

Universidade Federal de Juiz de Fora
Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado em Engenharia Elétrica

ISABELA MIRANDA DE MENDONÇA

**PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR
ENXAME DE PARTÍCULAS**

Juiz de Fora

2012

ISABELA MIRANDA DE MENDONÇA

**PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR
ENXAME DE PARTÍCULAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica: Área de Concentração em Sistemas de Energia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc.

Co-orientador: Prof. André Luís Marques Marcato, D.Sc.

Juiz de Fora

2012

Mendonça, Isabela Miranda de.

Planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica utilizando otimização por enxame de partículas / Isabela Miranda de Mendonça. – 2012.

110 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

1.Transmissão de energia elétrica. 2.Otimização combinatória. I. Título.

CDU 621.315

ISABELA MIRANDA DE MENDONÇA

**PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR
ENXAME DE PARTÍCULAS**

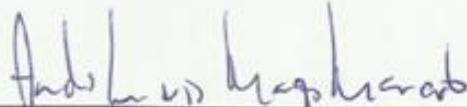
Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 2 de agosto de 2012.




Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF



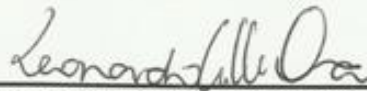
Prof. André Luís Marques Marcato, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF



Prof. Edmarcio Antônio Belati, D.Sc.

Universidade Federal do ABC, UFABC



Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF



Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

*Dedico este trabalho à minha
família e amigos, fonte de carinho
e motivação.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida e me permitir realizar este trabalho.

Agradeço em especial aos meus pais e irmãos, por me apoiarem em todos esses anos de minha formação, pela força e carinho. Agradeço também ao Israel por ter paciência, carinho, amor e por acreditar em mim nos momentos mais difíceis. Ao meu pai, que estará em minhas melhores lembranças para sempre.

A todos os professores que foram de fundamental importância para a minha construção profissional. Em especial aos meus orientadores Ivo Chaves da Silva Junior e André Luís Marques Marcato, pelas horas dedicadas ao auxílio e orientação para a realização deste estudo, pela amizade e pelo crédito depositado em mim.

Aos meus amigos e colegas que sempre estiveram ao meu lado e que de alguma forma contribuíram para que eu conquistasse esta etapa fundamental em minha vida, principalmente aos colegas do LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica) pela convivência e apoio.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, à Faculdade de Engenharia, a CAPES e ao PPEE pelo apoio financeiro.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Disciplina é a ponte que liga os nossos sonhos às nossas realizações.

Pat Tillman

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo a realização do planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica via otimização por Enxame de Partículas (EP). A metodologia proposta faz uso de um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) que tem a finalidade de pré-selecionar as linhas candidatas à expansão mais relevantes, de modo a reduzir o espaço de busca e consequentemente, aumentar a eficiência do processo de otimização bioinspirado. Desta forma, a metodologia proposta pode ser dividida em duas etapas: (i) Obtenção do conjunto reduzido de rotas através do AHC, com o objetivo de identificar os caminhos relevantes à expansão e, assim, diminuir o espaço de busca; (ii) Utilização da otimização por enxame de partículas e das informações heurísticas advindas da primeira etapa, com o objetivo de encontrar o custo mínimo de expansão através de um número reduzidos de partículas. Em ambas as etapas a rede de transmissão é representada pelo modelo linearizado de fluxo de carga, onde as decisões de expansão são incorporadas ao problema através das equações originais do modelo CC. O critério de seleção da expansão é realizado através de heurística, de modo a evitar a explosão combinatória referente às alternativas de investimento. A metodologia proposta é aplicada ao sistema Garver e a dois sistemas reais equivalentes a região Sul e Sudeste do Brasil.

PALAVRAS CHAVE: Expansão da Transmissão, Heurísticas, Enxame de Partículas, Otimização Combinatória.

ABSTRACT

This dissertation aims at the realization of the static transmission network expansion planning (STNEP) of electric power systems using the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The proposed methodology uses a Constructive Heuristic Algorithm (CHA) in order to pre-select the most relevant candidates lines for expansion, so as to reduce the search space and thereby increasing efficiency of the bioinspired optimization process. Thus, the proposed methodology can be divided into two steps: (i) Obtaining the reduced set of routes through the CHA, in order to identify relevant routes for expansion and thus reduce the search space; (ii) Using the Particle Swarm Optimization and heuristic information provided by the first stage, in order to find the minimum expansion cost using a reduced number of particles. In both stages the transmission network is represented by a linearized load flow model, where the expansion decisions are incorporated into the optimization problem using the original equations of the model DC. The selection of expansion criterion is done through heuristic in order to avoid combinatorial explosion associated with expansion alternatives. The proposed methodology is applied to the Garver system and two real equivalent South and Southeastern Brazilian systems.

