponto ótimo, além de não prever a divisão de correntes. A heurística desenvolvida nesse método era muito boa e foi utilizada em vários outros trabalhos posteriores, sendo até hoje ainda considerada em alguns trabalhos.

O final da década de setenta e o início da década de oitenta foi o marco de uma grande mudança no estudo da síntese de redes de trocadores de calor. Uma abordagem aos principais trabalhos que deram início a toda essa mudança é feita a partir deste momento.

Um algoritmo estocástico foi apresentado por Nishida, Liu e Lapidus (1977), no qual foi possível garantir a Máxima Recuperação de Energia (MRE) para uma determinada temperatura mínima de aproximação entre as correntes nos terminais do trocador, conhecida como  $\Delta T_{min}$ . Os autores utilizaram um algoritmo para obtenção de área mínima para minimizar a área de transferência de calor e minimizaram o custo global da rede também por meio de regras evolutivas.

Os primeiros a realizarem a síntese de redes de trocadores de calor utilizando técnicas da Pesquisa Operacional foram Grossmann e Sargent (1978), porém os métodos de programação matemática vindos desta área precisavam ser ajustados para que pudessem obter melhores resultados.

No trabalho de Umeda, Itoh e Shiroko (1978) é apresentado um método de conceituação termodinâmica, no qual o balanço de energia da rede era representado na forma gráfica. Este balanço, na realidade, foi desenvolvido por Hohmann (1971) e tratava-se de uma curva composta de disponibilidade de energia. Os autores determinaram uma região de estrangulamento na rede onde as trocas de calores eram limitadas. Esta região foi denominada de “ponto pinch” ou Ponto de Estrangulamento Energético (PEE). Eles também determinaram que a MRE estava relacionada com a localização desse “ponto pinch”, sendo que o grau de recuperação de calor na rede estava intimamente ligado à mínima diferença de temperatura permissível na rede de trocadores de calor. Entretanto, os resultados por eles apresentados, com relação ao consumo de utilidades, não era mínimo, pois as regras heurísticas utilizadas não garantiam consumo mínimo de utilidades.

De acordo com Linnhoff e Flower (1978) um algoritmo termodinâmico combinatorial é capaz de identificar as demandas para as utilidades quentes e frias para uma máxima recuperação de energia utilizando um procedimento tabular, denominado Tabela do Problema (TP) ou “*Problem Table*”, sem se preocupar com o número de trocadores existentes na rede. Este método foi fundamental para o desenvolvimento da Tecnologia Pinch, visto que o problema é dividido em intervalos de temperatura. Para cada intervalo é sintetizada uma sub-rede e as sub-redes são agrupadas, formando-se

uma rede preliminar; em seguida, essas redes preliminares são evoluídas utilizando algumas técnicas evolutivas.

Os trabalhos de Hohmann (1971), Umeda, Itoh e Shiroko (1978), Linnhoff e Flower (1978), estabeleceram as bases da Tecnologia Pinch, que se desenvolveria durante a década de oitenta.

Dando continuidade ao trabalho, Umeda, Harada e Shiroko (1979) apresentaram a importância do PEE, tal como a possibilidade de movê-los ou eliminá-los. E ainda este ano, Umeda, Niida e Shiroko (1979) apresentaram um programa computacional para um  $\Delta T_{min}$  específico que obtém uma máxima recuperação de energia e identifica os PEE.

Um importante trabalho apresentado por Linnhoff, Mason e Wardle (1979) fez uma análise detalhada dos principais pontos tratados em uma rede de trocadores de calor. Os autores discutiram a importância do  $\Delta T_{min}$ , o papel das múltiplas utilidades, o número mínimos de unidades, divisão de correntes, trocas cíclicas, o papel das restrições e modificações de dados. Todas essas questões, embora essenciais em redes industriais, haviam sido pouco abordadas na literatura até aquele momento.

Uma nova abordagem para a síntese sistemática de redes de trocadores de calor é descrita em Flower e Linnhoff (1980). Para um determinado problema, esta abordagem leva a uma lista completa de todas as soluções que existem, utilizando um grau prescrito de recuperação de energia, o número mínimo de trocadores, aquecedores e refrigeradores, sem considerar divisão de correntes. Ou seja, trata-se de uma abordagem combinatorial, onde uma variedade de critérios termodinâmicos são utilizados para minimizar o tamanho do problema através da prevenção de geração de soluções inviáveis.

Um programa capaz de avaliar e otimizar o desempenho de uma rede de trocadores de calor simples foi apresentado por Shah e Westerberf (1980). Denominado Energy Recovery Optimization System (EROS), este programa permite uma análise até mesmo de redes já existentes. Ele é capaz de estabelecer procedimentos de solução, obter um ponto de partida viável, atingir rotinas de otimização eficientes, usar restrições como uma estratégia de solução e quando uma restrição for violada, o programa deve ser capaz de modificar o conjunto de equações redefinindo um procedimento de solução eficiente para que a otimização possa ser efetivada com a melhor eficiência computacional possível.

Nos trabalhos de Linnhoff e Turner (1980) e Linnhoff e Turner (1981) as bases do "*Pinch Design Method*" foram apresentadas a partir da inserção de importantes conceitos. A partir da identificação do PEE, dividiu-se o problema em duas regiões, acima e abaixo do PEE. Além disso, descobriu-se que o calor não poderia ser transferido através dele, para não aumentar o consumo de utilidades.

Um novo método heurístico, que fazia uma abordagem a duas temperaturas

foi apresentado no trabalho de Colbert (1982). Contrário à ideia de considerar uma diferença mínima de temperatura permissível na rede, Colbert considerava que existiam duas diferenças de temperatura, o Heat Recovery Approach Temperature (HRAT), e o Exchanger Minimum Approach Temperature (EMAT). Segundo o autor, estas duas diferenças de temperatura possibilitavam relaxações de energia na rede e isso possibilitaria a geração de redes próximas da ótima com poucos trocadores de calor. Foi argumentado também que o método dos intervalos de temperatura, proposto por Linnhoff e Flower (1978) era um caso particular do método, quando o HRAT era igual ao EMAT.

O conceito de curva composta foi introduzido por Linnhoff (1982). A grande curva composta é explicada em função da cascata de calor. As aplicações envolvem múltiplas utilidades, PEE para utilidades e modificações nos processos.

Finalmente, o Método do Ponto de Estrangulamento (MPE) ou "*Pinch Design Method*" foi apresentado por Linnhoff e Hindmarsh (1983). O método utiliza o conceito do "ponto pinch" e a Tabela do Problema para dividir o problema em duas regiões, acima e abaixo do "pinch". As duas subredes são sintetizadas, partindo-se da região do PEE e caminhando na direção contrária. As trocas na região do PEE são realizadas de forma a obter a máxima quantidade de calor possível de ser transferida, seguindo alguns critérios de viabilidade. Quando há mais do que uma possibilidade de troca, o projetista tem toda liberdade de escolha, desde que esta escolha não viole os critérios que norteiam o método.

Um método para as vazões mínimas de utilidades foi apresentado em Shah e Westerberg (1983). Este método se apresenta como um problema de transporte da Pesquisa Operacional, sendo resolvido por programação linear. Ainda neste ano, Cerda e Westerburg (1983) formularam um modelo de PLIM para o cálculo do número mínimo de trocadores, sendo este transformado em um problema de programação linear por relaxação, devido ao grau de complexidade da resolução do primeiro modelo.

O modelo de transbordo da Pesquisa Operacional foi adaptado ao problema de síntese de redes de trocadores de calor por Papoulias e Grossmann (1983). Foi desenvolvido um procedimento baseado em quatro etapas: o desenvolvimento de intervalos de temperatura, a previsão do custo mínimo de utilidades com a aplicação do modelo de transbordo utilizando PL, o aumento da integração de energia a partir da previsão de variações da localização do "ponto pinch" e a geração de uma rede com número mínimo de unidades por meio de um método de PLIM, formulada também com o modelo de transbordo.

O custo mínimo das utilidades e o número mínimo de trocadores de calor fornecidos pela aplicação do método de Papoulias e Grossmann (1983), foram utilizados no trabalho de Floudas, Ciric e Grossmann (1986) para gerar automaticamente uma rede de trocadores de calor com custo mínimo de investimento. Os autores, propuseram

um método algorítmico baseado em PNL que gera uma superestrutura, permitindo divisões, misturas e "by-pass" de correntes, sendo ainda possível otimizar o  $\Delta T_{min}$  por meio de um processo iterativo.

Os primeiros estudos de integração energética, foram voltados à síntese de redes de trocadores de calor em novas plantas e somente com a crise energética, em meados dos anos oitenta, é que as modificações em redes existentes começaram a ser estudadas de maneira sistemática. *Retrofit* de redes consiste no aumento do nível de recuperação de energia em um processo, através da realocação dos trocadores existentes e aumento da área de troca térmica, por meio da alocação de novos trocadores.

O excelente trabalho de Tjoe e Linnhoff (1986), apresenta uma metodologia completa para ajustes de processos em operação ("*retrofit*"), baseada na "filosofia de metas" da Análise Pinch. Neste trabalho, o melhor ajuste para a rede existente, somente é garantido com uma correta estimativa para  $\Delta T_{min}$ .

Paralelamente ao desenvolvimento da Análise Pinch, ao longo das décadas oitenta e noventa, surgiram implementações que reproduziram os conceitos peculiares ao pinch em formulações matemáticas, envolvendo problemas de otimização do tipo linear, não linear, linear inteiro misto e não linear inteiro. Assim, a otimização simultânea começava a despontar como uma alternativa às limitações dos métodos sequenciais para síntese de redes.

O método simultâneo para a integração energética e otimização da planta proposto por Duran e Grossmann (1986), apresentou ligeira melhora quando comparado à aproximação sequencial. Neste trabalho, um novo método para identificação do PEE é apresentado, sem a necessidade de dividir as temperaturas em intervalos.

Em Ciric e Floudas (1989) foi proposto um procedimento em duas etapas para o ajuste de uma planta já existente. Na primeira etapa um modelo de PLIM é utilizado para a escolha das trocas entre as correntes, baseado nas possíveis modificações estruturais, desejando minimizar o custo dos trocadores a serem instalados. Na segunda etapa, usando as informações geradas na primeira, uma hiperestrutura é gerada contendo todas as possíveis configurações de redes e a solução é obtida por um modelo de PNL.

Uma análise sobre as incertezas durante a síntese de uma rede de trocadores de calor, é apresentada por Floudas e Ciric (1989). As várias combinações de trocas que devem satisfazer os critérios definidos anteriormente à etapa de síntese e a não convexidade existente na tarefa de otimização da rede, são algumas dessas incertezas. Para isso, um método simultâneo, baseado na superestrutura de Floudas, Ciric e Grossmann (1986) e combinado com o modelo de transbordo de Papoulias e Grossmann (1983), é proposto com o objetivo de obter a melhor combinação possível dos cruzamentos entre as correntes e a melhor configuração da rede de mínimo custo

de investimento. Este método é resolvido por PNLIM, decomposto em um problema de PNL e em um outro de PLIM, que pode ser resolvido pelo algoritmo de Relaxação Lagrangeana.

No trabalho de Linnhoff e Ahmad (1990) um procedimento para a síntese da rede com custo próximo do ótimo foi apresentado. As metas de custo de capital e energia são fixadas antes da síntese e um modelo de custo simples é usado. Mais tarde, em Ahmad, Linnhoff e Smith (1990) esse modelo foi estendido de modo a permitir que se explore as diferenças entre os coeficientes de película para reduzir a área da rede, as equações não lineares para o custo, os materiais de construção e tipos de trocadores não uniformes e os trocadores não inteiramente em contracorrente.

Num primeiro momento, em Yee, Grossmann e Kravanja (1990) uma superestrutura baseada em modelos de PNL é aplicada para a otimização da energia e área antes da síntese e para a modelagem de trocadores multicorrentes, onde mais de duas correntes trocam calor no mesmo equipamento. Em seguida, Yee e Grossmann (1990) usaram essa mesma superestrutura para otimizar simultaneamente o custo de energia, o número de trocadores e o custo da área de troca, usando um modelo de PNLIM. Em ambos trabalhos, não há divisão do problema em subregiões a partir do PEE, já que o mesmo nem ao menos é abordado.

Uma formulação para o problema de síntese de redes de trocadores de calor do tipo PNLIM foi apresentada no trabalho de Ciric e Floudas (1991). O problema foi resolvido usando DGB e superestrutura proposta em Floudas e Ciric (1989) foi utilizada para selecionar a configuração ideal, bem como uma versão modificada do modelo de transbordo de Papoulias e Grossmann (1983) para selecionar as cargas térmicas. Esta técnica pode ser aplicada a problemas com PEE ou pseudo-pinch, em que se permite troca térmica através do PEE, além de que, apresenta malhas com menos trocadores e é mais econômica quando comparada a outros métodos de resolução.

O trabalho de Yee e Grossmann (1991) apresenta um procedimento sistemático para o reprojeto (*retrofit*) de redes de trocadores de calor. A abordagem é dividida em duas etapas. Na primeira delas, a viabilidade econômica de um *retrofit* para a rede existente é avaliada, e isso envolve o cálculo de limites inferiores no custo de utilidades, área adicional e modificações estruturais sujeitas a vários níveis de recuperação de calor. Estes limites são utilizados para construir uma curva de custo que mostra a viabilidade potencial para um tempo de retorno especificado e as melhores economias que podem ser alcançadas pelo retrofit. Caso seja viável, a segunda etapa é iniciada. Esta etapa usa informações da etapa anterior para determinar uma nova rede detalhada exibindo menor custo anual. Uma nova superestrutura é construída com uma formulação de PNLIM e nela, a recuperação de energia, as cargas de calor, a temperatura mínima de aproximação e as temperaturas de entrada das correntes não são fixas, sendo todas otimizadas.

Como se pode ver, paulatinamente, alguns trabalhos foram o ponto de partida de outros e toda essa teoria vem sendo tecida até os dias de hoje, numa harmoniosa e verdadeira obra de arte. Embora tantos outros trabalhos merecessem ser mencionados aqui, o objetivo é apresentar os principais deles que deram base a essa teoria. Não desmerecendo os trabalhos mais atuais, dentre aqueles que utilizam as técnicas sequenciais, destacam-se os estudos realizados por Pettersson (2005), Miranda et al. (2017) e Jagannath e Almansoori (2016), e dentre as técnicas simultâneas tem-se Li, Luo et al. (2012), Wu et al. (2015) e Kong e Maravelias (2018).

Os estudos envolvendo essas diferentes técnicas, sejam elas sequenciais ou simultâneas, continuam crescendo numa diversidade de modelos e técnicas de resolução impressionantes. A apresentação cronológica de alguns desses estudos, segue nas seções e subseções seguintes dentro de cada categoria abordada.

### 3.2 MÉTODOS ESTOCÁSTICOS

Os métodos estocásticos utilizam informações da função objetivo e das restrições do problema, mas não requerem que a função seja diferenciável. Isso proporciona melhores chances de alcançarem a solução global, já que, podem lidar com descontinuidades, não linearidades e com a existência de máximos e mínimos locais com mais facilidade. A ideia básica desses métodos, é utilizar regras probabilísticas de forma "aleatória" em um determinado espaço de busca viável, a fim de buscar o valor ótimo da função objetivo.

Dentre as várias heurísticas enquadradas como estocásticas, destacam-se os Algoritmos Genéticos (GA), propostos por Holland (1975), Simulated Annealing (SA), proposta por Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi et al. (1983), Otimização por Enxame de Partículas (PSO), proposto por Kennedy (1995), Evolução Diferencial (DE), proposto por Storn e Price (1995) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO), proposto por Dorigo, Caro e Gambardella (1999). Elas se tornaram uma alternativa aos métodos de síntese de redes de trocadores de calor, já que podem reduzir o tempo computacional para a resolução de problemas que utilizam técnicas de programação matemática. Podem ser aplicados tanto na síntese simultânea quanto na sequencial.

Uma breve apresentação a essas heurísticas citadas, será feita nas próximas subsubseções. A tentativa foi expor sempre os primeiros e/ou mais relevantes trabalhos envolvendo a técnica em questão, aplicada a síntese de redes de trocadores de calor. Alguns trabalhos apresentam resultados provenientes da utilização da hibridização de métodos que são baseados em diferentes heurísticas e são discutidos quando da apresentação de cada heurística utilizada.

### 3.2.1 Algoritmos Genéticos

Foram propostos por Holland (1975) em um trabalho de processos naturais adaptáveis e no desenvolvimento de modelos em que os mecanismos da evolução natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais. Holland estudou a evolução natural considerando esta evolução um processo robusto, simples e poderoso, que poderia ser adaptado para obtenção de soluções computacionais eficientes para problemas de otimização.

Inspirados na forma de como os seres vivos sobrevivem e passam seu material genético para as próximas gerações, utilizam os princípios de seleção natural e evolução propostos por Charles Darwin e, por esse motivo, também são chamados de algoritmos evolutivos. Trabalham com uma população de indivíduos aleatórios candidatos a solução do problema e a cada geração, essa população é avaliada. Os mais aptos são selecionados e podem sofrer modificações em suas características através de cruzamentos (crossover) e mutações, gerando descendentes. Finalmente, os mais aptos entre os indivíduos pais e filhos, passam para a próxima geração, resultando em indivíduos cada vez mais aptos, enquanto os indivíduos menos aptos tendem a desaparecer. Mais detalhes sobre o método pode ser encontrado em Brownlee (2011).

