

4. Metodologia de otimização

No presente capítulo, a título de introdução, mencionam-se os trabalhos relevantes à otimização de circuitos do refrigerante em TCTA's encontrados na literatura. Segue a descrição do problema a ser tratado (função objetivo, variáveis do problema e restrições consideradas). Apresenta-se em detalhe, a nova metodologia de otimização proposta, a qual foi denominada método GAFIS (*Genetic algorithms applied in filtered spaces*). Testes numéricos para ajustar o método, e para validar sua eficiência, também são mostrados.

4.1. Introdução

Conforme já mencionado, a otimização dos circuitos do refrigerante, no evaporador e condensador, em um sistema de refrigeração, se realiza, atualmente, de maneira seqüencial, trocador por trocador, devido ao fato de o problema não ser trivial. Isto em virtude da representação complexa do problema, do alto custo computacional para simular o problema, do amplo espaço de busca de múltiplas variáveis e da necessidade de restrições físicas e geométricas.

Uma técnica de otimização baseada em AG seria adequada. Entretanto, as metodologias atuais, baseadas nesta técnica, otimizam o circuito do refrigerante em um único trocador de tipo tubo-aletado (Kaufman e Michalski, 2000 e 2004; Domanski e Yashar, 2007a; e Wu et al. 2008), mas apresentam deficiência ao usar os operadores genéticos, pois requerem de métodos corretivos que garantam que as soluções cumpram as restrições impostas, os quais diminuem significativamente a efetividade do método de otimização.

Num primeiro momento, resultará de interesse se definir o número de ramais ótimo para os circuitos. Pois este parâmetro influi, de maneira determinante, no desempenho dos trocadores de calor. Granryd e Palm (2003) propuseram uma maneira de encontrar o número de ramais ótimo nos circuitos

de evaporadores, como ajuda ao projeto dos circuitos, baseados na minimização da queda de pressão para uma determinada condição de temperaturas de entrada e de capacidade térmica.

4.2. Descrição do problema

Num sistema de refrigeração por compressão de vapor, o desempenho global do sistema depende de uma série de variáveis tais como: as condições do meio ambiente e do ambiente refrigerado (pressão, temperatura, umidade), os componentes do sistema (eficiência dos equipamentos, seu dimensionamento, etc.), o tipo de fluido refrigerante utilizado (propriedades termofísicas, condições de operação, etc.), as características de operação do sistema (vazões mássicas dos fluidos, níveis de pressão interna, etc.), entre outras.

A melhora do desempenho do sistema pode ser obtida de diversas maneiras. Entretanto, o objetivo do presente trabalho é a otimização dos circuitos de refrigerante nos trocadores de calor. Assim, a mais viável possibilidade de mudança a ser otimizada, que resulta prática e econômica, será a de definir a maneira em como são realizadas as conexões entre os tubos que conformam os trocadores de calor, o que define o circuito para o refrigerante. Todas as demais variáveis do problema a ser tratado são mantidas constantes.

4.2.1. Objetivo da otimização

No presente estudo, é desejável a maximização do COP. Este parâmetro dá uma idéia de quão eficiente é o sistema de refrigeração. Assim, o COP foi a função objetivo (f) adotada ao longo do presente trabalho.

No presente trabalho somente foi utilizado o COP como função objetivo. Diversos parâmetros podem ser utilizados de acordo com o objetivo desejado (diminuição do peso da instalação, maximização da capacidade de resfriamento, redução do consumo de energia, entre outros). O COP, como função objetivo, pode ser aproveitado de maneira indireta para conseguir sistemas equivalentes em desempenho, porém de menor custo de produção, por exemplo, como foi realizado em um dos estudos de casos do presente trabalho.

4.2.2. Variáveis do problema

Um conjunto de variáveis que descrevam a maneira de como deve de ser traçado o circuito do refrigerante em cada trocador de calor constituem as variáveis do problema.

Por exemplo, seja um trocador de calor composto por tubos numerados 1, 2, 3, 4 e 5. Poder-se-ia definir um circuito por meio da cadeia de valores: 4-2-1-3-5, a qual indicaria que o circuito se inicia no tubo número 4, continua no tubo número 2, e assim sucessivamente até o tubo número 5.

Assim, as conexões entre tubos, que definem o circuito do fluido refrigerante, são as variáveis do problema. Estas são representadas por uma sucessão ordenada dos índices dos tubos que conformam o trocador de calor.

4.2.3. Restrições

Para garantir uma otimização bem sucedida, as seguintes restrições foram impostas ao problema em estudo:

- (1) Volume e dimensões principais dos trocadores de calor constantes (atenção especial ao dimensionamento e á quantidade de tubos a serem utilizados na geração dos circuitos). Limitando assim o uso dos recursos físicos existentes, evitando o aumento dos custos de produção.
- (2) Número de ramais ótimo predefinido para os circuitos. Isto porque o número de ramais influi significativamente no desempenho dos trocadores de calor.
- (3) Tubos pertencentes a um mesmo ramal devem se encontrar próximos entre si. Isto é, em zonas predefinidas, o que evitará problemas para sua construção física posterior.
- (4) Tubos predefinidos como tubos de entrada ou saída para os ramais. Isto ajudará o projetista a planejar da melhor maneira as conexões entre os trocadores de calor e os demais componentes do sistema.
- (5) Ramais de um circuito devem ser produto da conexão de tubos com tubos que se encontrem ao seu redor. Isto poupará a quantidade de material de tubo empregado, diminuirá a carga de refrigerante no sistema, e evitará problemas para sua construção física posterior.

4.3. Definição do número ótimo de ramais nos trocadores de calor

Devido ao fato de os números de ramais encontrados pelo método de Granryd e Palm (2003) distarem significativamente do número de ramais ótimo, para o evaporador e o condensador, a maneira que maximizam o COP do sistema (encontrados nos estudos de casos, após se simular com o Genesym os diversos pares de combinações de números de ramais possíveis no evaporador e no condensador), decidiu-se por utilizar o método de busca exaustiva, com ajuda do Genesym, para definir o par de números de ramais ótimo nos circuitos do evaporador e do condensador, como um primeiro estágio de otimização, prévio ao uso do GAFIS.