Lewin, Wang e Shalev (1998), apresentaram um dos primeiros trabalhos utilizando GA aplicados à síntese de redes de trocadores de calor. Os autores propuseram um modelo baseado em um problema de programação linear inteira mista, sem divisão de correntes, em que a rede é determinada por meio de um algoritmo genético e as quantidades de calor das unidades são encontradas utilizando o método SIMPLEX. Mais tarde, Lewin (1998) modificou esse modelo adaptando-o à problemas não lineares, que prevê a divisão de correntes e otimizado com o auxílio de algoritmos genéticos.

Em Ravagnani, Silva, Arroyo et al. (2005) os AG são usados em ambas as etapas da otimização sequencial da rede de trocadores de calor. Ou seja, primeiramente o valor ótimo de  $\Delta T_{min}$  é encontrado através dos GA juntamente com o Problema da Tabela. Em seguida o problema é dividido em duas regiões, acima e abaixo do ponto pinch e então essas duas regiões são otimizadas também com GA, sempre considerando a divisão de correntes.

A técnica proposta por Dipama, Teyssedou e Sorin (2008) permite que, a estrutura da rede e a distribuição de carga térmica sejam tratadas simultaneamente usando um algoritmo genético. A máxima recuperação de energia deve ser satisfeita sem violar os princípios da termodinâmica. Porém, o modelo não suporta a divisão de correntes. A função objetivo está focada na máxima recuperação de energia e os cálculos do número mínimo de trocadores e do custo mínimo da rede não são considerados no trabalho. Esse algoritmo é capaz de lidar com qualquer tipo de problemas, sejam eles lineares ou não.

Estudos mais recentes são apresentados nas próximas subseções, em que outros métodos estocásticos são combinados com GA.

### 3.2.2 Simulated Annealing

O algoritmo de SA é baseado no procedimento de Metropolis et al. (1953) proposto como uma estratégia de determinação de estados de equilíbrio de uma coleção de átomos a uma dada temperatura, ou melhor, nesse processo os metais são aquecidos acima de seu ponto de fusão e resfriados lentamente, de forma que esses átomos sejam capazes de atingir um estado de equilíbrio máximo produzindo um cristal. Somente 30 anos depois Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi et al. (1983) mostraram a analogia entre o comportamento dos problemas de otimização combinatorial, com esse procedimento de recozimento simulado estudado com o algoritmo de Metropolis. Eles partiram do princípio que este algoritmo poderia fornecer uma estrutura para o desenvolvimento de um outro algoritmo genérico de otimização capaz de escapar de ótimos locais.

O primeiro trabalho de que se tem conhecimento da aplicação dessa técnica à síntese de redes de trocadores de calor, é o trabalho de Dolan, Cummings e LeVan (1989). Ele busca otimizar simultaneamente os projetos de redes, minimizando o custo do processo. Aplicando o método a problemas da literatura, concluiu-se que o custo obtido para os casos testados são menores que os apresentados em trabalhos anteriores, mas o esforço computacional para resolver o problema de síntese é muito grande.

Athier et al. (1997) desenvolveram um algoritmo híbrido baseado em SA para resolver problemas industriais, visando minimizar a soma dos custos de investimento e operação. O algoritmo conduz a uma redução do tamanho do problema de PNL, utilizando uma abordagem mista para contornar as dificuldades características dos algoritmos de PNLIM. Este método permitiu a escolha da qualidade dos resultados obtidos, ou o tempo de cálculo de acordo com um conjunto de parâmetros especificados.

Em um trabalho muito interessante, Peng e Cui (2015) apresentaram um método de síntese simultânea eficiente que proporciona redes ótimas em um processo inferior, as estruturas das redes candidatas a solução ótima são geradas por um método probabilístico. O custo total anual mínimo de cada uma dessas estruturas candidatas é resolvido ainda nesse nível e, em seguida, enviado para o nível superior, onde diferentes estruturas são avaliadas pelo algoritmo de SA.

Estudos combinando SA com outros métodos, são apresentados a seguir.

### 3.2.3 Otimização por Enxame de Partículas

é uma técnica estocástica inspirada no comportamento social da revoada de pássaros e de cardume de peixes, desenvolvida por Eberhart e Kennedy (1995). O objetivo inicial era simular graficamente a coreografia de um bando de pássaros em uma revoada, entretanto, percebeu-se que o método poderia ser empregado como um método de otimização.

A ideia parte do seguinte princípio: por exemplo, imagine-se um grupo de pássaros buscando aleatoriamente por alimentação, numa determinada região onde há somente uma fonte de comida. Os pássaros não sabem onde a comida está, mas sabem o quão longe ela está a cada iteração de tempo (considerando um tempo discreto). Logo, a melhor estratégia para encontrar a comida é seguir o pássaro que está mais perto dela. O algoritmo PSO tenta imitar essa situação e aplicá-la na resolução de problemas de otimização. A população de pássaros é chamada nuvem ou enxame e cada pássaro corresponde a uma solução chamada partícula. Cada partícula (solução) é verificada por meio da função objetivo e é direcionada por uma determinada velocidade. Caso alguma restrição da solução seja violada, uma função de penalização é incorporada à função objetivo garantindo que soluções válidas tenham avaliação sempre maior que soluções inválidas.

No trabalho de Ravagnani, Silva, Biscaia Jr et al. (2009) o projeto de trocadores de calor do tipo casco-tubo é formulado como um problema de otimização e resolvido com a otimização por enxame de partículas. Seguindo rigorosamente os padrões de Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), o principal objetivo do trabalho é construir um trocador de calor com custo mínimo, incluindo o custo área e custo do bombeamento ou com área de troca térmica mínima, dependendo da disponibilidade de dados. Comparados com alguns casos da literatura, os resultados foram bem satisfatórios, evitando mínimos locais.

A síntese simultânea da rede através do algoritmo de PSO foi apresentada no trabalho de Silva et al. (2011). Baseado no modelo da superestrutura de Yee, Grossmann e Kravanja (1990) com divisão de correntes, o algoritmo proposto foi aplicado a alguns exemplos da literatura, e os resultados confirmam a execução de uma rede de trocadores de calor ótima com pouco esforço computacional.

Um algoritmo híbrido que combina os algoritmos de PSO e GA, foi apresentado no trabalho de Huo et al. (2012), em que a síntese simultânea da rede de trocadores de calor é realizada em dois níveis, nível superior e nível inferior. O GA é empregado para implementar a otimização estrutural no nível superior, ou seja, ele gera aleatoriamente as estruturas de rede juntamente com seus custos. No nível mais baixo, a otimização dos parâmetros de processo é um problema com formulação de PNL com restrições do tipo igualdade e desigualdade. Para a solução do problema foi desenvolvido um

algoritmo PSO ligeiramente modificado. Esta modificação foi necessária para evitar a convergência prematura nos primeiros estágios da busca e reforçar a convergência para a solução ótima global durante os últimos estágios da pesquisa. Comparado aos resultados da literatura, o método mostrou-se eficaz para encontrar soluções melhores em um tempo menor.

Pavão, Costa e Ravagnani (2016) também usaram essa mesma combinação de AG-PSO, porém com um esquema de processamento paralelo que levou a bons resultados em problemas médios com divisão de correntes e com um tempo computacional aceitável. Mais tarde, os autores Pavão, Costa e Ravagnani (2017) desenvolveram um algoritmo híbrido SA-PSO, que com um número relativamente pequeno de iterações foi capaz de encontrar resultados interessantes para problemas de tamanho médio sem divisão nas correntes. Algumas características desse método são usadas como base para o desenvolvimento de um novo método apresentado por Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017b), que combina SA e Rocket Fireworks Optimization (RFO). O algoritmo de RFO nada mais é que um método híbrido SA-PSO, em que o estágio SA é bastante similar ao que se conhece. Porém, o estágio PSO exige atenção especial, já que o número de variáveis contínuas aumentam em decorrência das RTC com divisão nas correntes. A eficácia deste método foi demonstrada nos estudos de Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017a) e Pavão, Costa, Jiménez et al. (2017), nos quais a otimização multiobjetivo de redes de trocadores de calor é realizada considerando custo e o impacto ambiental.

#### 3.2.4 Evolução Diferencial

A técnica de evolução diferencial, foi desenvolvida por Storn e Price (1995) na tentativa de usar um vetor de diferenças para perturbar o vetor de população, na resolução do problema de ajuste polinomial.

Os GA são algoritmos evolutivos, ou seja, baseiam-se nos mecanismos da evolução natural das espécies, utilizando os procedimentos de seleção de modo organizado baseados na aptidão dos indivíduos, os operadores de mutação e cruzamento. Uma diferença entre esses dois algoritmos é que, o GA gera um novo indivíduo partindo de um único progenitor, enquanto que o DE gera um novo indivíduo através da adição da diferença ponderada entre duas soluções a uma terceira solução. (Brownlee (2011)).

A primeira aplicação bem sucedida de DE para o projeto ótimo de trocadores casco e tubo, foi apresentada por Babu e Munawar (2007). Nesse trabalho, o objetivo foi avaliar a área mínima de transferência de calor necessária para atender a uma dada carga térmica, já que esta rege o custo total do trocador de calor. A técnica se mostrou uma estratégia de evolução simples, robusta e significativamente mais rápida quando comparada com algoritmos genéticos, indicando a probabilidade de alcançar o ótimo global.

No mesmo ano, o algoritmo foi desenvolvido para realizar a síntese de redes de trocadores de calor pelos autores Yerramsetty e Murty (2008). O modelo inclui a divisão de correntes e a mistura não-isotérmica para correntes que apresentam divisão nas correntes. Além disso, havendo a necessidade por razões práticas e de segurança, permite a manipulação do problema, proibindo e obrigando trocas, fixando temperaturas para as correntes. O algoritmo DE otimiza simultaneamente, para a melhor estrutura dos trocadores de calor, a temperatura mínima de aproximação  $\Delta T_{min}$ , as cargas térmicas destes trocadores e as capacidades térmicas das correntes.

Um trabalho voltado para *retrofit* em redes de trocadores de calor foi apresentado em Zhang e Rangaiah (2013). A maioria dos estudos em síntese simultânea de redes de trocadores de calor faz uma abordagem em dois níveis, em que, no nível superior usa um algoritmo estocástico para otimizar a estrutura, e no nível inferior usa um algoritmo estocástico ou determinístico para otimizar variáveis contínuas. Neste trabalho, os autores elaboraram um algoritmo integrado de DE capaz de lidar com ambas as variáveis discretas e contínuas, juntas. Assim, a estrutura da rede e o modelo *retrofit* são simultaneamente otimizados pelo algoritmo Evolução Diferencial Integrado (IDE), o que evita o aprisionamento em um ótimo local e também melhora a eficiência computacional.

Em trabalho recente, Aguitoni et al. (2018a) realizaram a síntese simultânea da RTC baseada na superestrutura de Yee e Grossmann (1990). Os autores utilizaram um GA para lidar com as variáveis discretas do problema e DE para otimizar as cargas térmicas e as frações das correntes divididas. Os autores deram continuidade a esse estudo em Aguitoni et al. (2018b) e também obtiveram bons resultados.

### 3.2.5 Otimização por Colônia de Formigas

é uma técnica otimização inspirada no comportamento de colônia de formigas na busca por alimentos, desenvolvida por Dorigo, Caro e Gambardella (1999).

No mundo real, as formigas partem da colônia e caminham aleatoriamente sobre o espaço de busca até encontrarem seu alimento. Feito isso, elas retornam à colônia deixando um rastro de feromônio depositado no chão. Quando outras formigas encontram um desses rastros, elas tendem a não seguir mais caminhos aleatórios e passam a seguir a trilha encontrada. A trilha ajuda a formiga a achar o caminho de volta e permite as outras encontrarem a fonte de alimentos com o transcorrer do tempo. No entanto, o feromônio presente nas trilhas começa a evaporar, reduzindo, assim, sua atratividade. Em um caminho pelo qual passaram mais formigas, o feromônio demora mais tempo para evaporar. Claramente, elas passarão mais rapidamente sobre um caminho curto, o que implica aumento da densidade de feromônio depositado antes que ele comece a evaporar. A evaporação do feromônio também evita a convergência para uma solução local ótima e se a evaporação não ocorresse, todas as trilhas escolhidas

pelas primeiras formigas se tornariam excessivamente atrativas para as outras e, neste caso, a exploração do espaço da solução diminuiria.

Apesar disso, quando uma formiga encontra um bom (curto) caminho entre a colônia e a fonte de alimento, outras formigas tenderão a seguir o mesmo, o que eventualmente torna um determinado caminho mais interessante. Essa técnica de otimização é ainda pouco explorada na síntese de processos de modo geral. No trabalho de Lahiri e Khalife (2014), os autores apresentaram um algoritmo híbrido que combina DE e ACO para otimizar o projeto de trocadores de calor do tipo casco e tubo e este mostrou-se bem eficiente dentro da abordagem feita no trabalho.

O problema de Myankoooh e Shafiei (2015) lida apenas com variáveis contínuas, pois a partir de uma rede pronta, o algoritmo de ACO tem por objetivo minimizar a área de troca térmica e, conseqüentemente, o custo da rede. A ideia é construir um algoritmo que seja capaz de sintetizar a rede de trocadores de calor, mas que gere também essa rede antes de aplicar o ACO. Isso pode ser feito por meio de um algoritmo híbrido que combine um método estocástico qualquer que trabalhe com o domínio discreto e gere essa rede pré-ótima, e depois otimize essa rede por meio do algoritmo ACO.

Um método híbrido que otimiza a RTC em dois níveis (superior e inferior), é uma técnica que tem se mostrado eficiente. Os algoritmos genéticos já foram bem explorado no nível superior em vários estudos, apresentando bons resultados. Já o método de evolução diferencial, embora pouco explorado em problemas de síntese de redes de trocadores de calor, possui características muito semelhantes aos algoritmos genéticos. Combinar esses dois métodos que permitem melhorar a robustez dos resultados e reduzir os tempos de execução, surgiu como uma ideia inovadora e promissora, a qual é apresentada nesse trabalho.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão apresentados o modelo matemático desenvolvido e o algoritmo implementado para a sua solução.

### 4.1 FORMULAÇÃO DO MODELO

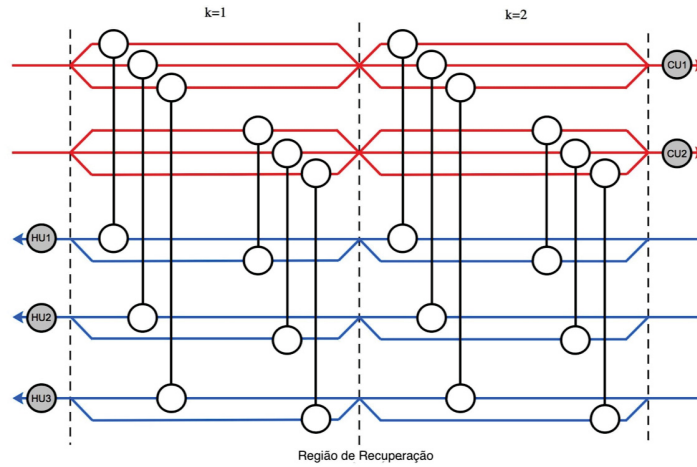
A formulação do problema envolve o uso do modelo de SWS proposto por Yee e Grossmann (1990). Nesta superestrutura, em cada estágio, pode haver troca de calor entre todos os possíveis pares de correntes quentes e frias na região de recuperação de calor. Aquecedores e resfriadores são colocados no final das correntes frias e quentes, respectivamente caso seja necessário. O modelo PNLIM derivado da superestrutura é relativamente simples e pode alcançar soluções promissoras. Estudos comparando o desempenho de diferentes modelos (Escobar e Trierweiler (2013); Huang e Karimi (2013)) apontam que o modelo SWS de Yee e Grossmann (1990) pode levar a uma solução de custos mais eficiente do que outros modelos, como por exemplo o modelo sequencial baseado na superestrutura de (Floudas, Ciric e Grossmann (1986); Floudas e Ciric (1989)).

A formulação original da síntese baseada na superestrutura SWS, considera que a mistura é isotérmica no final de cada estágio (isto é, as temperaturas de saída do trocador de calor em diferentes ramos da mesma corrente são as mesmas). No presente trabalho a mistura isotérmica não é considerada. As temperaturas de saída de cada trocador de calor são calculadas e o balanço de energia é realizado nos pontos de mistura no final de cada estágio. A FIGURA 3 apresenta uma representação generalizada de um problema baseado na superestrutura SWS, envolvendo duas correntes quentes e três correntes frias, em dois estágios.

Inicialmente, considera-se os conjuntos de correntes quentes  $\{i; i \in NH\}$  e correntes frias  $\{j; j \in NC\}$  e estágios  $\{k; k \in ST\}$ . Geralmente, o número de estágios é assumido como  $ST = \max\{NH, NC\}$ . No entanto, neste trabalho, esse número é definido de acordo com o caso estudado considerando seus tamanhos e cargas computacionais, porém não ultrapassa  $\max\{NH, NC\}$ . Nenhuma mudança de fase é considerada nos trocadores de calor.

Temperaturas das correntes em um trocador de calor. A temperatura de entrada de cada corrente no primeiro estágio, é igual à temperatura de entrada fixa da respectiva corrente. Note-se que, para correntes quentes, “primeiro estágio” significa que  $k = 1$ , enquanto que para correntes frias, isso significa que  $k = K$ . Para as

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GENERALIZADA DE UM PROBLEMA BASEADO EM SWS COM DOIS ESTÁGIOS ( $K = 1, 2$ ) PARA DUAS CORRENTES QUENTES E TRÊS FRIAS.  $CU_i$ : UTILIDADE FRIA;  $HU_j$ : UTILIDADE QUENTE



FONTE: a Autora(2018).

correntes quentes, tem-se que:

$$Th_{ijk} = \begin{cases} T_{in}H_i, & \text{se } k = 1; \\ T_{mix}H_{i,k-1}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \forall i, j \quad (4.1)$$

em que  $T_{mix}H_{i,k-1}$  é a temperatura de saída da corrente quente  $i$  no estágio  $k - 1$  após o ponto de mistura, para o caso em que existe divisão nas correntes. A partir disso, define-se:

$$T_{mix}H_{i,k} = T_{mix}H_{i,k-1} - \frac{\sum_j Z_{ijk} \cdot Q_{ijk}}{CPh_i} \quad \forall i, j, \forall k | k > 1. \quad (4.2)$$

em que  $Z_{ijk}$  é uma variável binária que representa a existência de um trocador de calor na posição  $ijk$ ,  $Q_{ijk}$  representa a carga térmica do trocador nesta posição e  $CPh_i$  é a capacidade térmica total da corrente quente  $i$ . Observe-se que esse valor é igual à temperatura de entrada dessa corrente  $i$  no próximo estágio  $k + 1$ . No caso de não ser aplicada uma divisão nas correntes, a temperatura de saída da corrente quente  $i$  no estágio  $k$  será a temperatura de saída dessa corrente no último trocador de calor.

A temperatura de entrada da corrente fria é dada por:

$$Tc_{ijk} = \begin{cases} T_{in}C_j, & \text{se } k = K; \\ T_{mix}C_{i,k+1}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \forall i, j \quad (4.3)$$

onde  $T_{mix}C_{i,k+1}$  é a temperatura de saída da corrente fria  $j$  no estágio  $k + 1$  após o ponto de mistura, se existir uma divisão. é definido por:

$$T_{mix}C_{j,k} = T_{mix}C_{i,k+1} + \frac{\sum_i Z_{ijk} \cdot Q_{ijk}}{CPC_j} \quad \forall i, j, \forall k | k < K. \quad (4.4)$$

Esse valor é igual à temperatura de entrada dessa corrente  $j$  no estágio anterior  $k - 1$  e, nos casos em que não há divisão, esse valor é igual à temperatura de saída dessa corrente no trocador de calor.  $CPc_j$  denota a capacidade térmica total da corrente fria  $j$ .

As temperaturas de saída das correntes quentes e frias de cada trocador são dadas nas equações (4.5) e (4.6), respectivamente.

$$Thout_{ijk} = Thin_{ijk} - \frac{Z_{ijk} \cdot Q_{ijk}}{FH_{ijk} \cdot CPh_i} \quad \forall i, j, k \quad (4.5)$$

$$Tcout_{ijk} = Tcin_{ijk} + \frac{Z_{ijk} \cdot Q_{ijk}}{FC_{ijk} \cdot CPc_j} \quad \forall i, j, k \quad (4.6)$$

em que  $FH_{ijk}$  e  $FC_{ijk}$  são as frações das correntes quentes e frias desviadas para cada ramo após uma divisão.

Temperatura de saída das correntes na região de recuperação. Se a temperatura de saída desejada não for alcançada para uma corrente via troca de calor entre correntes de processo, o emprego de utilidades é necessário. Utilidades quentes e frias são colocadas no final de cada corrente de processo. Para refrigeradores, a carga térmica fornecida pelos utilidades é calculada da seguinte forma:

$$Qcu_i = CPh_i(TinH_i - ToutH_i) - \sum_k \sum_j Z_{ijk} \cdot Q_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (4.7)$$

e a temperatura de entrada é dada por

$$TinHcu_i = TmixH_{i,k}; \quad \forall i \quad \text{e} \quad k = K. \quad (4.8)$$

Da mesma forma, para os aquecedores nas correntes frias, tem-se que:

$$Qhu_j = CPc_j(ToutC_j - TinC_j) - \sum_k \sum_i Z_{ijk} \cdot Q_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (4.9)$$

$$TinChu_j = TmixC_{j,k}; \quad \forall j \quad \text{e} \quad k = 1. \quad (4.10)$$

Áreas dos trocadores de calor. Depois de calcular as temperaturas de entrada e saída nos trocadores, é possível calcular a área de cada unidade. Para os trocadores de calor na região de recuperação, este cálculo é realizado da seguinte forma:

$$A_{ijk} = \frac{Z_{ijk} \cdot Q_{ijk}}{U_{ijk} \cdot LMTD_{ijk}} \quad \forall i, j, k \quad (4.11)$$

sendo que o coeficiente de transferência de calor global é dado por:

$$U_{ijk} = \frac{1}{\frac{1}{hh_i} + \frac{1}{hc_j}} \quad \forall i, j, k \quad (4.12)$$

A diferença de temperatura média logarítmica é:

$$LMTD_{ijk} = \frac{\theta_{ijk}^1 - \theta_{ijk}^2}{\ln\left(\frac{\theta_{ijk}^1}{\theta_{ijk}^2}\right)} \quad \forall i, j, k \quad (4.13)$$

em que:

$$\theta_{ijk}^1 = T_{mix}H_{i,k-1} - T_{cou}_{ijk} \quad \forall i, j, \forall k | k > 1. \quad (4.14)$$

$$\theta_{ijk}^2 = T_{hout}_{ijk} - T_{mix}C_{j,k+1} \quad \forall i, j, \forall k | k < K. \quad (4.15)$$

Se  $\theta_{ijk}^1$  for igual  $\theta_{ijk}^2$ , a  $LMTD$  tenderá à média aritmética. No entanto, com essa condição, o logaritmo natural no denominador é igual a zero, o que representa uma indeterminação, dada a divisão por zero. Uma condição simples é implementada no algoritmo que verifica a igualdade referida. Se essa condição for verdadeira, e dado que a média aritmética de dois números iguais pode ser reduzida a um desses, a  $LMTD$  é simplesmente atribuído da seguinte forma:

$$LMTD_{ijk} = \theta_{ijk}^1 \quad \forall i, j, k \quad (4.16)$$

Para as utilidades quentes e frias, esses cálculos são análogos.

Restrições. Algumas restrições são essenciais para o modelo. O calor máximo trocado entre duas correntes  $i$  e  $j$  em um estágio  $k$  é dado por:

$$Q_{max_{ijk}} = \min(CPh_i(T_{in}H_i - T_{out}H_i), CPC_j(T_{out}C_j - T_{in}C_j)) \quad \forall i, j, k \quad (4.17)$$

Para cargas térmicas nos trocadores de calor:

$$0 < Q_{ijk} \leq Q_{max_{ijk}} \quad \forall i, j, k \quad (4.18)$$

As cargas térmicas nas utilidades também são limitadas:

$$0 < Q_{hu_j} \leq CPC_j(T_{out}C_j - T_{in}C_j) \quad \forall j \quad (4.19)$$

$$0 < Q_{cu_i} \leq CPh_i(T_{in}H_i - T_{out}H_i) \quad \forall i \quad (4.20)$$

E para poder realizar a troca de calor em uma unidade, respeitando a  $EMAT$  em cada uma das extremidades do trocador de calor, é necessário que:

$$T_{hin}_{ijk} \geq T_{cout}_{ijk} + EMAT \quad \forall i, j, k \quad (4.21)$$

$$T_{hout}_{ijk} \geq T_{cin}_{ijk} + EMAT \quad \forall i, j, k \quad (4.22)$$

em que  $EMAT$  foi considerada igual a 1(K, ° F or ° C) para todos os casos estudados. Se essas restrições são violadas, uma função de penalidade, que é apresentada genericamente na Equação (4.23), é aplicada e somada ao valor da função objetivo.

$$Penalty_{ijk} = C_1 + C_2 \cdot (X_{ijk}^{Bound} - X_{ijk})^2 \quad \forall i, j, k \quad (4.23)$$

em que  $X$  é uma variável genérica e  $X^{Bound}$  é o valor máximo ou mínimo que pode ser obtido quando a solução é viável e  $C_1$  e  $C_2$  são penalidades constantes. Esta função também é usada para casos em que as cargas térmicas se tornam negativas. Como o modelo considera divisões nas correntes, as frações nas correntes quentes devem satisfazer:

$$\sum_j FH_{ijk} = 1 \quad \forall i, j, k \quad (4.24)$$

$$FH_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (4.25)$$

E para as correntes frias:

$$\sum_i FC_{ijk} = 1 \quad \forall i, j, k \quad (4.26)$$

$$FC_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (4.27)$$

Função objetivo. Finalmente, a função objetivo pode ser definida como sendo o custo total anual ( $CTA$ ) da rede, em que a variável a ser minimizada é a soma dos custos relacionados às unidades trocadoras de calor e os custos das utilidades usadas na rede:

$$\begin{aligned} (\min) \quad CTA = & \sum_i \sum_j \sum_k Z_{ijk} (CF + C \cdot A_{ijk}^B) + \\ & \sum_i Z_{cu_i} (CF_{cu} + C_{cu} \cdot A_{cu_i}^{B_{cu}}) + \\ & \sum_j Z_{hu_j} (CF_{hu} + C_{hu} \cdot A_{hu_j}^{B_{hu}}) + \\ & \sum_i CCU \cdot Q_{cu_i} + \sum_j CHU \cdot Q_{hu_j} \quad \forall i, j, k \quad (4.28) \end{aligned}$$

em que, para os trocadores de calor existem  $Z$ ,  $A$ ,  $CF$ ,  $C$  e  $B$  que são as variáveis binárias representando a existência do trocador de calor, área, custo de implantação fixa, coeficiente de custo de área e expoente de custo de área, respectivamente. Da mesma forma, para os resfriadores essas variáveis são  $Z_{cu}$ ,  $A_{cu}$ ,  $CF_{cu}$ ,  $C_{cu}$ , e  $B_{cu}$  e para os aquecedores  $Z_{hu}$ ,  $A_{hu}$ ,  $CF_{hu}$ ,  $C_{hu}$ , e  $B_{hu}$ .

## 4.2 ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO

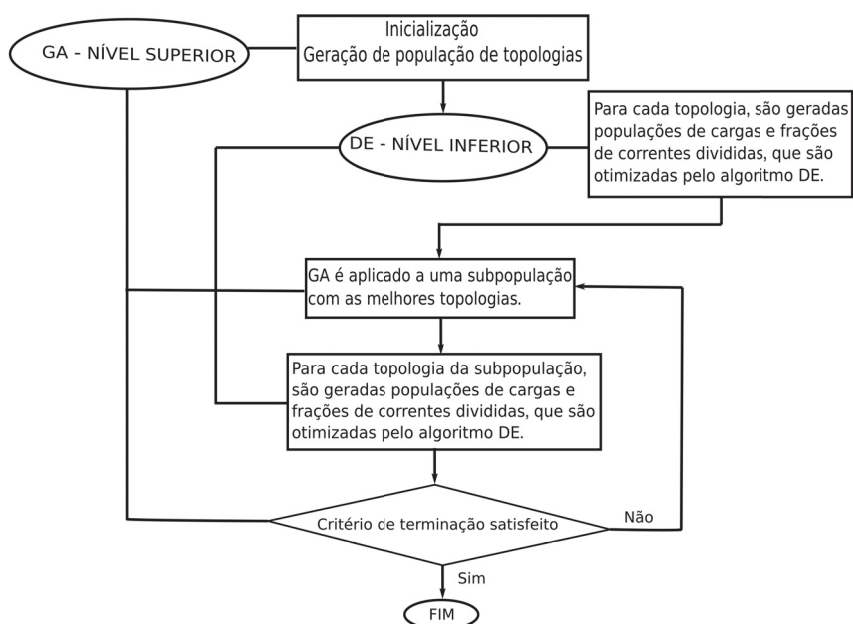
O modelo proposto para a síntese de RTC descrito na seção anterior é um problema de formulação PNLIM, não-convexo e com muitas restrições termodinâmicas que devem ser satisfeitas. Além disso, dada a natureza combinatória do problema, é possível encontrar um grande número de estruturas. Explorar todas essas possibilidades pode se tornar impraticável em problemas de grande escala. Esses fatos aumentam significativamente a complexidade computacional do modelo. Os métodos estocásticos são bons para lidar com essas particularidades. Nesta seção, a abordagem híbrida baseada em GA/DE é detalhada, funcionando como uma abordagem de otimização de dois níveis. A DE é capaz de explorar eficientemente o espaço de busca para pequenas redes com até quatro correntes. Para problemas maiores, devido ao grande número de combinações de correspondência possíveis, torna-se menos provável que as configurações de RTC geradas aleatoriamente cubram o espaço de busca satisfatoriamente. Assim, um GA é utilizado para propor novas topologias, limitando o número de variáveis contínuas e orientando automaticamente a busca de melhores estruturas.

Uma população de soluções (redes) é gerada aleatoriamente no nível superior. A função objetivo (custo total anual) é então avaliada para todas essas soluções em um nível inferior. Isso significa que, para cada topologia, populações aleatórias de carga térmica e de vazões divididas são geradas e otimizadas pelo algoritmo DE. Um conjunto com as melhores soluções é perturbado seguindo as regras típicas propostas pelo GA. Essas novas soluções têm suas funções objetivo avaliadas e o processo é repetido até que um critério de parada, adotado como sendo um número máximo de iterações (*iterMaxd*), seja alcançado. A FIGURA 4 apresenta um diagrama da metodologia.

### 4.2.1 Nível Superior - Algoritmos Genéticos

A partir dos métodos existentes na literatura que trabalham com variáveis discretas, os algoritmos genéticos estão entre as opções mais atraentes, porque são fáceis de implementar, manipular e avaliar. O GA trabalha com uma população de indivíduos com cromossomos associados. Para o problema de síntese da RTC, cada cromossomo representa uma estrutura de rede (topologia) e o conjunto de todas as configurações que o cromossomo gera é o seu espaço de busca. Isso significa que, dependendo do número de variáveis do problema, o espaço de pesquisa pode ser muito grande e o desempenho computacional pode ser ineficiente ao procurar por melhores soluções. Para agilizar o procedimento, em alguns problemas, um ou mais indivíduos que representam topologias promissoras podem ser incluídos. Isso não influencia a maneira como o GA funciona, apenas melhora seu desempenho computacional. A FIGURA 5 apresenta uma representação topológica e sua matriz  $Z_{ijk}$  associada, a

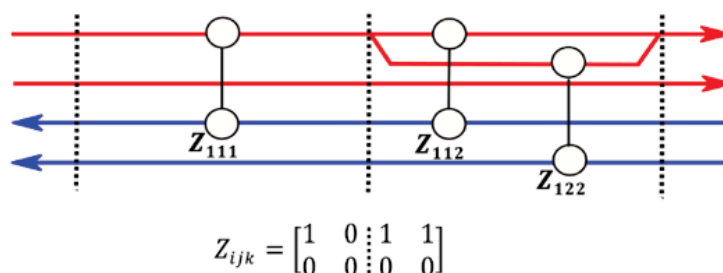
FIGURA 4 – ESTRUTURA GERAL DO MÉTODO PROPOSTO GA-DE



FONTE: a Autora(2018).

qual é usada no GA como um cromossomo que codifica a presença / ausência de trocadores.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DA TOPOLOGIA USADA NO GA



FONTE: a Autora (2018).

#### 4.2.1.1 Inicialização

Todos os parâmetros do GA (TABELA 1), os dados das correntes e custos são fornecidos ao modelo. O número de estágios é um parâmetro que deve ser definido a priori. O parâmetro  $T_{op}$  refere-se ao número de indivíduos (topologias) na população, o parâmetro  $Couple$  é o número de cruzamentos (casais) por geração, o parâmetro  $P_C$  é a probabilidade de cruzamento, o parâmetro  $P_M$  é a probabilidade de mutação e o parâmetro  $iterMaxD$  é o número máximo de gerações nas variáveis discretas definidas. Uma população de cromossomos é gerada, cada indivíduo  $d \in T_{op}$  é uma

topologia gerada aleatoriamente representada por uma matriz binária  $Z$ . A população inicial gerada aleatoriamente, garante maior variação no espaço de busca. Para o caso 8 estudado, a população inicial é composta por topologias iguais e promissoras, porque a variabilidade do espaço de busca, aliado ao número elevado de variáveis, exige um grande esforço computacional.

TABELA 1 – PARÂMETROS DO GA

Parâmetros do GA	
$Top$	50
$Couple$	20
$P_C$	0,85
$P_M$	0,01
$iterMaxD$	40 ou 50

FONTE: a Autora(2018).