4.4. Nova metodologia de otimização (GAFIS)

Uma nova metodologia de otimização, que utiliza uma nova representação para os circuitos, é aqui proposta. Esta compreende duas etapas: (1) redução do universo de busca por meio da imposição das restrições aplicáveis às variáveis do problema requeridas para o problema (processo de filtragem); e (2) o uso de algoritmo genético para a busca da solução ótima dentre o universo de busca já filtrado (ou reduzido).

A redução do universo de busca é possível a partir da exploração de todas as possíveis soluções do universo de busca original. Soluções que cumpram as restrições impostas são armazenadas num banco de dados, sendo as restantes descartadas. Todos os métodos de otimização existentes até o momento (2009), aplicados à otimização de circuitos em trocadores de tipo tubo-aletado, lidam com o universo de busca original e impõem as restrições durante o processo de otimização. O método proposto vê-se beneficiado ao tratar o problema com um universo de busca reduzido. Em alguns estudos de casos realizados no presente trabalho, ocorreram reduções do universo de busca de uma ordem de 10^{80} vezes.

A maneira de representar os circuitos (definindo os ramais dos circuitos em zonas específicas do trocador de calor), junto ao uso de um banco de dados que somente possua soluções válidas (já filtradas), permite o uso de operadores genéticos clássicos. Soluções geradas pelos operadores genéticos, considerando o banco de dados, sempre serão soluções que cumprem as

restrições do problema. Portanto, métodos corretivos para as soluções, ao longo do processo de otimização, se fazem desnecessários.

Estas duas características (de redução do universo de busca e do uso adequado de operadores genéticos que não precisem de métodos corretivos) fazem que a nova proposta de otimização seja mais rápida e eficiente, durante todo o processo de otimização. O bom desempenho do método torna-o aplicável para a otimização simultânea dos dois trocadores de calor presentes no sistema de refrigeração.

Em resumo, esta nova metodologia trata as restrições do problema numa etapa prévia à otimização, por meio da exploração de todas as combinações de soluções, eliminando as soluções não desejadas, reduzindo assim o universo de busca, antes do uso de um método de AG para buscar as soluções ótimas. Esta metodologia denominou-se aqui como GAFIS (*Genetic algorithms applied in filtered spaces*).

4.4.1. Algoritmo (GAFIS)

Na fig.16 mostra-se o diagrama de fluxo para o algoritmo de otimização GAFIS. Duas etapas são claramente definidas: (1) A redução do universo de busca, gerando-se um banco de dados de soluções reduzidas (processo de filtragem) e, (2) o uso de um AG para o processo de otimização utilizando estes bancos de dados.

A primeira etapa, de filtragem, elimina as soluções que não cumprem com as restrições, sendo requerida informação do problema (geometria inicial dos trocadores de calor) e das restrições específicas que se desejam ser impostas, ver fig.16. O conjunto de soluções filtradas passará a ser armazenado num banco de dados.

Numa segunda etapa é realizado o processo de otimização propriamente dito. Num primeiro momento, seleciona-se de maneira aleatória um conjunto de soluções do banco de dados para ser considerado como a população inicial para o método de otimização. A informação destas soluções é repassada para o simulador externo (Genesym) para avaliar o COP do sistema de refrigeração ao utilizar estes circuitos nos seus trocadores de calor. O Genesym (simulador do

ciclo completo de refrigeração) precisa de informações específicas do sistema, das condições de operação, e da informação dos circuitos (de ambos trocadores de calor). Em seguida, a população é ordenada de acordo com os valores de COP obtidos. Um valor de aptidão é designado, ou conferido, para cada solução, de acordo com a ordem que ocupam dentro da população, seguindo uma distribuição linear.

Caso o critério de parada, para o algoritmo, não seja ainda atingido, o conjunto de soluções (população) passará por um processo de evolução que criará novas potenciais soluções na população. O critério de parada adotado no GAFIS foi um número predeterminado de evoluções.

Um primeiro subconjunto da população, com maiores valores de aptidão passarão, de maneira direta, a fazer parte da nova população (mecanismo de elite). A informação de um segundo subconjunto de soluções, seleccionadas de maneira probabilística, dando preferência às soluções com melhores valores de aptidão, é repassada aos operadores genéticos, com o fim de criar novas soluções, que formarão parte da nova população. O conjunto de circuitos restantes é descartado. Diz-se que a população teria passado por um processo de evolução.

Este novo conjunto de soluções representará a nova população, que será novamente avaliada pelo simulador externo e continuará o mesmo processo já mencionado, até se atingir a condição de parada para o algoritmo.

Finalmente, a solução com melhor valor de avaliação da função objetivo dentre o conjunto de soluções para a última geração é considerada como a solução ótima, entregue pelo método de otimização como proposta de solução para o problema.

Maior informação sobre a representação utilizada para os circuitos, sobre o filtro de restrições, a geração do banco de dados, e a maneira como foram definidos os operadores genéticos, será mostrada nas seguintes seções.