#### 4.2.1.2 Função de Avaliação

A aptidão (fitness) para cada indivíduo  $d$  pode ser definida como na Equação 4.29

$$FITNESS_d = \frac{1}{C_{total_d}} \quad \forall d \in Top \quad (4.29)$$

em que  $C_{total_d}$  é o custo total anual do indivíduo  $d$ . Esses custos são obtidos aplicando o algoritmo em um nível inferior (DE) à topologia codificada por esse cromossomo individual. O procedimento tenta encontrar cargas de calor e frações das vazões divididas que produzem o CTA mais baixo, o qual é retornado ao algoritmo no nível superior (GA). O algoritmo DE utilizado neste trabalho é descrito na subseção 4.2.2. Depois que os valores do CTA retornam ao GA, as operações genéticas são aplicadas à população. Tal procedimento é realizado até que um certo número de gerações seja alcançado.

#### 4.2.1.3 Operações Genéticas

As operações são descritas na ordem executada pelo GA.

Seleção: Para escolher os melhores cromossomos (topologias) como pais, um método de roleta é usado. Os indivíduos são assumidos como partes da roleta e a probabilidade de o indivíduo ser selecionado é dada por:

$$P_d = \frac{FITNESS_d}{\sum FITNESS_d} \quad \forall d \in Top \quad (4.30)$$

Um certo número  $q$  de indivíduos é selecionado para realizar o cruzamento e gerar uma população com  $q$  descendentes. O método não apresentou tendência à convergência prematura.

Cruzamento: A seleção dos casais é feita aleatoriamente. Existe uma probabilidade  $P_C$  dos pais se reproduzirem, que é inicialmente um valor fixo relativamente alto para favorecer

tal ação. Se o cruzamento ocorre, os cromossomos são cortados em uma posição escolhida aleatoriamente e, em seguida, as peças são combinadas para formar dois novos filhos individuais. Se a reprodução não ocorrer, os próprios pais estarão na população de descendentes.

Por exemplo, o cruzamento entre os dois indivíduos pais

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \vdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } Z_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \vdots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & \vdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

é realizado da seguinte forma: Primeiro as matrizes são transformadas em matrizes linhas, ou seja, os elementos da primeira linha (composta por todos os estágios), são seguidos pelos elementos da linha posterior. Assim,

$$Z_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \text{ e } Z_2 = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$$

O ponto de corte é escolhido aleatoriamente e nesse caso, para que ocorra o cruzamento, há sete posições possíveis para realizá-lo. Suponha que a posição 3 é a escolhida para o corte:

$$Z_1 = [1 \ 0 \ 1 \ \vdots \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \text{ e } Z_2 = [1 \ 1 \ 0 \ \vdots \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Os pais  $Z_1$  e  $Z_2$  geram seus filhos  $Z_3$  e  $Z_4$  trocando suas caldas, ou seja,

$$Z_3 = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1] \text{ e } Z_4 = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

**Mutação:** Esta operação genética altera um ou mais genes de cada cromossomo (filho). Existe uma probabilidade fixa  $P_M$  para cada gene de sofrer mutação e, em geral, este valor é pequeno para melhorar a busca local. Se uma mutação é aplicada, o gene que tem um valor de 1 (que representa a existência do trocador de calor nesta posição) terá seu valor alterado para zero (inexistência de um trocador de calor nessa posição) e vice-versa. Se a mutação não ocorrer, os valores permanecerão inalterados.

#### 4.2.1.4 Nova População

Para determinar quais indivíduos estarão presentes na próxima geração em uma nova população, a avaliação da aptidão é realizada nos  $q$  indivíduos da população de filhos exatamente como descrito na subsubseção 4.2.1.2. Ressalta-se que podem existir soluções infactíveis, que quando penalizadas, possivelmente não irão para a geração seguinte. Esta população é então adicionada à população inicial que passa a ter  $q + n$  indivíduos. Os  $n$  melhores indivíduos são selecionados de acordo com o menor custo e esse conjunto forma a nova população usada na geração seguinte. Esta população passará pelas operações genéticas e o processo é repetido até que um número máximo de iterações  $iterMaxD$  relacionados a convergência seja atingido.

#### 4.2.2 Nível Inferior - Evolução Diferencial

O método de evolução diferencial é uma boa opção para trabalhar com variáveis contínuas. O DE é versátil, fácil de implementar, possui poucos parâmetros de controle e é uma técnica ainda pouco explorada em problemas de síntese de RTC. Resumidamente, na síntese de RTC, o procedimento é conduzido, para cada indivíduo (topologia) gerado pelo GA, gerando aleatoriamente populações com cargas de calor ( $Q$ ) e frações de corrente ( $FH$  e  $FC$ ). Respeitando estas restrições do problema, a partir destas populações, o método tenta evoluir estas configurações para novas com custos mais baixos.

##### 4.2.2.1 Inicialização

As estratégias de evolução diferencial dependem do tipo de indivíduo a ser modificado, do número de indivíduos usados para perturbação e do tipo de cruzamento utilizado. A estratégia aplicada é  $DE/rand/1/bin$ . Isso significa que o vetor a ser perturbado é do tipo "rand" (gerado aleatoriamente); o número de diferenças ponderadas para a perturbação é 1; e o tipo de cruzamento é binomial.

Os parâmetros de ajuste do algoritmo DE são inicialmente definidos e seus valores são dados na Tabela 2. Para cada cromossomo (topologia), populações iniciais com valores aleatórios de cargas térmicas e frações de correntes são geradas. Assim, no DE, os genes que passarão pelas operações genéticas são aqueles que representam cargas de calor e frações das correntes divididas.

TABELA 2 – PARÂMETROS DO DE

Parâmetros do DE	
$Pop$	50
$F$	0,5
$P_C$	0,7
$iterMax$	100 ou 200

FONTE: a Autora(2018).

O parâmetro  $pop$  refere-se ao número de indivíduos na população, o parâmetro  $F$  é o fator de perturbação que é um número real no intervalo  $[0, 2]$ ,  $P_C$  é a probabilidade de cruzamento e o parâmetro  $iterMax$  é o número máximo de gerações nas variáveis contínuas. Os parâmetros  $F$  e  $P_C$  foram testados para alguns valores nos primeiros quatro casos estudados. Cada par de parâmetros foi testado 15 vezes em cada caso. Todos os casos alcançaram a melhor solução encontrada, mas a incidência da melhor solução em 15 tentativas foi maior com  $F = 0,5$  e  $P_C = 0,7$ .

##### 4.2.2.2 Função de Avaliação

Similarmente ao que é realizado no GA, o DE também é baseado em uma função de aptidão para avaliar os indivíduos  $p$  em sua população. A diferença é que, aqui, uma população

é um conjunto de cargas de calor e frações de fluxo associadas a uma das topologias da população oriunda em GA. O cálculo é realizado de acordo com a Equação 4.31.

$$\text{FITNESS}_p = \frac{1}{C_{total_p}} \quad \forall p \in Pop \quad (4.31)$$

#### 4.2.2.3 Operações Genéticas

A fim de reduzir os custos da topologia com diferentes cargas térmicas e frações, as operações de mutação, cruzamento e seleção são realizadas, nesta ordem, na população genérica  $X$  com os valores da população de cargas térmicas ( $Q$ ) e frações de vazão ( $FH$  e  $FC$ ).

Mutação: Esta é a primeira operação genética executada pelo algoritmo DE. Um novo cromossomo (cargas térmicas e frações de divisão de correntes) é gerado pela soma da diferença ponderada entre dois outros cromossomos para um terceiro cromossomo, que é

$$X_{mut_{ijk}}^{(p)} = X_{ijk}^{(p)} + F(X_{ijk}^{(w)} - X_{ijk}^{(y)}) \quad \forall p, w, y \in Pop \quad (4.32)$$

em que  $p$ ,  $w$  e  $y$  denotam a posição do indivíduo nas populações de carga térmica e frações de divisão de corrente, são distintos, selecionados aleatoriamente,  $F$  controla a amplitude da diferença entre as variáveis e  $ijk$  denota a posição na matriz  $X_{mut}^{(p)}$ . Note-se que para cada indivíduo  $p$  nas populações de cargas de calor e frações, um novo indivíduo mutado  $p$  é formado e então as populações de cargas térmicas e frações são formadas.

Cruzamento: O indivíduo  $p$  na população de indivíduos cruzados em sua posição  $ijk$  tem um valor de:

$$X_{cross_{ijk}}^{(p)} = \begin{cases} X_{mut_{ijk}}^{(p)}, & \text{se } r < P_C \vee l = p; \\ X_{ijk}^{(p)}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \forall p \in Pop \quad (4.33)$$

em que  $r$  tem uma distribuição uniforme no intervalo  $[0, 1]$ ,  $P_C$  é a probabilidade de cruzamento e  $l$  é um índice aleatório escolhido no intervalo  $[1, NP]$ , que assegura que a população  $X_{cross}$  recebe pelo menos um componente da população  $X_{mut}$ .

Seleção: Diferentemente de outros métodos evolutivos, o algoritmo DE não usa elitismo ou seleção proporcional. A seleção é feita comparando os custos provenientes das populações  $X$  com os custos provenientes das populações  $X_{cross}$ . As populações de cargas térmicas e de frações que geram os menores custos constituirão a nova população na próxima geração.

#### 4.2.2.4 Nova População

As operações genéticas descritas na Seção 4.2.2.3 compõem o loop principal do algoritmo e o mesmo procedimento é realizado para a nova população visando a redução de custos. Isso será repetido até atingir o número máximo de gerações que a variável  $iterMax$  fixou inicialmente. Quando o procedimento DE é finalizado, o melhor valor de custo é retornado ao GA para que a topologia seja avaliada.

## 5 CASOS ESTUDADOS

No presente capítulo é avaliada a eficiência do método que foi aplicado a oito casos de referência bem estudados. O algoritmo GA-DE foi implementado no Matlab 2014b, em um computador de 3.5 GHz, intel i5 e 16GB de RAM.

Todos os valores de parâmetros utilizados e suas definições foram apresentados anteriormente nas Tabelas 1 e 2. O número de cromossomos gerados aleatoriamente (topologias) é fixado em 50 e o número de cruzamentos é definido como 20 para todos os casos. O número de vezes que essas topologias são perturbadas é 40 para todos os casos, exceto o caso 8 em que este é definido como 50. O caso 8 foi avaliado usando uma população inicial consistindo de 50 topologias promissoras iguais, enquanto as variáveis contínuas foram inicializadas aleatoriamente. O número de indivíduos nas populações de cargas térmicas e frações de divisão de correntes é definido como 50, mas o número de vezes que eles são perturbados varia e é definido de acordo com a carga computacional para cada caso. No caso 8, que possui mais variáveis, as populações foram perturbadas 200 vezes e nos demais, estas populações foram perturbadas 100 vezes. No experimento com topologias aleatórias para o caso 8, 100 gerações foram utilizadas no GA e 300 no DE. Os testes foram realizados 15 vezes para cada estudo de caso e os melhores resultados são apresentados.

### 5.1 CASO 1

O primeiro caso envolve duas correntes quentes e duas frias, água fria como utilidade fria e vapor como utilidade quente. Os dados do problema são apresentados na TABELA 3, sendo que  $A$  é a área do trocador de calor em  $m^2$ ,  $CHU$  é o custo da utilidade quente,  $CCU$  é o custo da utilidade fria e  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor.

TABELA 3 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 1

Correntes	T <sub>in</sub> K	T <sub>out</sub> K	CP kw/K
H1	533	433	3,0
H2	523	403	1,5
C1	393	508	2,0
C2	453	513	4,0
HU	553	452	-
CU	303	353	-

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

Custo do Trocador (\$) =  $300 \cdot A^{0,5}$  para todas as trocas.

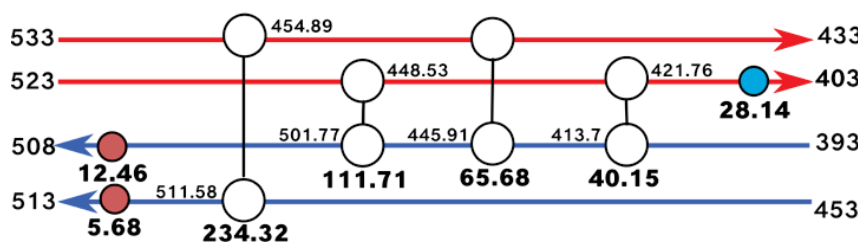
CHU = 110 \$(/kW ·ano).

CCU = 12.2\$(/kW ·ano).

Este caso foi proposto por Ahmad (1985) e resolvido com um método para encontrar o número mínimo de trocadores e a área quase mínima da rede. O custo total anual (CTA)

encontrado foi de 12.870 \$/ano. Nielsen, Hansen e Joergensen (1996) desenvolveram um software que permite manipular modelos com diferentes complexidades e utilizou o algoritmo Simulated Annealing, semelhante ao de Dolan, Cummings e LeVan (1989), para trabalhar com problemas complexos de otimização. Os autores reduziram o CTA para 12.306 \$/ano. Khorasany e Fesanghary (2009) conseguiram encontrar uma solução com melhores custos (11.895 \$/ano) com uma abordagem híbrida que combina os algoritmos Busca Harmônica (HS) e SQP. A solução com os menores custos até agora foi relatada no trabalho de Huo et al. (2012). Eles usaram um método híbrido GA-PSO e conseguiram uma solução com CTA de 11.632 \$/ano. A FIGURA 6 ilustra a melhor configuração encontrada no presente estudo. As áreas do trocador de calor ( $A_{ijk}$ ) são apresentadas acima de cada unidade, as cargas térmicas ( $Q_{ijk}$ ) são mostradas abaixo do dispositivo correspondente e as temperaturas de saída ( $Thout_{ijk}$  e  $Tcoul_{ijk}$ ) são mostradas no lado correspondente.

FIGURA 6 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 1



FONTE: a Autora(2018).

No trabalho atual, o número de estágios utilizado na superestrutura é  $ST = 3$ . Observe-se que, com esse número de estágios, o número de variáveis contínuas independentes para cargas térmicas é 12, o número de variáveis binárias é 12 e o número de frações das correntes divididas por estágio é 8. Com um total de 48 variáveis, existem 4.095 estruturas possíveis. O custo encontrado é de 11.540,43 \$/ano e a área total dos trocadores de calor é de 242,26  $m^2$ . A TABELA 4 apresenta uma comparação com resultados previamente relatados na literatura.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 1

	CTA \$/ano	Unidades	$Q_H$ kW	$Q_C$ kW	Área $m^2$
Ahmad (1985)	12,870	7	50,00	60,00	-
Nielsen, Hansen e Joergensen (1996)	12,306	8	36,00	45,00	55,83
Khorasany e Fesanghary (2009)	11,895	7	18,10	28,10	-
Huo et al. (2012)	11,632	7	17,80	27,80	-
Este trabalho	11,540	7	18,14	28,14	242,26

FONTE: a Autora(2018).

Nota-se que o custo encontrado é 0,8% menor que o melhor custo publicado na literatura para este problema. Isso se deve aos valores das cargas dos aquecedores e resfriadores que são ligeiramente menores quando comparados aos de Huo et al. (2012).

Entre os resultados da literatura, Khorasany e Fesanghary (2009) são os únicos autores que forneceram tempos computacionais. O método desenvolvido pelos autores levou 1.223 *s* para encontrar o melhor custo da rede. Neste trabalho, o algoritmo levou 779 *s*. Mas a melhor rede foi encontrada na primeira geração (72,56 *s*) e o melhor custo para essa rede foi encontrado na segunda geração (91,76 *s*).

## 5.2 CASO 2

Este caso foi originalmente proposto por Zhu (1997) e tem quatro correntes, sendo duas quentes e duas frias. Os dados do problema são apresentados na TABELA 5.

TABELA 5 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 2

Correntes	Tin K	Tout K	CP kw/K	h kW/m <sup>2</sup>
H1	423	323	200	0,2
H2	443	313	100	0,2
C1	323	393	300	0,2
C2	353	383	500	0,2
HU	453	453	-	0,2
CU	293	313	-	0,2

FONTES: a Autora(2018).

NOTA:

Custo do Trocador (\$) =  $9094 + 221A^{0,81}$  para todas as trocas.

CHU = 110 \$/(kW · ano). CCU = 10 \$/(kW · ano).

Zhu (1997) apresentou um método simples, segundo o qual a síntese da RTC é realizada através da decomposição do problema e dois modelos, de formulação PLIM e PNLIM foram desenvolvidos para selecionar o melhor conjunto de correspondências e determinar as taxas de divisão ideais. O menor custo encontrado foi de 1.818.031 \$/ano. Silva et al. (2011) realizaram a síntese simultânea de RTC usando PSO e considerando a divisão de correntes sem mistura isotérmica e o custo encontrado foi de 1.816.670 \$/ano. Usando uma hibridização GA-PSO, Pavão, Costa e Ravagnani (2016) encontraram um custo de 1.814.000 \$/ano. No entanto, ao recalculer o CTA com a solução relatada pelos autores, o valor encontrado foi de 1.808.047 \$/ano.

Para a solução deste problema, no presente trabalho, o número de estágios utilizados na superestrutura é  $ST = 2$ . O número de variáveis contínuas independentes é 16. O número de variáveis binárias é 8 e o número de frações de divisão de corrente por estágio é 8. Com um total de 24 variáveis independentes, existem 255 estruturas possíveis. A melhor solução encontrada com o método desenvolvido tem um CTA de 1.803.626 \$/ano. Os resultados são apresentados na TABELA 6 e a melhor rede é mostrada na FIGURA 7. O custo teve um decréscimo de 0,25% quando comparado ao encontrado em Pavão, Costa e Ravagnani (2016). As cargas nos aquecedores e resfriadores diminuem, enquanto que a área total aumenta em 14%.

TABELA 6 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 2

	CTA	Unidades	$Q_H$	$Q_C$	Área
	\$/ano		kW	kW	m <sup>2</sup>
Zhu (1997)	1.818.031	8	7.000,00	7.000,00	19.690,00
Silva et al. (2011)	1.818.470	8	7.260,00	4.260,00	-
Pavão, Costa e Ravagnani (2016)	1.808.047 <sup>a</sup>	7	7.854,55	4.854,54	16.641,20
Este trabalho	1.803.626	7	7.653,87	4.653,87	19.493,61

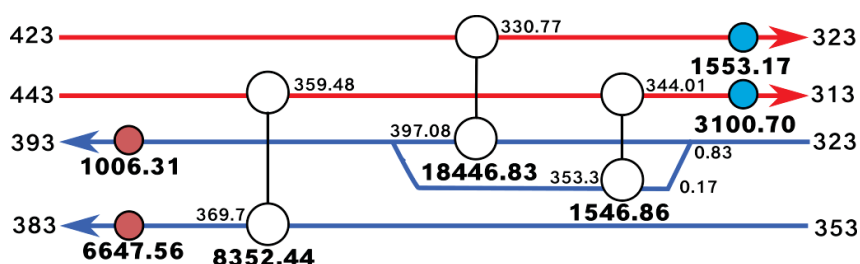
FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

<sup>a</sup> Solução recalculada

No trabalho de Pavão, Costa e Ravagnani (2016) um teste para verificar a eficiência do tempo foi realizado sem levar em conta os resultados. Os autores correram seu algoritmo para 30 gerações no GA e tardou 439,96 s usando processamento paralelo com quatro núcleos. Neste trabalho, a execução do algoritmo para 40 gerações levou 626,07 s, mas a melhor solução foi encontrada na primeira geração em 75,62 s.

FIGURA 7 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 2



FONTE: a Autora(2018).

### 5.3 CASO 3

Este caso foi originalmente proposto por Adjiman, Androulakis e Floudas (2000) e possui duas correntes quentes e duas frias. Os dados do problema são apresentados na TABELA 7.

Adjiman, Androulakis e Floudas (2000) trabalharam com algoritmos determinísticos para a síntese de RTC e encontraram um CTA mínimo de 154.997 \$ / ano após 315 s. Lin e Miller (2004) trabalharam com um modelo que não admitia divisão de correntes e utilizando a heurística de *Tabu Search* - Busca Tabu (TS) encontraram um custo ligeiramente inferior de 154.910 \$ / ano após 9.102 s.

Nesse trabalho, o número de estágios utilizados na superestrutura é  $ST = 2$ . O número de variáveis contínuas independentes é 16 e o número de variáveis binárias é 8. Com um

TABELA 7 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 3

Correntes	Tin K	Tout K	CP kw/K
H1	650	370	10
H2	590	370	20
C1	410	650	15
C2	350	500	13
HU	680	680	-
CU	300	320	-

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

$U = 0,5 \text{ kW/m}^2$  para todas as trocas, exceto aquelas que ocorrem nos aquecedores;  $U = 0,833 \text{ kW/m}^2$  para as trocas que ocorrem nos aquecedores. Custo do trocador =  $5500+150A \text{ \$/ano}$  ( $A$  em  $\text{m}^2$ );  $\text{CHU} = 110 \text{ \$/kW} \cdot \text{ano}$ ;  $\text{CCU} = 15 \text{ \$/kW} \cdot \text{ano}$ .

total de 24 variáveis independentes, existem 255 estruturas possíveis. A melhor solução foi encontrada com o método desenvolvido e tem um CTA de  $154.853 \text{ \$ / ano}$ . Os resultados são apresentados na TABELA 8.

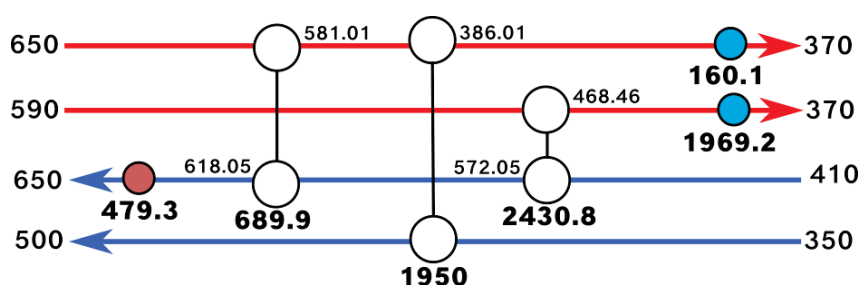
TABELA 8 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 3

	CTA \$/ano	Unidades	$Q_H$ kW	$Q_C$ kW
Adjiman, Androulakis e Floudas (2000)	154.997	6	-	-
Lin e Miller (2004)	154.910	6	-	-
Este trabalho	154,853	6	479,3	2.129,3

FONTE: a Autora(2018).

O custo total anual da rede diminuiu 0,037% em comparação ao melhor resultado publicado na literatura. A melhor rede é mostrada na FIGURA 8. A solução foi encontrada na primeira geração após 39 s.

FIGURA 8 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 3



FONTE: a Autora(2018).

## 5.4 CASO 4

Neste caso, cinco correntes estão presentes, sendo três quentes e duas frias. O problema foi introduzido por Björk e Westerlund (2002) e seus dados são apresentados na TABELA 9. Os autores aplicaram uma estratégia de otimização global a dois modelos diferentes em cada exemplo, um modelo considerando a mistura isotérmica e o outro sem tal suposição. Ambos os modelos foram derivados da superestrutura de Yee e Grossmann (1990). O menor custo encontrado foi de 96.001 \$/ano. Um CTA de 95.660 \$/ano foi encontrado por Huang, Al-mutairi e Karimi (2012), usando o solver BARON no ambiente GAMS. Sendo BARON um solucionador de otimização global, esta solução pode ser considerada o ótimo global para este problema. Os autores avaliaram o impacto de várias aproximações da LMTD na qualidade das soluções e no tempo computacional. Pavão, Costa e Ravagnani (2016) encontraram a mesma solução usando sua abordagem híbrida GA-PSO. No presente trabalho, o algoritmo proposto foi capaz de atingir a mesma solução relatada. Vale a pena notar que, as utilidades não são necessárias em tal configuração.

TABELA 9 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 4

Correntes	Tin K	Tout K	CP kW/K	h kW/m <sup>2</sup> K
H1	428	303	8	2
H2	353	313	15	2
H3	473	313	15	2
C1	293	433	20	2
C2	293	373	15	2
HU	493	493	-	2
CU	303	353	-	2

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

Custo do trocador(\$) =  $6000 + 600A^{0,85}$  para todas as trocas.

CHU = 120 \$/(kW · ano) e CCU = 20 \$/(kW · ano).

Uma comparação entre os resultados obtidos com as abordagens anteriores da literatura e a deste trabalho é apresentada na TABELA 10.

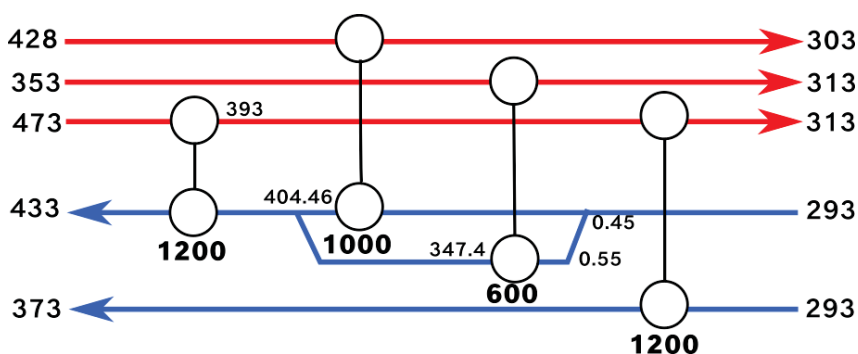
TABELA 10 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 4

	CTA \$/ano	Unidades	$Q_H$ kW	$Q_C$ kW	Área m <sup>2</sup>
Björk e Westerlund (2002)	96.001	4	0	0	219,2
Huang, Al-mutairi e Karimi (2012)	95.660	4	0	0	217,9
Pavão, Costa e Ravagnani (2016)	95.660	4	0	0	217,9
Este trabalho	95.660	4	0	0	217,9

FONTE: a Autora(2018).

Com suas respectivas cargas de calor, áreas e temperaturas, a melhor rede é mostrada na FIGURA 9.

FIGURA 9 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 4



FONTE: a Autora(2018).

Em relação aos tempos computacionais, Björk e Westerlund (2002) encontraram a melhor solução após 96 s, Huang, Al-mutairi e Karimi (2012) levaram 7.200 s, enquanto que Pavão, Costa e Ravagnani (2016) levaram 15,83 s. Neste trabalho, a execução do algoritmo levou 826 s, mas a melhor solução foi encontrada na segunda geração após 95,41 s.

## 5.5 CASO 5

Este caso apresenta quatro correntes quentes e quatro frias e foi introduzido por Grossmann e Sargent (1978). Os dados das correntes do problema podem ser vistos na TABELA 11.

TABELA 11 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 5

Correntes	T <sub>in</sub> °F	T <sub>out</sub> °F	CP Btu/h/°F
H1	470	320	22,40
H2	450	240	17,50
H3	370	150	28,50
H4	310	200	20,10
C1	200	420	16,80
C2	150	400	23,20
C3	185	330	35,10
C4	140	300	17,25
HU	456	456	-
CU	100	180	-

FONTE: a Autora(2018).

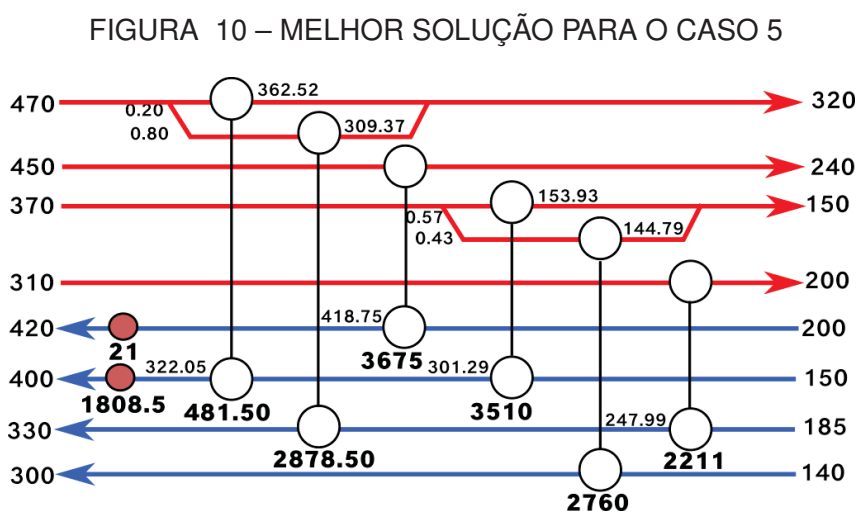
NOTA:

$U = U_{cu} = 0,15$  (kBtu/h · ft<sup>2</sup> · °F) e  $U_{hu} = 0,2$  (kBtu/h · ft<sup>2</sup> · °F). Custo do trocador (\$) =  $35 \cdot A^{0,6}$  para todas as trocas (A em ft<sup>2</sup>). CHU = 11,05 (kBtu). CCU = 5,31 (kBtu).

No trabalho original, a divisão de correntes não é permitida e um método que funciona com variáveis discretas e contínuas de forma não simultânea foi adotado. As variáveis discretas

(topologia) são otimizadas usando um algoritmo de enumeração explícita acoplado a uma heurística de estimacão. A partir da topologia 3tima, as cargas são otimizadas usando um modelo de formulaco PNL. O custo total anual associado  soluço encontrada pelos autores foi de 31.890 \$/ano. Este problema foi adaptado, no trabalho de Li, Guanfeng, Pingjing et al. (2004), a um modelo em que a divisão de correntes 3 permitida e os trocadores de calor possuem múltiplas correntes. Sua abordagem de soluço foi uma hibridizaco de um Algoritmo Gen3tico com Simulated Annealing (GA-SA). Os autores relataram um CTA de 29.438 \$/ano. Sem usar divisão de correntes, He e Cui (2013) usaram uma abordagem determinística de rearranjo de correntes, que foi baseada em um fator de uniformidade descrevendo o grau de distribuico de energia na RTC. Os autores conseguiram encontrar uma soluço com CTA de 30.793 \$/ano. Zhang, Cui et al. (2017) usam uma estrat3gia de rearranjo similar que reduz o espaço de busca para trocadores de calor na rede, juntamente com um novo modelo de representaco de "tabuleiro de xadrez", onde as 3reas dos trocadores de calor são otimizadas por um algoritmo estocástico denominado Random Walking Algorithm of Compulsory Evolution (RWCE). Esse modelo não permitia a divisão de correntes e o melhor custo encontrado foi de 30.783 \$/ano.

No presente trabalho, o número de est3gios utilizados na superestrutura 3  $ST = 2$ . Como existem 48 vari3veis contínuas em cada est3gio e 32 vari3veis bin3rias, o número total de vari3veis 3 128. O número total de combinaes 3 de  $4,49 \times 10^9$ . O algoritmo proposto GA-DE foi aplicado e uma rede com um custo de 29.216,62 \$/ano foi encontrada. A FIGURA 10 mostra a melhor RTC encontrada com suas respectivas cargas t3rmicas, 3reas e temperaturas. A comparaco dos resultados 3 apresentada na TABELA 12.



O custo total anual, quando comparado ao estudo de Li, Guanfeng, Pingjing et al. (2004) que realiza divisão nas correntes, tem um decr3scimo de 0,75%. O 3nico estudo que

TABELA 12 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 5

	CTA	Unidades	$Q_H$	$Q_C$	Área
	\$/ano		kW	kW	ft <sup>2</sup>
Grossmann e Sargent (1978)	32.890	9	-	-	-
Li, Guanfeng, Pingjing et al. (2004) <sup>b</sup>	29.438	8	1.826,00	0	-
He e Cui (2013)	30.794 <sup>a</sup>	10	1.829,50	0	3.855,86
Zhang, Cui et al. (2017)	30.783	10	1.829,50	0	3.809,60
Este trabalho	29.216	8	1.829,50	0	3.264,46

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

<sup>a</sup> Solução recalculada. <sup>b</sup> Solução com divisão nas correntes.

relata o desempenho computacional foi o realizado por Zhang, Cui et al. (2017), que levou 1.093 s para encontrar a melhor solução. Neste trabalho, o algoritmo proposto levou 374,65 s.

## 5.6 CASO 6

Este caso diz respeito à síntese da RTC em uma planta de ácido nítrico localizada em Barrancabermeja na Colômbia e foi primeiramente estudada por Castillo, Acevedo e Reverberi (1998). Os autores utilizaram análise Pinch e obtiveram resultados interessantes em relação à redução de emissões e custos. O problema tem seis correntes quentes e cinco frias e os dados são apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 6

Correntes	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	CP	h
	K	K	kw/K	kW/m <sup>2</sup> K
H1	1113	313	4.9894	1.5
H2	349	318	4.6840	1.5
H3	323	313	0.7720	1.5
H4	453	350	0.6097	1.5
H5	453	452	292.70	0.8
H6	363	318	3.066	1.5
C1	297	298	329.8	0.8
C2	298	343	0.5383	1.5
C3	308	395	3.7270	1.5
C4	363	453	0.6097	1.5
C5	453	454	2381.1	0.8
HU	503	503	-	1.5
CU	293	313	-	0.8

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

Custo do trocador(\$ ) = 9.094 + 485 · A<sup>0,6</sup>

para todas as trocas (A em m<sup>2</sup>).

CHU = 110\$/(kW·ano).

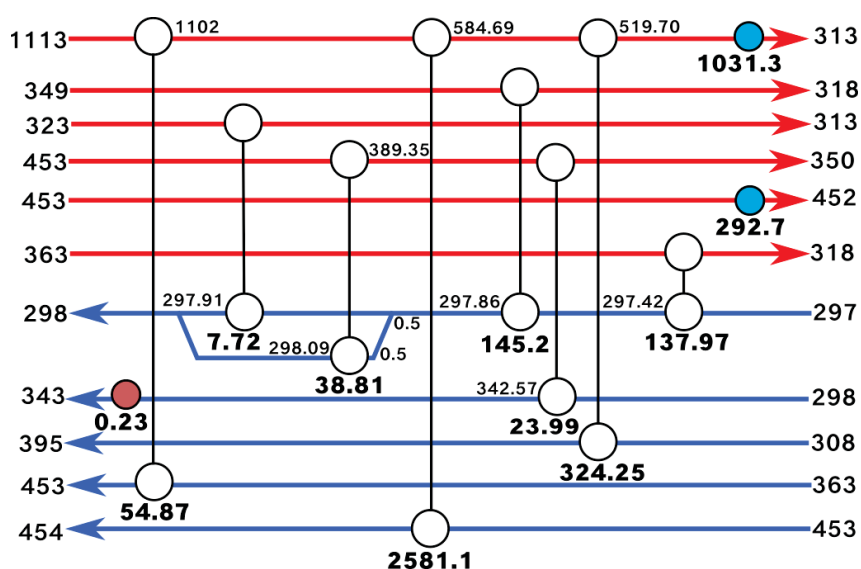
CCU = 15\$/(kW·ano).