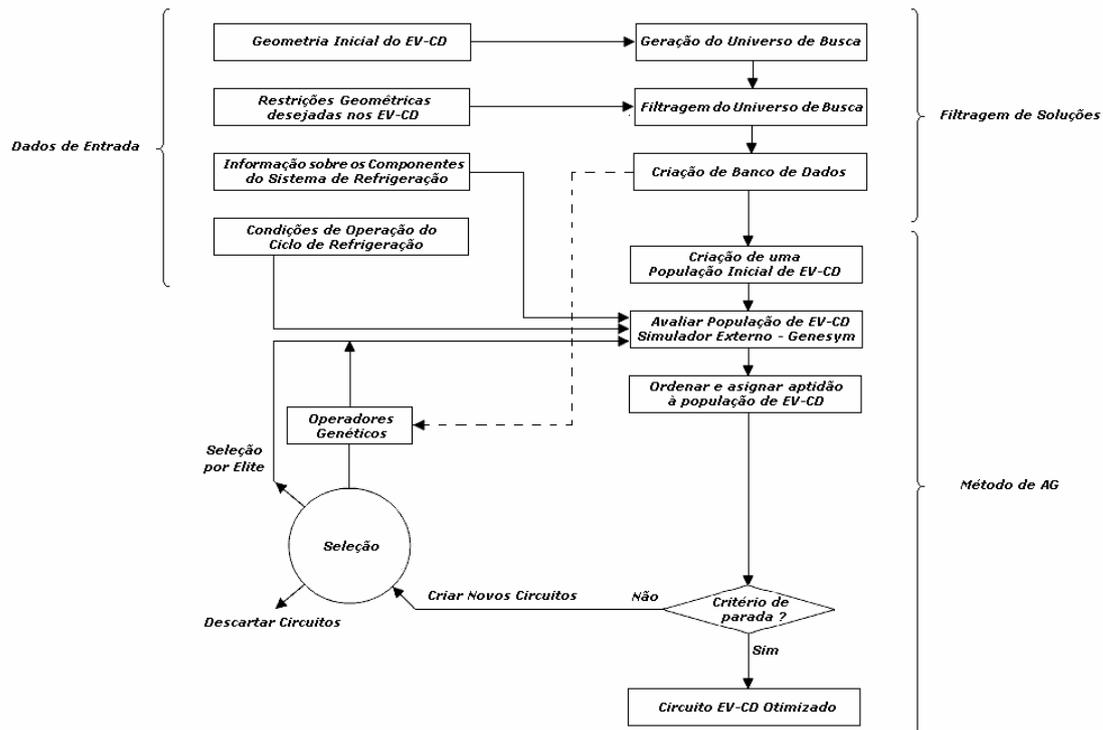


Figura 16. Diagrama de fluxo do processo de otimização – GAFIS.

4.4.2. Representação dos circuitos

A título de exemplo, considere o sistema de condicionamento de ar mostrado na fig.17. Este sistema apresenta dois TCTA's. Os circuitos de refrigerante, que definem o percurso do fluido refrigerante através dos trocadores de calor, podem ser vistos nas fig.18.a e 18.b, para o evaporador e o condensador, respectivamente.

Em cada trocador de calor os tubos são enumerados, de maneira consecutiva, de esquerda para a direita. Considera-se como a primeira de fila de tubos a ser enumerada, a àquela que recebe num primeiro momento o fluxo de ar. Ao fim de cada fila, a enumeração de tubos continua na fila imediata superior, conforme se observa nos circuitos mostrados nas figs.18.a e 18.b.

O circuito para o evaporador, fig.18, é composto por três ramais (cada ramal conformado por uma série de 18 tubos) e o circuito para o condensador, fig.18.b, é composto por 4 ramais (cada ramal conformado por uma série de 9 tubos), no presente exemplo. O conjunto de tubos pertencentes a um mesmo ramal define certa região física, aqui denominada com o nome de “zona”, dentro de cada trocador de calor (ver fig.18.a e 18.b).

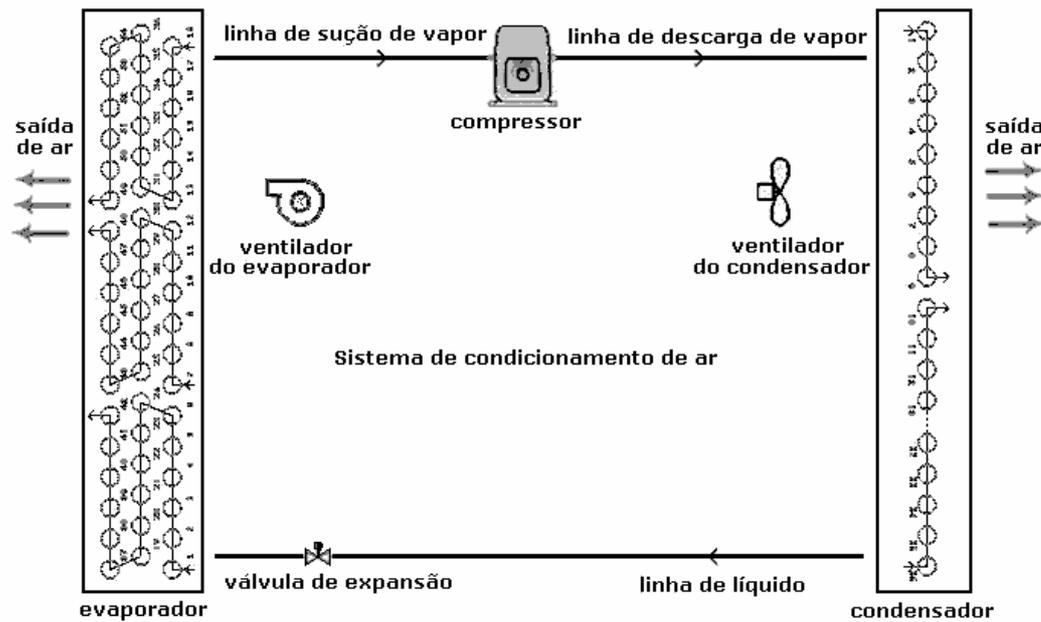


Figura 17. Sistema de condicionamento de ar com trocadores de calor de tipo tubo-aletado.

Para facilitar a manipulação dos circuitos pelo pacote de otimização, precisa-se de uma maneira de codificar a informação de como são conformados os circuitos.

Para compreender a representação clássica utilizada para “codificar” o circuito dos trocadores de calor (Kaufman e Michalski, 2000 e 2004; Domanski e Yashar, 2007a; e Wu et al. 2008), consideremos primeiro a maneira em que são mostrados os tubos que conformam cada ramal para cada zona, conforme se mostra na fig.18.c. A representação clássica, para codificar os circuitos, é dada por um vetor de números inteiros, composto pela sucessão das séries dos índices dos tubos, seguindo a ordem definida para as zonas. Neste caso, se for utilizada esta representação seria necessário de um vetor com 90 números inteiros para representar os dois circuitos, ou seja, 90 variáveis.

No presente trabalho, considera-se a existência de um banco de dados que guarda a informação de todos os possíveis ramais, válidos, que podem ser utilizados para cada zona do trocador de calor. Portanto, propõe-se o uso de um vetor de números inteiros (com um número de elementos igual ao número de zonas dos trocadores de calor) para representar os circuitos. Cada número inteiro indicará a direção física dentro do banco de dados onde esta armazenada a informação específica para reproduzir o ramal desejado, para cada zona. Para

os circuitos mostrados, a nova representação precisará de um vetor de 7 números inteiros, conforme se mostra na fig.18.e. Portanto, tem-se uma redução do número de variáveis de 90 para 7, no presente caso.

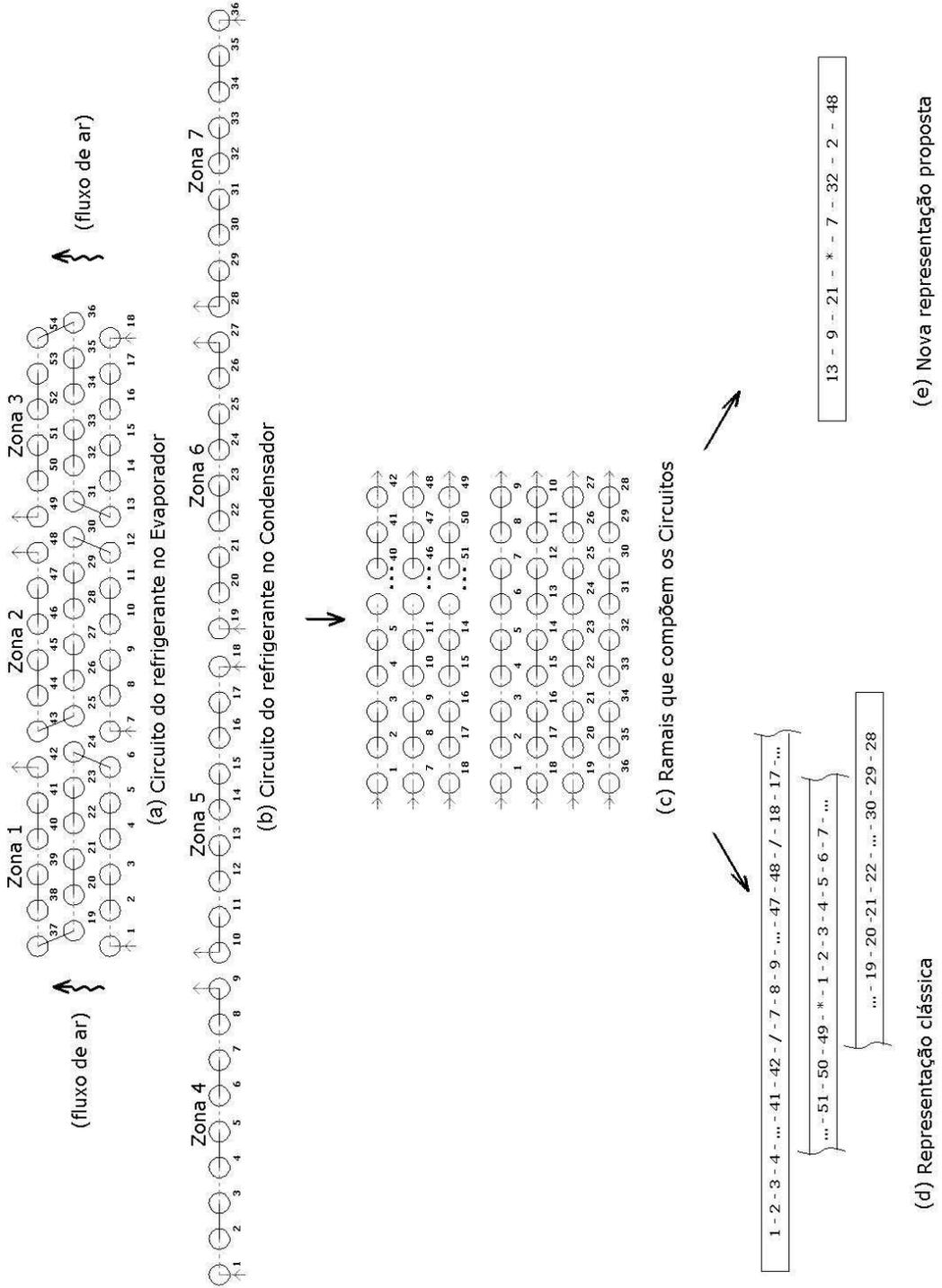


Figura 18. Representação dos circuitos.

4.4.3. Filtro de restrições e Geração do banco de dados

Por meio do uso das restrições que sejam aplicáveis às variáveis do problema, numa etapa prévia ao processo de otimização, é possível reduzir o universo de soluções original (espaço de busca), descartando-se as soluções que não cumpram as ditas restrições.

Para cada zona do trocador reproduz-se o universo de soluções possíveis para os ramais, por meio da combinatória dos valores que podem adotar as variáveis do problema. Para cada zona dos trocadores de calor, os ramais são avaliados por um “filtro de restrições” (elaborado a partir das restrições desejadas). No presente estudo, consideraram-se as restrições mencionadas na seção 4.2.3. Caso um ramal cumpra com todas as restrições impostas, este será armazenado no banco de dados. De maneira similar, informação para os ramais que possam existir nas diferentes zonas serão armazenados no banco de dados. Ramais que não cumpram alguma das restrições desejadas são descartados.