O problema foi posteriormente adaptado por Silva et al. (2010), que propuseram uma função de custos de área e reavaliaram a solução relatada por Castillo et al. (1998). Os autores

utilizaram PSO para alcançar uma solução com CTA de 139.777 \$/ano. Com a função de custos de área proposta por Silva et al. (2011), a solução relatada por Castillo, Acevedo e Reverberi (1998) tem um CTA de 141.554 \$/ano. Pavão, Costa e Ravagnani (2016) fizeram uma análise detalhada desse problema, reavaliando a solução de Silva et al. (2011), que teve seu CTA corrigido para o valor de 141.141,8 \$/ano, valor ainda melhor que o de Castillo, Acevedo e Reverberi (1998). Pavão, Costa e Ravagnani (2016) foram capazes de obter soluções com um CTA melhor do que os acima mencionados com o método GA-PSO, que levou 1515,6 s para encontrar a melhor solução com um custo de 140.068 \$/ano. Mais tarde, Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017b) usaram SA para encontrar a melhor topologia de rede e RFO para otimizar as variáveis contínuas e o menor CTA encontrado foi de 139.438 \$/ano. A execução do algoritmo tardou 1.886 s.

No presente trabalho, para a solução do problema, o número adotado de estágios na superestrutura foi  $ST = 3$ . Com um total de 270 variáveis contínuas, 90 variáveis binárias e um número total de combinações igual a  $1,24 \times 10^{27}$ , o método híbrido proposto neste trabalho foi capaz de encontrar uma rede com CTA de 139.616,19 \$/ano, que é mostrada na FIGURA 11. A melhor topologia foi encontrada na 14ª geração após 2.854 s e a melhor solução para esta topologia foi encontrada na 27ª geração após 4.677 s.

FIGURA 11 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 6 SEM RESTRIÇÃO DE ÁREA

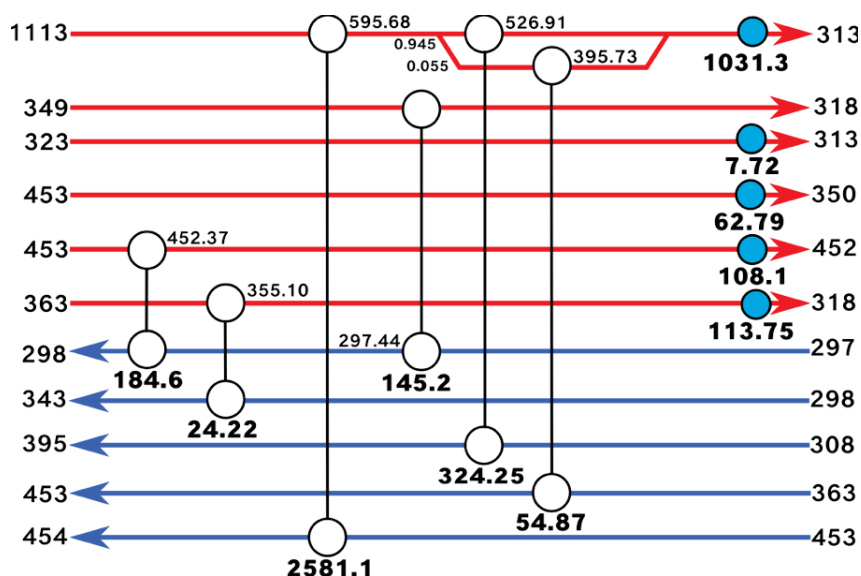


FONTE: a Autora(2018).

Em todos esses trabalhos, a síntese de RTC forneceu trocadores de calor ou utilidades com áreas muito pequenas, o que é matematicamente viável, mas impraticável. Para resolver esse problema, Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017b) modificaram o problema original, incluindo uma restrição que garantiu a existência de trocadores de calor e utilidades com áreas maiores que  $1 \text{ m}^2$ , o que torna os resultados mais realistas. O CTA encontrado neste caso foi de 140.484 \$/ano e a execução do algoritmo levou 1.127 s. A mesma restrição mínima de área

foi incluída no presente trabalho e após 2.939 s a solução encontrada foi a mesma de Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017b) que é mostrada na FIGURA 12. Nos dois trabalhos de Pavão et al. (2016; 2017b), os autores usaram processamento paralelo com 4 núcleos.

FIGURA 12 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 6 COM RESTRIÇÃO DE ÁREA



FONTE: a Autora(2018).

A TABELA 14 mostra o valor obtido quando comparado aos encontrados na literatura. Para a formulação sem restrição de área, o custo total anual foi 0,12% maior que o melhor custo encontrado.

## 5.7 CASO 7

Esse caso de estudo possui 5 correntes quentes e 5 correntes frias e foi introduzido por Linnhoff e Flower (1978). Os autores aplicaram um método orientado termodinamicamente, realizado em duas etapas, uma que gera as topologias com máxima recuperação de calor e a outra que melhora essas topologias. Além de realizar a síntese de RTC, o algoritmo evolutivo permite buscar estratégias para o projeto dos trocadores de calor que viabilizam um custo menor para a rede. O melhor custo encontrado foi de 43.934 \$/ano. Os dados do problema são apresentados na TABELA 15.

Lewin, Wang e Shalev (1998) propuseram um modelo que possui uma formulação de PLIM e usaram GA para gerar as topologias e o método SIMPLEX para determinar a quantidade de calor nas unidades. O custo encontrado pelos autores foi de 43.799 \$/ano. Esse modelo foi adaptado a problemas não lineares por Lewin (1998) e o custo foi reduzido para 43.752

TABELA 14 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 6

	CTA	Unidades	$Q_H$	$Q_C$	Área
	\$/ano		kW	kW	m <sup>2</sup>
Castillo, Acevedo e Reverberi (1998)	141.554 <sup>a</sup>	11	0	1.323,67	-
Silva et al. (2011) <sup>c</sup>	140.142 <sup>b</sup>	11	0	1.323,67	66,15
Pavão, Costa e Ravagnani (2016) <sup>c</sup>	140.068	11	0	1.323,69	64,69
Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017b) <sup>c</sup>	139.438	11	0,33	1.324,00	65,12
Pavão, Costa, Ravagnani e Jiménez (2017b) <sup>c,d</sup>	140.484	11	0	1.323,66	65,38
Este trabalho <sup>c</sup>	139.616	11	0,23	1.323,80	64,22
Este trabalho <sup>c,d</sup>	140.484	11	0	1.323,66	65,38

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

<sup>a</sup> CTA da configuração proposta por Castillo, Acevedo e Reverberi (1998) calculada e reportada por Silva et al. (2011).

<sup>b</sup> CTA da configuração proposta por Silva et al. (2011) calculada e reportada por Pavão, Costa e Ravagnani (2016).

<sup>c</sup> Solução com divisão nas correntes.

<sup>d</sup> Solução para a formulação com restrição de área (min. de 1.0 m<sup>2</sup>).

TABELA 15 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 7

Correntes	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	CP
	° C	° C	kw/K
H1	160	93	8.79
H2	249	138	10.55
H3	227	66	14.77
H4	271	149	12.56
H5	199	66	17.73
C1	60	160	7.62
C2	116	222	6.08
C3	38	221	8.44
C4	82	177	17.28
C5	93	205	13.9
HU	236	236	-
CU	38	82	-

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

Custo1\_trocador (\$) = 140 A<sup>0,6</sup> \$/ano para todas as trocas.

Custo2\_trocador (\$) = 145,63 A<sup>0,6</sup> \$/ano para todas as trocas.

U=0,852 kW/m<sup>2</sup> para todas as trocas, exceto aquelas que ocorrem nos aquecedores.

U=1,136 kW/m<sup>2</sup> para as trocas que ocorrem nos aquecedores.

\$/ano. Todos os trabalhos referentes a esses casos citados acima utilizaram o custo anual dos trocadores igual a 145,63 A<sup>0,6</sup> \$/ano.

Lin e Miller (2004) utilizaram o algoritmo TS para a síntese de RTC e apresentaram uma rede ótima com CTA de 43.329 \$/ano após 28.207 s. O custo anual utilizado para os trocadores de calor empregado pelos autores foi de 140 A<sup>0,6</sup> \$/ano. Pariyani, Gupta e Ghosh

(2006) trabalharam com um algoritmo aleatório capaz de gerar sequencialmente topologias mais flexíveis. Usando o custo anual de trocadores de calor igual a  $145,63 A^{0,6}$  \$/ano, o CTA encontrado foi de 43.661 \$/ano após 10.012 *s*.

Os resultados desse trabalho são apresentados na TABELA 16 e são comparados com outros trabalhos. Dois valores para o custo anual dos trocadores de calor são trabalhados na literatura. Portanto, a análise do CTA mínimo foi feita considerando esses valores.

TABELA 16 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 7

	CTA \$/ano	Unidades	$Q_H$ kW	$Q_C$ kW
Linnhoff e Flower (1978) <sup>2</sup>	43.934	10	0	1.975,00
Lewin (1998) <sup>2</sup>	43.752 <sup>b</sup>	10	0	1.879,00
Lin e Miller (2004) <sup>1</sup>	43.329 <sup>a</sup>	10	0	1.878,95
Pariyani, Gupta e Ghosh (2006) <sup>2</sup>	43.661 <sup>a</sup>	11	0	1.875,80
Este trabalho <sup>1</sup>	43.227 <sup>a</sup>	10	0	1.878,94
Este trabalho <sup>2</sup>	43.596 <sup>a</sup>	10	0	1.878,94

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

<sup>a</sup> Solução com divisão nas correntes. <sup>b</sup> Solução recalculada e reportada por Pariyani, Gupta e Ghosh (2006).

<sup>1</sup> Custo1\_trocador (\$) =  $140 A^{0,6}$  \$/ano. <sup>2</sup> Custo2\_trocador (\$) =  $145,63 A^{0,6}$  \$/ano.

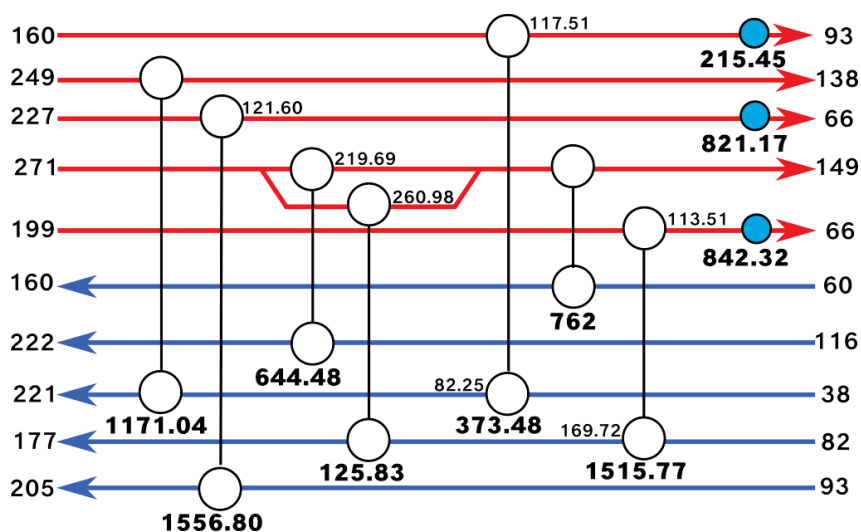
No presente trabalho o número de estágios adotado na superestrutura é  $ST = 2$ . Com um total de 150 variáveis contínuas, 50 variáveis binárias e um número total de combinações igual a  $1,13 \times 10^{15}$ , o método híbrido proposto foi capaz encontrar uma rede com CTA de 43.227 \$/ano (para Custo1\_trocador (\$) =  $140 A^{0,6}$  \$/ano) e 43.596 \$/ano (para Custo2\_trocador (\$) =  $145,63 A^{0,6}$  \$/ano). A melhor solução é mostrada na FIGURA 13 e foi encontrada na 32<sup>a</sup> geração após 2.029 *s*.

## 5.8 CASO 8

Este é o estudo de um problema de tamanho industrial, relativo à síntese de RTC, de uma planta da petroquímica de Bandar Imam, localizada no Golfo Pérsico. O caso foi apresentado por Khorasany e Fesanghary (2009). Os dados do problema são apresentados na TABELA 17.

Este caso foi resolvido usando duas abordagens diferentes por esses autores. No primeiro, a partir de uma estrutura de rede existente, os autores otimizaram as funções do trocador e as frações de divisão de correntes e encontraram uma rede diferente com CTA de 8.085.410 \$/ano, que é menor do que o custo original da rede. No entanto, foi na segunda abordagem que os melhores resultados foram obtidos. A estrutura da RTC, as cargas térmicas

FIGURA 13 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 7



FONTE: a Autora(2018).

TABELA 17 – DADOS DAS CORRENTES PARA O CASO 8

Correntes	Tin K	Tout K	CP kw/K	h kW/m <sup>2</sup> K
H1	385	159	131.51	1.238
H2	516	43	1198.96	0.546
H3	132	82	378.52	0.771
H4	91	60	589.545	0.859
H5	217	43	186.216	1.0
H6	649	43	116	1
C1	30	385	119.1	1.85
C2	99	471	191.06	1.129
C3	437	521	377.91	0.815
C4	78	418.6	160.43	1.0
C5	217	234	1297.7	0.443
C6	256	266	2753	2.085
C7	49	149	197.39	1.0
C8	59	163.4	123.156	10.63
C9	163	649	95.98	1.81
C10	219	221.3	1997.5	1.377
HU1	1800	800	-	1.0
HU1	509	509	-	1.0
CU	38	82	-	1.0

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

Custo do trocador (\$) =  $26,6 + 4.147,5 A^{0,6}$  para todas as trocas.

CHU1 = 35 \$/(kW · ano). CHU2 = 27 \$/(kW · ano). CCU = 2,1 \$/(kW·ano).

e as frações de divisão de correntes foram otimizadas simultaneamente, levando a um CTA de 7.435.740 \$/ano. Os autores utilizaram o híbrido HS-SQP. A execução do algoritmo tardou 2.564 s. Zhaoyi et al. (2013) utilizaram um GA para gerar topologias e PSO para trabalhar com as variáveis contínuas. A melhor solução encontrada pelos autores para uma formulação sem divisão nas correntes foi de 7.385.856 \$/ano, enquanto para uma formulação com divisão nas

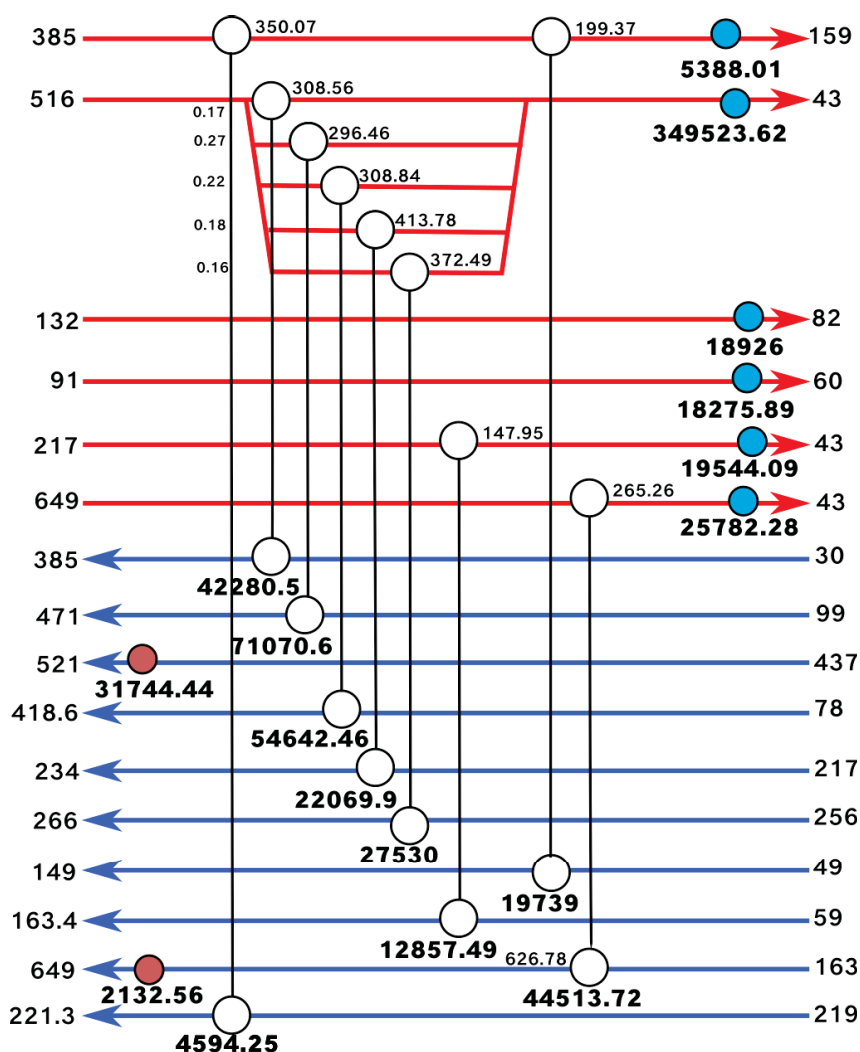
correntes foi encontrada uma configuração com CTA de 7.361.190 \$/ano. O tempo de execução do algoritmo para esses dois casos é de 5.400 *s* e 2.860 *s*, respectivamente.

Este problema foi resolvido em dois trabalhos recentes. No trabalho de Pavão, Costa e Ravagnani (2017), um método híbrido com SA e PSO foi utilizado juntamente com técnicas de processamento paralelo para alcançar uma configuração com CTA de 7.301.437 \$/ano após 4.022 *s*. Zhang, Cui et al. (2017) empregaram o algoritmo de RWCE sem considerar divisão nas correntes. No entanto, a solução apresentada pelos autores, apresentou uma inconsistência nas áreas de resfriadores, que foram subestimados. Quando recalculado com dados das cargas de calor fornecidos, a solução de Zhang, Cui et al. (2017) rende um CTA de 7.212.115 \$/ano.

No presente trabalho, o número de estágios na superestrutura é definido como  $ST = 3$ . Com um total de 16 correntes, este é um problema de larga escala que possui 180 variáveis discretas, 540 variáveis contínuas e um total de  $1,53 \times 10^{54}$  combinações. O método proposto foi customizado devido à complexidade do caso. Em vez de gerar uma população de topologias aleatórias, a topologia encontrada por Zhaoyi et al. (2013) foi codificada nos cromossomos de 50 indivíduos. Ou seja, o algoritmo trabalha com uma população de topologias promissoras e perturba cada topologia várias vezes com o GA, a fim de melhorar o custo com DE. Com esse esquema, obteve-se uma topologia diferente de Zhaoyi et al. (2013), com um custo 3,52% menor de após 6.871,3 *s*. Todas as execuções do algoritmo alcançaram a mesma solução. A solução é mostrada na FIGURA 14. Quando o método foi executado com uma população inicial de topologias aleatórias, a melhor solução encontrada foi CTA de 7.244.701 \$/ano (12.609 *s* de tempo de processamento). Essa solução foi a melhor das 15 execuções, enquanto as outras 14 variaram de 7,3 M \$/ano a 7,5 M \$/ano, o que ainda é uma faixa competitiva em comparação com a literatura. Vale ressaltar que, para esses testes, uma vez que o método está lidando com um conjunto aleatório inicial de soluções, alguns parâmetros foram reajustados para uma busca mais ampla: o número de gerações aumentou em GA para 50 e em DE para 200.

A TABELA 18 apresenta uma comparação de diferentes métodos aplicados a este problema.

FIGURA 14 – MELHOR SOLUÇÃO PARA O CASO 8



FONTE: a Autora(2018).

TABELA 18 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA O CASO 8

	CTA \$/ano	Unidades	$Q_H(kW)$ kW	$Q_C(kW)$ kW
Planta existente	8.856.412	18	122,19	524,72
Khorasany e Fesanghary (2009) <sup>b</sup>	7.435.740	18	66,07	469,62
Zhaoyi et al. (2013) <sup>b</sup>	7.361.190 <sup>a</sup>	16	38,80	442,37
Zhaoyi et al. (2013)	7.385.856 <sup>a</sup>	17	35,14	438,70
Pavão, Costa e Ravagnani (2017)	7.301.437	17	34,21	437,78
Zhang, Cui et al. (2017)	7.212.115 <sup>a</sup>	19	23,79	437,44
Este trabalho <sup>b</sup>	7.102.786	17	33,87	437,44

FONTE: a Autora(2018).

NOTA:

<sup>a</sup> Solução recalculada.

<sup>b</sup> Solução com divisão nas correntes.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é feita uma análise geral dos resultados. Um estudo mais detalhado é direcionado para os três maiores casos estudados, ou seja, aqueles com maior número de variáveis. Nesses casos são realizadas uma avaliação do desempenho de cada metaheurística e uma análise de sensibilidade em relação ao número de estágios utilizados.

Os casos 1, 2 e 3 possuem quatro correntes. Porém, diferem levemente quanto ao número de variáveis, por não considerarem o mesmo número de estágios na superestrutura. Utilizando o método proposto GA-DE em ambos os casos, a melhor solução foi encontrada já na primeira iteração, com um tempo computacional bastante aceitável quando comparado com a literatura. Além disso, aplicando somente DE a uma rede promissora, também é possível encontrar a melhor solução. Nos casos 4 e 5, o fato de possuírem um maior número de variáveis impede que o DE aplicado a uma rede promissora encontre uma melhor solução. Assim, o GA é extremamente necessário nesses casos.

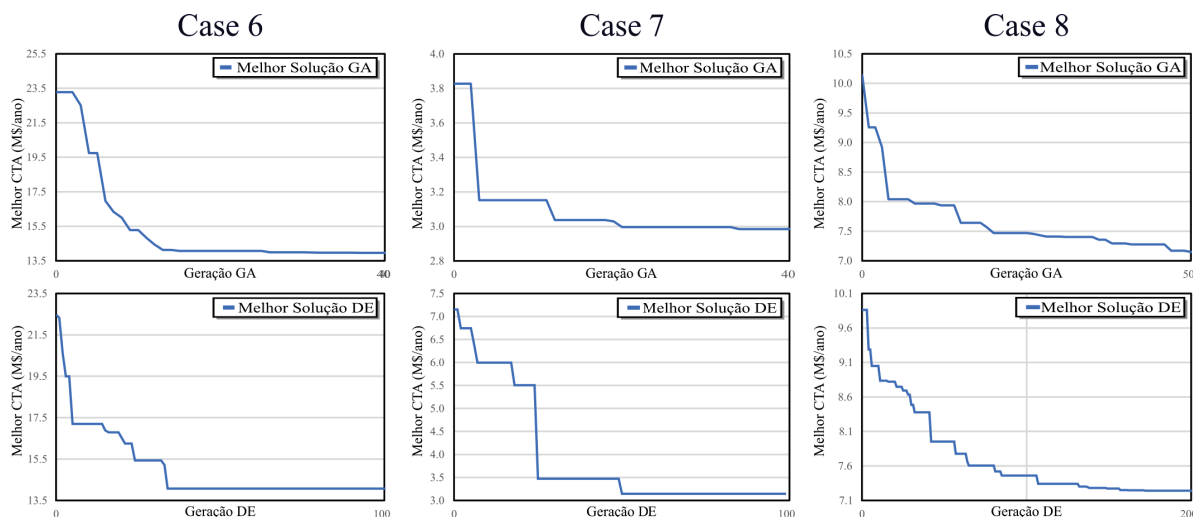
A FIGURA 15 ilustra a evolução da melhor solução geral no nível externo (GA) em uma aplicação para os Casos 6, 7 e 8 deste trabalho, e em uma única aplicação do algoritmo DE para uma topologia dos estágios posteriores das execuções de otimização, o que significa que eles provavelmente serão promissores. Para este estudo de desempenho, foram usadas 40 gerações de GA e 100 DE para os casos 6 e 7. Esses números são suficientes para a estagnação nesses casos. No entanto, o Caso 8 é maior e os parâmetros foram ajustados para 50 gerações de GA e 200 de DE.

Em relação à evolução do GA para os casos 6 (11 correntes) e 7 (10 correntes), é possível observar uma rápida descida nas primeiras 20 gerações, enquanto no caso 8, essa descida é mais lenta. O grande número de combinações possíveis neste caso, torna mais difícil para um algoritmo encontrar rapidamente soluções quase ótimas, e a melhor solução é encontrada em torno da geração 45.

Semelhante ao GA nos Casos 6 e 7, o algoritmo de nível interno (DE) rapidamente produz descidas e estagna ao redor das gerações 40-50, enquanto a descida é mais lenta no Caso 8, levando à estagnação em torno da geração 150. Essa diferença pode ser explicada devido ao número total de variáveis associadas às topologias. As configurações sendo otimizadas para o Caso 6 tinham oito trocadores de calor e uma divisão de dois ramos (ou seja, 10 variáveis contínuas). Para o Caso 7, dez trocadores de calor e uma divisão de dois ramos (ou seja, 12 variáveis contínuas) estavam presentes. Esses números aumentam para o Caso 8: nove trocadores de calor e uma divisão de cinco ramos, resultando em 14 variáveis contínuas o que leva este caso a ser mais exigente computacionalmente.

O número de estágios é um parâmetro importante para a síntese de RTC baseada no modelo de Yee e Grossmann (1990) e suas variantes. As análises de sensibilidade foram realizadas variando o número de estágios para os três maiores casos deste trabalho. No caso

FIGURA 15 – EVOLUÇÃO DE SOLUÇÕES PARA AS 40 PRIMEIRAS GERAÇÕES DO NÍVEL SUPERIOR (GA) E PARA AS 100 PRIMEIRAS GERAÇÕES DE UMA APLICAÇÃO DE DE PARA UMA TOPOLOGIA PROMISSORA PARA CASOS 6 E 7, E 50 GERAÇÕES DO GA E 200 DO DE PARA O CASO 8



FONTE: a Autora(2018).

6, esses experimentos foram realizados para duas situações: com e sem restrição de área mínima. Os resultados são apresentados na TABELA 19 e na TABELA 20, respectivamente. O uso de três estágios levou aos melhores resultados. Aumentar o número de estágios para quatro e cinco representou uma dificuldade adicional, já que o número de possíveis estruturas de RTC aumenta e o método não foi tão eficaz quanto com três estágios. Por outro lado, o uso de dois estágios limitou a estrutura da RTC, e pode perder várias soluções quase ótimas que exigiriam unidades em série. Conforme esperado, os tempos de execução aumentam com o número de estágios usados.

TABELA 19 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 6 SEM RESTRIÇÃO DE ÁREA

ST	CTA \$/ano	Tempo s
2	140.594	2.172,3
3	139.616	4.677,2
4	140.101	4.591,9
5	139.986	4.730,5

FONTE: a Autora(2018).

A análise de sensibilidade para os outros dois casos levou a resultados semelhantes a esse caso. Para o exemplo com 10 correntes (Caso 7), foi possível encontrar a melhor solução em um espaço de busca mais limitado, com dois estágios. A comparação com tentativas de otimização com outros números de estágios é mostrada na Tabela TABELA 21.

TABELA 20 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 6 COM RESTRIÇÃO DE ÁREA

ST	CTA	Tempo
	\$/ano	s
2	142.027	2.321,0
3	140.484	2.939,7
4	140.546	4.276,1
5	140.682	4.674,8

FONTE: a Autora(2018).

TABELA 21 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 7

ST	CTA	Tempo
	\$/ano	s
2	43.227	2.029,3
3	44.691	2.357,0
4	43.936	4.003,5
5	44.722	4.425,1

FONTE: a Autora(2018).

No Caso 8, a melhor solução foi encontrada em três estágios, enquanto que o uso de quatro e cinco estágios representa um problema maior, reduzindo a eficiência do algoritmo. O uso de dois estágios leva à redução excessiva do espaço de busca. Os resultados da análise de sensibilidade são mostrados na Tabela TABELA 22.

TABELA 22 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O CASO 8

ST	CTA	Tempo
	\$/ano	s
2	7.884.221	3.516,0
3	7.102.786	6.871,3
4	7.438.127	7.397,5
5	7.305.816	9.235,6

FONTE: a Autora(2018).

Baseado na análise de resultados aqui apresentada, tanto o desempenho das metahe-rísticas, quanto a análise de sensibilidade, mostraram-se satisfatórios para os casos 6, 7 e 8 estudados.

## 7 CONCLUSÕES

No presente trabalho, um método híbrido de otimização foi desenvolvido para resolver o problema de síntese RTC. O modelo baseia-se na superestrutura de Yee e Grossmann (1990), mas considerando mistura não isotérmica. Uma estratégia de dois níveis usando meta-heurísticas foi proposta para resolver o problema. A abordagem usa um GA para otimizar as topologias no nível superior. As cargas térmicas dos trocadores de calor e as frações de divisão de correntes associadas a essas topologias são otimizadas no nível inferior pelo algoritmo DE.

O método foi aplicado a oito casos da literatura. Os três primeiros casos estudados possuem apenas quatro correntes e em ambos a convergência do algoritmo para a melhor solução foi bem rápida. O caso 4 estudado, possui cinco correntes e a solução encontrada pode ser considerada o ótimo global para este problema, já que o mesmo foi anteriormente encontrado por um solucionador de otimização global. A melhor solução também foi encontrada para o caso 5 com oito correntes. O caso 6 possui onze correntes e foi avaliado considerando formulações com e sem restrições de área. Considerando a restrição de área, os resultados foram os mesmos quando comparados à literatura. Sem a restrição de área, o algoritmo encontrou uma rede com um custo total anual ligeiramente maior que o melhor custo encontrado. O caso 7 foi avaliado considerando dois custos distintos para os trocadores de calor. Em ambas as abordagens, o melhor custo foi encontrado. O caso 8 possui dezesseis correntes e encontrar uma boa solução a partir de topologias geradas aleatoriamente exigiu tempos de execução mais longos. Dessa forma, a melhor solução foi encontrada quando a população inicial de topologias foi inicializada com topologias promissoras.

Para trabalhar com redes ainda maiores, o método deve ser adaptado para tornar sua execução mais rápida. Por exemplo, o método pode ser recodificado nas linguagens FORTRAN ou C ++. Vale ressaltar também que o método proposto neste trabalho, que utiliza processamento serial, foi comparado a métodos nos quais a otimização foi realizada com processamento paralelo. Essa ferramenta pode melhorar muito seu desempenho computacional e também pode ser considerada para o desenvolvimento posterior dos estudos GA-DE. Portanto, o método proposto mostrou-se eficiente tanto para problemas de pequena escala quanto para problemas de larga escala, quando comparado à literatura recente.

Dessa forma, os resultados obtidos são encorajadores para futuras investigações com o método GA-DE como alternativa promissora. O potencial da abordagem, pode ser explorado adaptando os parâmetros de acordo com a geração e/ou pode ser investigado no retrofit de redes de trocadores de calor, incluindo dentro do projeto a possibilidade de calcular as propriedades físicas das correntes em função da temperatura. Pode-se realizar a síntese de redes de trocadores de calor considerando o menor impacto ambiental possível, nesse caso tem-se um problema multiobjetivo onde a função impacto ambiental, será acrescentada ao modelo. Também pode-se empregar o método à problemas de transferência de massa.

## REFERÊNCIAS

- ADJIMAN, C. S.; ANDROULAKIS, I. P.; FLOUDAS, C. A. Global optimization of mixed-integer nonlinear problems. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 46, n. 9, p. 1769–1797, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 55, 56.
- AGUITONI, M. C.; PAVÃO, L. V.; SIQUEIRA, P. H.; JIMÉNEZ, L.; RAVAGNANI, M. A. Heat exchanger network synthesis using genetic algorithm and differential evolution. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 117, p. 82–96, 2018. Citado 1 vez na página 39.
- AGUITONI, M. C.; PAVÃO, L. V.; SIQUEIRA, P. H.; JIMÉNEZ, L.; RAVAGNANI, M. A. d. S. S. Synthesis of a Cost-Optimal Heat Exchanger Network using Genetic Algorithm and Differential Evolution. **Chemical Engineering Transactions**, AIDC, v. 70, p. 979–984, 2018. Citado 1 vez na página 39.
- AHMAD, S.; LINNHOFF, B.; SMITH, R. Cost optimum heat exchanger networks—2. Targets and design for detailed capital cost models. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 751–767, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 25, 33.
- AHMAD, S. **Heat exchanger networks: Cost tradeoffs in energy and capital**. 1985. Tese (Doutorado) – University of Manchester Institute of Science e Technology (UMIST). Citado 2 vezes nas páginas 52, 53.
- ATHIER, G.; FLOQUET, P.; PIBOULEAU, L.; DOMENECH, S. Synthesis of heat-exchanger network by simulated annealing and NLP procedures. **AIChE journal**, Wiley Online Library, v. 43, n. 11, p. 3007–3020, 1997. Citado 1 vez na página 36.
- BABU, B.; MUNAWAR, S. Differential evolution strategies for optimal design of shell-and-tube heat exchangers. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 62, n. 14, p. 3720–3739, 2007. Citado 1 vez na página 38.
- BJÖRK, K.-M.; WESTERLUND, T. Global optimization of heat exchanger network synthesis problems with and without the isothermal mixing assumption. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 26, n. 11, p. 1581–1593, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58.
- BROWNLEE, J. **Clever algorithms: nature-inspired programming recipes**. [S.l.]: Jason Brownlee, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 35, 38.
- CASTILLO, E.; ACEVEDO, L.; REVERBERI, A. Clean Production of Nitric Acid By Heat Transfer Optimization: A Case Study, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 60, 61, 63.

CERDA, J.; WESTERBURG, A. W. Synthesizing heat exchanger networks having restricted stream/stream matches using transportation problem formulations. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 1723–1740, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 24, 31.

CIRIC, A. R.; FLOUDAS, C. A. A retrofit approach for heat exchanger networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 13, n. 6, p. 703–715, 1989. Citado 1 vez na página 32.

\_\_\_\_\_. Heat exchanger network synthesis without decomposition. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 15, n. 6, p. 385–396, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 20, 33.

COLBERT, R. Heat-transfer in action-industrial heat-exchange networks. **Chemical Engineering Progress**, AMER INST CHEMICAL ENGINEERS 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017, v. 78, n. 7, p. 47–54, 1982. Citado 1 vez na página 31.