Uma possível solução é composta com um conjunto de propostas de ramais, existentes no banco de dados, para cada zona dos trocadores de calor.

Na fig.19 observa-se o processo de filtragem de soluções que gera o banco de dados com o universo reduzido de soluções desejadas. O referido banco de dados será utilizado posteriormente pelo método de AG.

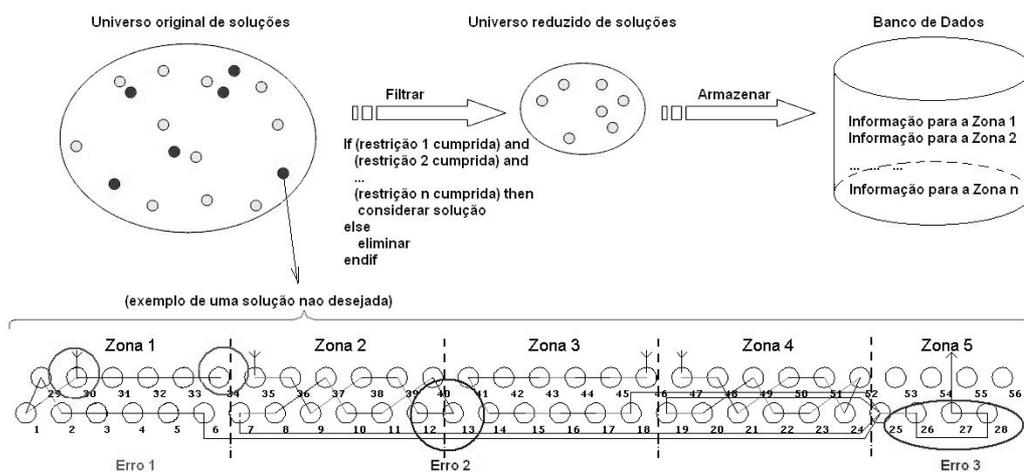


Figura 19. Filtragem de soluções para gerar os bancos de dados.

Tabém pode se observar, fig.19, uma série de situações não desejadas para a conformação dos ramais, tais como: conexões de tubo que não respeitem a sinalização do tubo de entrada (erro 1), o uso de tubos que não pertençam à mesma zona num ramal (erro 2), e o uso de conexões a partir de tubos que não estejam um ao redor do outro num mesmo ramal (erro 3). Certamente estes circuitos serão descartados pelo filtro de restrições.

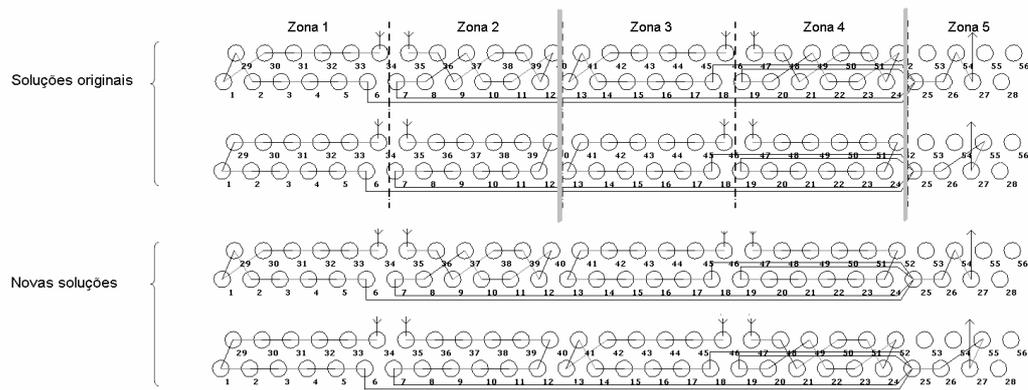
A redução do espaço de busca, utilizando a idéia apresentada, chega a ser considerável, conforme observado em todos os estudos de casos realizados no presente trabalho. Em alguns casos a ordem de redução do espaço de busca, mediante o processo de filtragem, chega a ser em torno de 10^{60} vezes. Certamente, qualquer método de otimização utilizado após uma redução do espaço de busca desta ordem encontrar-se-á consideravelmente favorecido no seu desempenho.

4.4.4. Operadores Genéticos

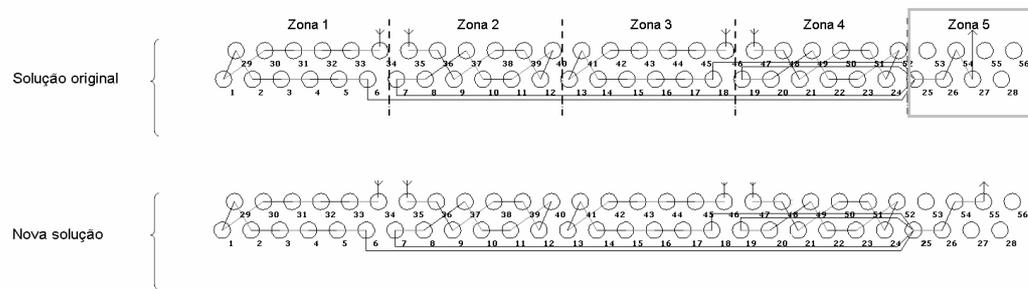
A nova representação proposta para os circuitos dos trocadores de calor permite o uso dos operadores genéticos clássicos para a geração de novas soluções. No método GAFIS foram implementados dois tipos de operadores: (1) operador de cruzamento de dois pontos; e (2) operador de mutação. Os novos circuitos gerados pelos operadores genéticos não precisam de métodos corretivos, pois todos os novos circuitos gerados são circuitos compostos de ramais existentes no banco de dados, os quais cumprem todas as restrições impostas ao problema.

Na fig.20.a mostra-se o efeito de se utilizar o operador de cruzamento sobre os circuitos. Neste caso, observa-se, na fig.20.a, que a nova primeira solução é constituída pelos ramais das zonas 1, 2 e 5 da primeira solução original e pelos ramais das zonas 3 e 4 da segunda solução original. Entretanto, a segunda nova solução é constituída pelos ramais das zonas 1, 2 e 5 da segunda solução original e pelos ramais das zonas 3 e 4 da primeira solução original.

Na fig.20.b mostra-se o efeito de utilizar o operador de mutação, o qual modifica certo segmento da solução por um segmento escolhido de maneira aleatória, existente nos bancos de dados filtrados, neste caso para a zona 5.



(a) Operador de cruzamento



(b) Operador de mutação

Figura 20. Efeito dos operadores genéticos.

4.5. Ajuste dos parâmetros para o método de AG

Devido à natureza estocástica do método de otimização, os valores que sejam atribuídos aos parâmetros internos do método (tamanho da população, número de evoluções, taxa de cruzamento, entre outros) terão, possivelmente, repercussão sobre o desempenho do processo de busca de soluções. Por isto, uma análise estatística a partir dos resultados encontrados em otimizações se utilizando diferentes valores para os parâmetros do método de otimização foi necessária. Baseado nestes resultados, definiram-se valores adequados para os referidos parâmetros. Adotaram-se os dados de uma unidade de condicionamento de ar da Lennox para a realização dos testes mencionados.

Os parâmetros considerados foram: (1) o tamanho da população; (2) o tamanho da elite; (3) o número de evoluções; (4) a probabilidade de mutação; e (5) a probabilidade de cruzamento.

Devido ao fato de o tempo computacional para a avaliação da função objetivo ser elevado (simulação do ciclo completo de refrigeração). Considerou-se, inicialmente, uma população de 30 indivíduos e um número de evoluções igual a 60, por se considerar tais valores adequados, com base na experiência ganha sobre o comportamento do método de otimização com o problema tratado, durante o período de desenvolvimento do pacote numérico de otimização. O valor para a elite, definido de maneira proporcional à população, foi fixado em um valor de 3.

Realizaram-se testes de otimização considerando combinações de probabilidades de mutação de 2, 4 e 5%, e probabilidades de cruzamento de 60, 70 e 80%, conforme mostrado na tabela 3 (testes: V1T1 ao V1T9). Informação adicional sobre o sistema e as condições para cada teste realizado pode ser vista no apêndice C.

Na fig.21.a mostra-se como variou a média do COP, e na fig.21.b como variou a dispersão, do COP, para a população (de soluções) na medida em que esta evolui, nos testes de otimização realizados. Segundo os resultados mostrados, observa-se que, para uma probabilidade de mutação de 4%, são encontradas melhores soluções no final do processo de otimização (fig.21.a), mantendo a dispersão das soluções (fig.21.b), motivo pelo qual valores maiores para a probabilidade de mutação não seriam necessários.

Por outro lado, valores maiores para a probabilidade de cruzamento favorecem a rápida convergência do método, encontrando-se soluções ótimas em períodos menores de tempo. Entretanto, deve-se manter uma dispersão adequada das soluções, para assim propiciar uma adequada exploração do espaço de busca. Na fig.21.b pode-se observar que melhores resultados são encontrados para uma probabilidade de cruzamento igual a 60%.

Na tabela 3 mostra-se, de maneira resumida, os valores máximos, médios e de dispersão do COP na população (COP_{max} , COP_{med} , e $disp_{COP}$) para a evolução 40, 60 e 80, em cada teste realizado.

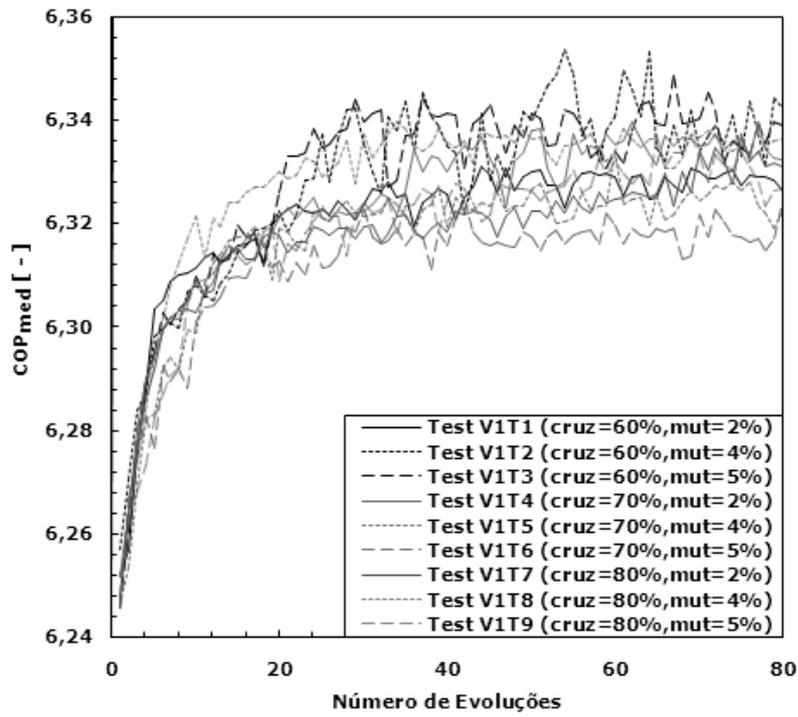


Figura 21.a Evolução do COP médio para a população de soluções.