DIPAMA, J.; TEYSSEDOU, A.; SORIN, M. Synthesis of heat exchanger networks using genetic algorithms. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 28, n. 14, p. 1763–1773, 2008. Citado 1 vez na página 35.

DOLAN, W.; CUMMINGS, P.; LEVAN, M. Process optimization via simulated annealing: application to network design. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 35, n. 5, p. 725–736, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 36, 53.

DORIGO, M.; CARO, G. D.; GAMBARDILLA, L. M. Ant algorithms for discrete optimization. **Artificial life**, MIT Press, v. 5, n. 2, p. 137–172, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 34, 39.

DURAN, M. A.; GROSSMANN, I. E. Simultaneous optimization and heat integration of chemical processes. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 32, n. 1, p. 123–138, 1986. Citado 1 vez na página 32.

EBERHART, R. C.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: NEW YORK, NY. PROCEEDINGS of the sixth international symposium on micro machine and human science. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 39–43. Citado 1 vez na página 37.

ESCOBAR, M. A. Síntese simultânea de Redes de Trocadores de Calor com considerações Operacionais: flexibilidade e controlabilidade. **Tese de doutorado**, 2011. Citado 0 vez na página 25.

ESCOBAR, M.; TRIERWEILER, J. O. Optimal heat exchanger network synthesis: A case study comparison. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 51, n. 1-2, p. 801–826, 2013. Citado 1 vez na página 41.

FLOUDAS, C. A.; CIRIC, A. R. Strategies for overcoming uncertainties in heat exchanger network synthesis. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 13, n. 10, p. 1133–1152, 1989. Citado 4 vezes nas páginas 20, 32, 33, 41.

FLOUDAS, C. A.; CIRIC, A. R.; GROSSMANN, I. E. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 32, n. 2, p. 276–290, 1986. Citado 5 vezes nas páginas 19, 25, 31, 32, 41.

FLOWER, J. R.; LINNHOFF, B. A thermodynamic-combinatorial approach to the design of optimum heat exchanger networks. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 26, n. 1, p. 1–9, 1980. Citado 1 vez na página 30.

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**, ACS Publications, v. 41, n. 10, p. 2335–2370, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 19, 24.

GHOSH, A.; CHATTOPADHYAY, S. Trajectory optimization of satellite launch vehicle using Self Adaptive Differential Evolution algorithm. In: IEEE. POWER, Communication and Information Technology Conference (PCITC), 2015 IEEE. [S.l.: s.n.], 2015. p. 297–301. Citado 1 vez na página 20.

GROSSMANN, I. E.; SARGENT, R. W. H. Optimum design of heat exchanger networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 1–7, 1978. Citado 3 vezes nas páginas 29, 58, 60.

HE, Q.; CUI, G. A principle of stream arrangement based on uniformity factor for heat exchanger networks synthesis. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 61, n. 2, p. 93–100, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 59, 60.

HLAVÁČEK, V. Synthesis in the design of chemical processes. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 67–75, 1978. Citado 1 vez na página 27.

HOHMANN, E. Optimum Networks for Heat Exchange (Ph. D. Thesis), 1971. Citado 3 vezes nas páginas 28–30.

HOLLAND, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems (Ann Arbor, MI: University of Michigan), 1975. Citado 2 vezes nas páginas 34, 35.

HUANG, K. F.; KARIMI, I. A. Simultaneous synthesis approaches for cost-effective heat exchanger networks. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 98, p. 231–245, 2013. Citado 1 vez na página 41.

HUANG, K. F.; AL-MUTAIRI, E. M.; KARIMI, I. Heat exchanger network synthesis using a stagewise superstructure with non-isothermal mixing. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 73, p. 30–43, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58.

HUO, Z.; ZHAO, L.; YIN, H.; YE, J. A hybrid optimization strategy for simultaneous synthesis of heat exchanger network. **Korean Journal of Chemical Engineering**, Springer, v. 29, n. 10, p. 1298–1309, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 37, 53.

HWA, C. Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming. In: AICHE-ICHEME Symposium Series. [S.l.: s.n.], 1965. v. 4, p. 101–106. Citado 1 vez na página 27.

JAGANNATH, A.; ALMANSOORI, A. Sequential synthesis of heat integrated water networks: A new approach and its application to small and medium sized examples. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 90, p. 44–61, 2016. Citado 1 vez na página 34.

KENNEDY, R. J. and Eberhart, Particle swarm optimization. In: PROCEEDINGS of IEEE International Conference on Neural Networks IV, pages. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1000. Citado 1 vez na página 34.

KESLER, M.; PARKER, R. Optimal networks of heat exchange. In: 92. CHEM. Eng. Prog. Symp. Ser. [S.l.: s.n.], 1969. v. 65, p. 111–120. Citado 2 vezes nas páginas 27, 28.

KHORASANY, R. M.; FESANGHARY, M. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 33, n. 8, p. 1363–1370, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 53, 54, 64, 67.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. et al. Optimization by simulated annealing. **science**, World Scientific, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 34, 36.

KOBAYASHI, S.; UMEDA, T.; ICHIKAWA, A. Synthesis of optimal heat exchange systems—an approach by the optimal assignment problem in linear programming. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 26, n. 9, p. 1367–1380, 1971. Citado 1 vez na página 28.

KONG, L.; MARAVELIAS, C. T. An Optimization-Based Approach for Simultaneous Chemical Process and Heat Exchanger Network Synthesis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 57, n. 18, p. 6330–6343, 2018. Citado 1 vez na página 34.

LAHIRI, S. K.; KHALFE, N. Improve shell and tube heat exchangers design by hybrid differential evolution and ant colony optimization technique. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, Wiley Online Library, v. 9, n. 3, p. 431–448, 2014. Citado 1 vez na página 40.

LEE, K.-F.; MASSO, A.; RUDD, D. Branch and bound synthesis of integrated process designs. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, ACS Publications, v. 9, n. 1, p. 48–58, 1970. Citado 1 vez na página 28.

LEWIN, D. R. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization – II.: The synthesis of cost-optimal networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 22, n. 10, p. 1387–1405, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 35, 62, 64.

LEWIN, D. R.; WANG, H.; SHALEV, O. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization—I. general framework and MER optimal synthesis. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 22, n. 10, p. 1503–1513, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 35, 62.

LI, G.; LUO, Y.; XIA, Y.; HUA, B. Improvement on the simultaneous optimization approach for heat exchanger network synthesis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 51, n. 18, p. 6455–6460, 2012. Citado 1 vez na página 34.

LI, L.; GUANFENG, W.; PINGJING, Y. et al. Identification and construction of multi-stream heat exchanger network. **Computers and Applied Chemistry**, v. 21, n. 3, p. 333–338, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 59, 60.

LIN, B.; MILLER, D. Solving heat exchanger network synthesis problems with Tabu Search. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 28, n. 8, p. 1451–1464, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 55, 56, 63, 64.

LINNHOFF, B.; AHMAD, S. Cost optimum heat exchanger networks—1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 729–750, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 25, 33.

LINNHOFF, B.; TURNER, J. Simple concepts in process synthesis give energy savings and elegant designs. **Chemical Engineer**, p. 742–6, 1980. Citado 1 vez na página 30.

LINNHOFF, B.; TURNER, J. A. Heat-recovery networks: new insights yield big savings. **Chem. Eng.(NY);(United States)**, Imp Chem Ind Ltd, Cheshire, Engl, v. 88, n. 22, 1981. Citado 1 vez na página 30.

LINNHOFF, B. **A user guide on process integration for the efficient use of energy**. [S.I.]: Institution of Chemical Engineers, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 19, 31.

\_\_\_\_\_. Pinch analysis: a state-of-the-art overview: Techno-economic analysis. **Chemical engineering research & design**, Elsevier, v. 71, n. 5, p. 503–522, 1993. Citado 1 vez na página 25.

LINNHOFF, B.; FLOWER, J. R. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 24, n. 4, p. 633–642, 1978. Citado 5 vezes nas páginas 29–31, 62, 64.

LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. The pinch design method for heat exchanger networks. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 38, n. 5, p. 745–763, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 19, 25, 31.

LINNHOFF, B.; MASON, D. R.; WARDLE, I. Understanding heat exchanger networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 295–302, 1979. Citado 1 vez na página 30.

MASSO, A. H.; RUDD, D. F. The synthesis of system designs. II. Heuristic structuring. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 15, n. 1, p. 10–17, 1969. Citado 1 vez na página 27.

MCGALLIARD, R. L.; WESTERBERG, A. W. Structural sensitivity analysis in design synthesis. **The Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 127–138, 1972. Citado 1 vez na página 28.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of state calculations by fast computing machines. **The journal of chemical physics**, AIP, v. 21, n. 6, p. 1087–1092, 1953. Citado 1 vez na página 36.

MIRANDA, C. B.; COSTA, C. B.; CABALLERO, J. A.; RAVAGNANI, M. A. Optimal synthesis of multiperiod heat exchanger networks: A sequential approach. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 115, p. 1187–1202, 2017. Citado 1 vez na página 34.

MYANKOOH, Y. P.; SHAFIEI, S. Application of ACO R to find optimal no stream splitting heat exchanger networks for pre-designed heat exchanger networks. **Chemical engineering research & design**, Elsevier, v. 96, p. 158–171, 2015. Citado 1 vez na página 40.

NIELSEN, J. S.; HANSEN, M. W.; JOERGENSEN, S. bay. Heat exchanger network modelling framework for optimal design and retrofitting. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 20, s249–s254, 1996. Citado 2 vez na página 53.

NISHIDA, N.; LIU, Y.; LAPIDUS, L. Studies in chemical process design and synthesis: III. A simple and practical approach to the optimal synthesis of heat exchanger networks. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 23, n. 1, p. 77–93, 1977. Citado 1 vez na página 29.

NISHIDA, N.; KOBAYASHI, S.; ICHIKAWA, A. Optimal synthesis of heat exchange systems Necessary conditions for minimum heat transfer area and their application to systems synthesis. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 26, n. 11, p. 1841–1856, 1971. Citado 1 vez na página 28.

PAPOULIAS, S. A.; GROSSMANN, I. E. A structural optimization approach in process synthesis—II: Heat recovery networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 7, n. 6, p. 707–721, 1983. Citado 7 vezes nas páginas 19, 20, 24, 31–33.

PARIYANI, A.; GUPTA, A.; GHOSH, P. Design of heat exchanger networks using randomized algorithm. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 30, n. 6-7, p. 1046–1053, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 63, 64.

PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A.; JIMÉNEZ, L. Costs and environmental impacts multi-objective heat exchanger networks synthesis using a meta-heuristic approach. **Applied Energy**, v. 203, p. 304–320, 2017. Citado 1 vez na página 38.

PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; JIMÉNEZ, L.; RAVAGNANI, M. A. A Hybrid Meta-Heuristic Approach for Multi-Objective Optimization of Heat Exchanger Networks considering Costs and Environmental Impacts. **Chemical Engineering Transactions**, v. 61, p. 1381–1386, 2017. Citado 1 vez na página 38.

PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A. Automated heat exchanger network synthesis by using hybrid natural algorithms and parallel processing. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 94, p. 370–386, 2016. Citado 11 vezes nas páginas 38, 54, 55, 57, 58, 61, 63.

\_\_\_\_\_. Heat exchanger network synthesis without stream splits using parallelized and simplified simulated annealing and particle swarm optimization. **Chemical Engineering Science**, v. 158, p. 96–107, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 38, 66, 67.

PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A.; JIMÉNEZ, L. Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization. **AIChE Journal**, v. 63, n. 5, p. 1582–1601, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 38, 61–63.

PAVÃO, L. V.; MIRANDA, C. B.; COSTA, C. B.; RAVAGNANI, M. A. Synthesis of multi-period heat exchanger networks with timesharing mechanisms using meta-heuristics. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 128, p. 637–652, 2018. Citado 1 vez na página 20.

PENG, F.; CUI, G. Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 78, p. 136–149, 2015. Citado 1 vez na página 36.

PETTERSSON, F. Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach. **Computers & chemical engineering**, Elsevier, v. 29, n. 5, p. 993–1007, 2005. Citado 1 vez na página 34.

PONTON, J.; DONALDSON, R. A fast method for the synthesis of optimal heat exchanger networks. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 29, n. 12, p. 2375–2377, 1974. Citado 1 vez na página 28.

RAVAGNANI, M. A.; SILVA, A. P.; BISCAIA JR, E. C.; CABALLERO, J. A. Optimal design of shell-and-tube heat exchangers using particle swarm optimization. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 48, n. 6, p. 2927–2935, 2009. Citado 1 vez na página 37.

RAVAGNANI, M. A.; SILVA, A.; ARROYO, P.; CONSTANTINO, A. Heat exchanger network synthesis and optimisation using genetic algorithm. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 25, n. 7, p. 1003–1017, 2005. Citado 1 vez na página 35.

- SHAH, J. V.; WESTERBERG, A. W. E. A program for quick evaluation of energy recovery systems. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 21–32, 1980. Citado 1 vez na página 30.
- SHAH, J. V.; WESTERBERG, A. W. E. Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis a transportation problem. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 38, n. 3, p. 373–387, 1983. Citado 1 vez na página 31.
- SHORT, M.; ISAFIADE, A. J.; FRASER, D. M.; KRAVANJA, Z. Synthesis of heat exchanger networks using mathematical programming and heuristics in a two-step optimisation procedure with detailed exchanger design. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 144, p. 372–385, 2016. Citado 1 vez na página 20.
- SILVA, A. P.; RAVAGNANI, M. A.; BISCAIA JR, E. C.; CABALLERO, J. A. Optimal heat exchanger network synthesis using particle swarm optimization. **Optimization and Engineering**, Springer, v. 11, n. 3, p. 459–470, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 37, 54, 55, 61, 63.
- STORN, R.; PRICE, K. **Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces**. [S.l.]: ICSI Berkeley, 1995. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 34, 38.
- SUÁREZ, J. A. C.; S.S. RAVAGNANI, M. A. da. **Redes de cambiadores de calor**. [S.l.]: Universidad de Alicante, 2012. Citado 0 vez na página 23.
- SUGANTHI, S.; DEVARAJ, D.; RAMAR, K.; THILAGAR, S. H. An Improved Differential Evolution algorithm for congestion management in the presence of wind turbine generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 81, p. 635–642, 2018. Citado 1 vez na página 20.
- TJOE, T. N.; LINNHOFF, B. Using pinch technology for process retrofit. **CHEMICAL ENGINEERING**, 1986. Citado 1 vez na página 32.
- UMEDA, T.; HARADA, T.; SHIROKO, K. A thermodynamic approach to the synthesis of heat integration systems in chemical processes. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 273–282, 1979. Citado 1 vez na página 30.
- UMEDA, T.; ITOH, J.; SHIROKO, K. Heat-exchange system synthesis. **Chemical Engineering Progress**, AMER INST CHEMICAL ENGINEERS 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017, v. 74, n. 7, p. 70–76, 1978. Citado 2 vezes nas páginas 29, 30.
- UMEDA, T.; NIIDA, K.; SHIROKO, K. A thermodynamic approach to heat integration in distillation systems. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 25, n. 3, p. 423–429, 1979. Citado 1 vez na página 30.

WU, H.; YAN, F.; LI, W.; ZHANG, J. Simultaneous heat exchanger network synthesis involving nonisothermal mixing streams with temperature-dependent heat capacity. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 54, n. 36, p. 8979–8987, 2015. Citado 1 vez na página 34.

YEE, T. F.; GROSSMANN, I. E. A screening and optimization approach for the retrofit of heat-exchanger networks. **Industrial & engineering chemistry research**, ACS Publications, v. 30, n. 1, p. 146–162, 1991. Citado 1 vez na página 33.

\_\_\_\_\_. Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 14, n. 10, p. 1165–1184, 1990. Citado 12 vezes nas páginas 19, 21, 25, 26, 33, 39, 41, 57, 68, 71.

YEE, T. F.; GROSSMANN, I. E.; KRAVANJA, Z. Simultaneous Journal = optimization models for heat integration—I. A year = ea and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 14, n. 10, p. 1151–1164, 1990. Citado 3 vezes nas páginas 25, 33, 37.

YERRAMSETTY, K. M.; MURTY, C. Synthesis of cost-optimal heat exchanger networks using differential evolution. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 32, n. 8, p. 1861–1876, 2008. Citado 1 vez na página 39.

ZHANG, H.; RANGAIAH, G. One-step approach for heat exchanger network retrofitting using integrated differential evolution. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 50, p. 92–104, 2013. Citado 1 vez na página 39.

ZHANG, H.; CUI, G.; XIAO, Y.; CHEN, J. A novel simultaneous optimization model with efficient stream arrangement for heat exchanger network synthesis. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 110, p. 1659–1673, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 59, 60, 66, 67.

ZHAOYI, H.; LIANG, Z.; HONGCHAO, Y.; JIANXIONG, Y. Simultaneous synthesis of structural-constrained heat exchanger networks with and without stream splits. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Wiley Online Library, v. 91, n. 5, p. 830–842, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 65–67.

ZHU, X. X. Automated design method for heat exchanger network using block decomposition and heuristic rules. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 21, n. 10, p. 1095–1104, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 54, 55.