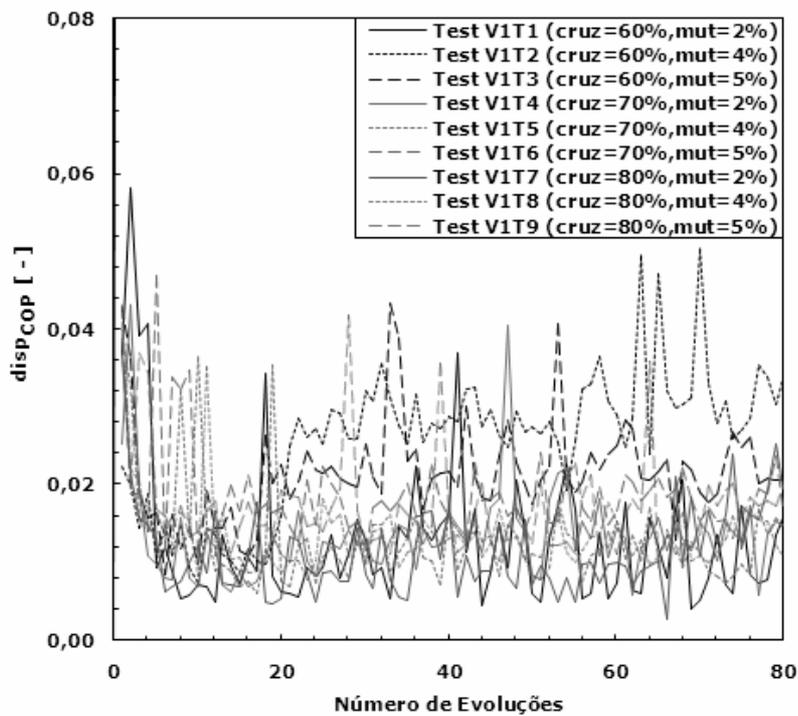


Figura 21.b Evolução da dispersão do COP para a população de soluções.

Tabela 3. Resumo dos testes utilizando diferentes parâmetros de otimização.

Testes	Parâmetros			Evolução 40			Evolução 60			Evolução 80		
	população	crossover	mutação	COP _{max}	COP _{med}	disp _{COP}	COP _{max}	COP _{med}	disp _{COP}	COP _{max}	COP _{med}	disp _{COP}
	[-]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
VIT1	30	60	2	6,3323	6,3257	0,0162	6,3323	6,3289	0,0074	6,3323	6,3264	0,0157
VIT2	30	60	4	6,3588	6,3350	0,0288	6,3658	6,3407	0,0291	6,3699	6,3422	0,0336
VIT3	30	60	5	6,3551	6,3413	0,0217	6,3556	6,3338	0,0251	6,3556	6,3390	0,0207
VIT4	30	70	2	6,3407	6,3299	0,0165	6,3409	6,3353	0,0145	6,3409	6,3324	0,0149
VIT5	30	70	4	6,3311	6,3195	0,0166	6,3443	6,3338	0,0153	6,3330	6,3222	0,0143
VIT6	30	70	5	6,3323	6,3157	0,0157	6,3357	6,3198	0,0167	6,3357	6,3242	0,0168
VIT7	30	80	2	6,3253	6,3184	0,0175	6,3292	6,3245	0,0099	6,3409	6,3310	0,0194
VIT8	30	80	4	6,3443	6,3356	0,0130	6,3443	6,3338	0,0153	6,3443	6,3361	0,0110
VIT9	30	80	5	6,3360	6,3242	0,0165	6,3426	6,3318	0,0110	6,3462	6,3265	0,0199

Baseado nestes resultados, considerou-se que um melhor desempenho para o método seria obtido para uma população de 30 indivíduos, um número de elite de 3, uma probabilidade de mutação de 4%, uma probabilidade de cruzamento de 60%, e um número de evoluções de 80 (tabela 4). Este conjunto de valores, para os parâmetros do método, será mantido constante ao longo de todo o presente trabalho.

Tabela 4. Resumo de valores adequados para os parâmetros do GAFIS.

Parâmetros do Método		
População	30	[indivíduos]
Número de Elite	3	[-]
Probabilidade de Mutação	4	[%]
Probabilidade de Cruzamento	60	[%]
Número de Evoluções	80	[-]

4.6. Validação do método

Para verificar o desempenho do algoritmo desenvolvido, realizar-se-á: (1) uma comparação qualitativa dos resultados com os resultados obtidos por um segundo método de busca, o método de busca aleatória, e (2) testes de repetitividade das soluções para mostrar a convergência do método. Consideraram-se os dados para uma unidade de condicionamento de ar da marca Lennox (unidade utilizada na seção anterior) para a realização dos testes.

4.6.1. Comparação com o método de busca aleatória

Para avaliar o desempenho do método apresentado, uma prática comumente empregada, que serve também para se descartar erros decorrentes da programação, é a de comparar os resultados numéricos e de desempenho com os obtidos pelo método de busca aleatória.

O método de busca aleatória gera, de maneira contínua, soluções aleatórias para serem avaliadas. No entanto, as soluções geradas não guardam nenhuma relação com as soluções prévias. A solução com melhor avaliação sempre é mantida como proposta de solução provida pelo método (ao longo de todo o processo).

No presente caso, deixou-se que o método de busca aleatória utilizasse o banco de dados (com soluções filtradas). Portanto, o método de busca aleatória utilizado possui certa vantagem com respeito a um método de busca estritamente aleatório.

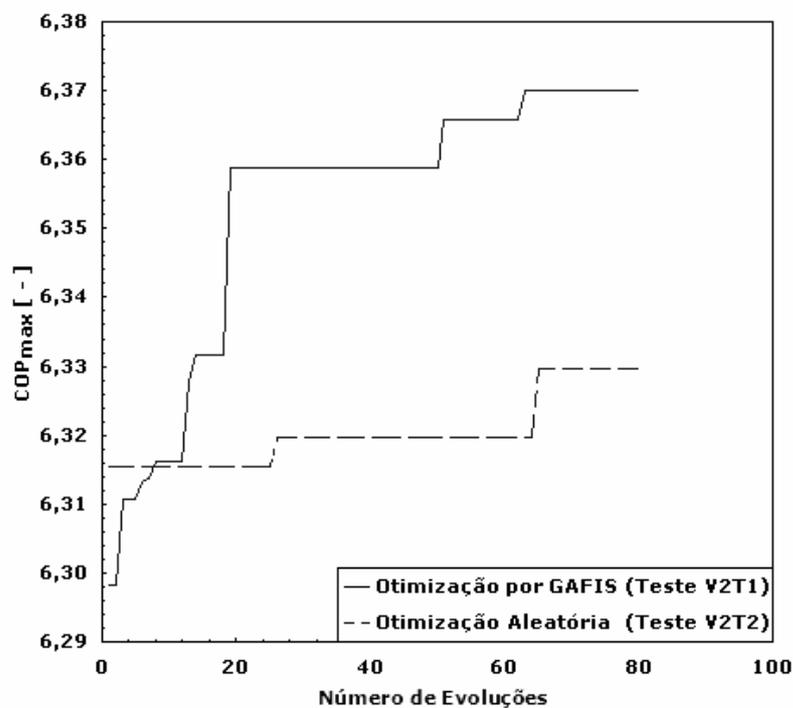


Figura 22. Máximo COP obtido com GAFIS versus o método de busca aleatória.

Na fig.22 mostra-se a evolução para o máximo valor de COP encontrado na população utilizando o método GAFIS (teste V2T1) e utilizando o método de busca aleatória (teste V2T2). Maiores detalhes com respeito às condições dos testes podem ser vistos no Apêndice C. A comparação qualitativa mostra que o método GAFIS foi bem sucedido, conseguindo soluções aceitáveis em um número reduzido de gerações, mostrando uma tendência comportada de convergência.

4.6.2. Qualidade das soluções

Devido à natureza determinística do método apresentado, este não garante que testes de otimização sob as mesmas condições converjam para uma única solução. Entretanto, para verificar que a qualidade das soluções encontradas pelo GAFIS sejam satisfatórias, compararam-se os resultados obtidos para três testes de otimização que consideram dados de entrada idênticos e um mesmo conjunto de valores para os parâmetros internos do método (testes V3T1, V3T2 e V3T3). Maior informação sobre as condições para os testes realizados pode ser vista no Apêndice C.

Na fig.23 observam-se as curvas de evolução para o máximo valor de COP de cada uma das três populações nos testes respectivos (teste V3T1, V3T2 e V3T3). A semelhança de convergência destas curvas indica de que o tamanho de população selecionado propicia uma dispersão aceitável entre as soluções permitindo uma exploração adequada do universo de soluções.

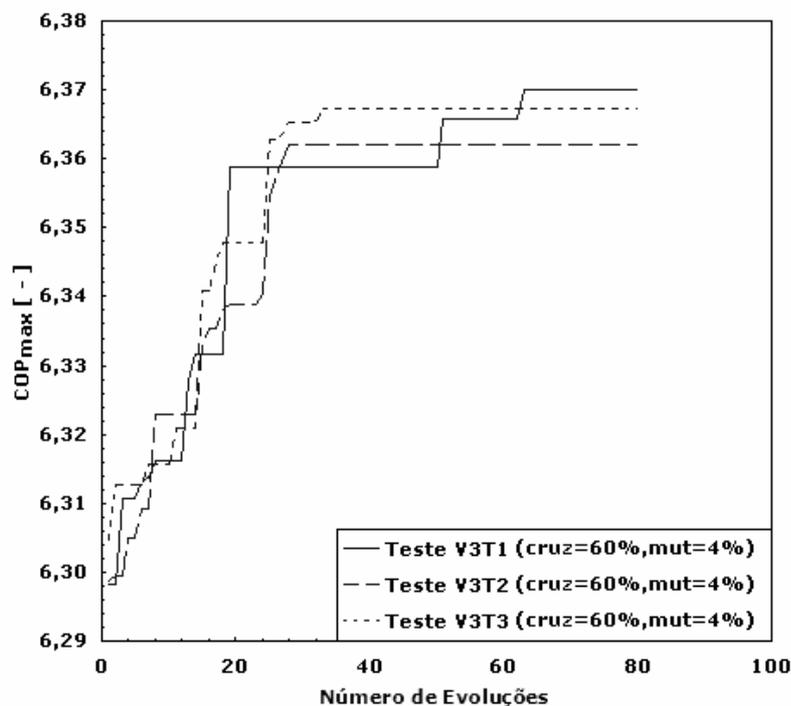


Figura 23. Convergência de soluções pelo GAFIS.

Na tabela 5 são mostrados os valores máximos, médios, e de dispersão para o COP, nos três testes realizados, para as evoluções: 10, 40, 60 e 80. A similaridade entre os resultados não garante que se esteja convergindo para a mesma solução, porém mostra que a qualidade de soluções entregues pelo

programa foi mantida para os diferentes testes. Portanto, conclui-se que o desempenho do GAFIS é razoavelmente satisfatório.

Tabela 5. Resumo de testes utilizando os mesmos parâmetros de otimização.

Testes	Evolução 10			Evolução 40			Evolução 60			Evolução 80		
	COP _{max} [-]	COP _{med} [-]	disp _{COP} [-]	COP _{max} [-]	COP _{med} [-]	disp _{COP} [-]	COP _{max} [-]	COP _{med} [-]	disp _{COP} [-]	COP _{max} [-]	COP _{med} [-]	disp _{COP} [-]
V3T1	6,3161	6,3080	0,0073	6,3588	6,3350	0,0288	6,3658	6,3407	0,0291	6,3699	6,3422	0,0336
V3T2	6,3229	6,3079	0,0088	6,3620	6,3413	0,0232	6,3620	6,3428	0,0211	6,3620	6,3463	0,0245
V3T3	6,3156	6,3114	0,0072	6,3673	6,3607	0,0162	6,3673	6,3639	0,0074	6,3673	6,3614	0,0157