KEYWORDS: Transmission Network Expansion, Heuristics, Particle Swarm Optimization, Combinatorial Optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- ATUALIZAÇÃO DA PARTÍCULA.....	27
FIGURA 2.2- PROCESSO DE BUSCA.....	29
FIGURA 2.3- REPRESENTAÇÃO DA PARTÍCULA.	30
FIGURA 3.1- FLUXOGRAMA DO ALGORITMO HEURÍSTICO - AHC.	41
FIGURA 3.2- FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.	43
FIGURA 3.3- SISTEMA TESTE.	44
FIGURA 3.4- SOLUÇÃO DO 1ª PLANO.....	47
FIGURA 3.5- SOLUÇÃO DO 2ª PLANO.....	48
FIGURA 3.6- PLANOS GERADOS.	49
FIGURA 3.7- SOLUÇÃO FINAL VIA ENXAME DE PARTÍCULAS.	50
FIGURA 3.8- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS.	51
FIGURA 4.1- CONFIGURAÇÃO FINAL PARA O SISTEMA DE GARVER COM REDESPACHO.....	55
FIGURA 4.2- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA DE GARVER COM REDESPACHO.	55
FIGURA 4.3- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA DE GARVER COM REDESPACHO.	56
FIGURA 4.4- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA DE GARVER SEM REDESPACHO.	59
FIGURA 4.5- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA DE GARVER SEM REDESPACHO.	60
FIGURA 4.6- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA DE GARVER SEM REDESPACHO.	61
FIGURA 4.7- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUL COM REDESPACHO. ...	63
FIGURA 4.8 EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUL COM REDESPACHO.	64
FIGURA 4.9- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUL COM REDESPACHO.....	65
FIGURA 4.10- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO... ..	67
FIGURA 4.11- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO... ..	69
FIGURA 4.12- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO... ..	70
FIGURA 4.13- SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL.	71

FIGURA 4.14- SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA.....	72
FIGURA 4.15- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUDESTE SEM REDESPACHO.	74
FIGURA 4.16- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUDESTE SEM REDESPACHO.	75
FIGURA 4.17- EVOLUÇÃO DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS NO SISTEMA SUDESTE SEM REDESPACHO.	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1- DADOS DE BARRA E GERAÇÃO: SISTEMA TESTE	44
TABELA 3.2- DADOS DOS CIRCUITOS EXISTENTES: SISTEMA TESTE	45
TABELA 3.3- DADOS DO CIRCUITO FICTÍCIO: SISTEMA TESTE	45
TABELA 3.4- DADOS DOS CIRCUITOS CANDIDATOS: SISTEMA TESTE.....	45
TABELA 3.5- VALORES INICIAIS ALEATÓRIOS DE PE	46
TABELA 3.6- RESULTADO DA ETAPA DISCRETA - PE(FINAL)	46
TABELA 3.7- VALORES INICIAIS ALEATÓRIOS DE PE	47
TABELA 3.8- RESULTADO DA ETAPA DISCRETA - PE(FINAL)	48
TABELA 3.9- CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS - SIMULAÇÕES DO AHC.....	49
TABELA 3.10- RESULTADO DOS CIRCUITOS SELECIONADOS PELO ENXAME DE PARTÍCULAS	50
TABELA 4.1- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA DE GARVER COM REDESPACHO	54
TABELA 4.2- ROTAS PROPOSTAS PELO AHC	56
TABELA 4.3- COMPARAÇÃO CUSTO DE INVESTIMENTO PARA O SISTEMA GARVER	58
TABELA 4.4- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA DE GARVER SEM REDESPACHO	59
TABELA 4.5- ROTAS PROPOSTAS PELO AHC	60
TABELA 4.6- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUL COM REDESPACHO	63
TABELA 4.7- ROTAS PROPOSTAS PELO AHC	64
TABELA 4.8- COMPARAÇÃO ENTRE OS CUSTOS DE INVESTIMENTO: SISTEMA SUL COM REDESPACHO	66
TABELA 4.9- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUL SEM REDESPACHO.....	67
TABELA 4.10- ROTAS PROPOSTAS PELO AHC	68
TABELA 4.11- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA DE SUL SEM REDESPACHO	68
TABELA 4.12- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUDESTE SEM REDESPACHO.....	73
TABELA 4.13- ROTAS PROPOSTAS PELO AHC	74
TABELA 4.14- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUDESTE SEM REDESPACHO	75
TABELA 4.15- PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUDESTE SEM REDESPACHO	76
TABELA 4.16- COMPARAÇÃO ENTRE OS CUSTOS DE INVESTIMENTOS: SISTEMA SUDESTE EQUIVALENTE	77
TABELA 4.17- MÉDIA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS PARA O SISTEMA SUDESTE	78
TABELA 4.18- COMPARAÇÃO PARA AS ANÁLISES FEITAS PARA O SISTEMA SUL E SUDESTE	80

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
1.3 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA PESQUISA.....	24
2 ENXAME DE PARTÍCULAS (EP).....	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	25
2.2 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM ENXAME DE PARTÍCULAS	25
2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM ENXAME DE PARTÍCULAS PARA A RESOLUÇÃO DA EXPANSÃO ESTÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
2.3.1 Representação da Partícula.....	30
2.3.2 Inicialização do Enxame	30
2.3.3 Avaliação da Partícula	31
2.3.4 Deslocamento e Velocidade	31
2.3.5 Critério de Convergência	32
2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	33
3 METODOLOGIA PROPOSTA	34
3.1 INTRODUÇÃO.....	34

3.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	34
3.2.1	Função Objetivo (FOB)	37
3.2.2	Restrições de Balanço de Potência Ativa.....	37
3.2.3	Restrições de Canalização de Fluxo de Potência Ativa	38
3.2.4	Restrições de Canalização de Geração Potência Ativa.....	38
3.2.5	Restrições de Fluxo de Potência Ativa	38
3.2.6	Restrições de Conexidade	39
3.2.7	Restrições do Parâmetro de Expansão (PE).....	39
3.3	ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO UTILIZADO.....	40
3.4	ALGORITMO PROPOSTO.....	41
3.5	SISTEMA TUTORIAL.....	43
3.6	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	51
4	ESTUDO DE CASOS.....	53
4.1	INTRODUÇÃO.....	53
4.2	SISTEMA GARVER	53
4.3	SISTEMA SUL EQUIVALENTE.....	62
4.4	SISTEMA SUDESTE EQUIVALENTE	71
4.5	ASPECTOS COMPUTACIONAIS.....	79
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	79
5	CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	81
5.1	CONCLUSÕES FINAIS.....	81
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	82
	APÊNDICE A.....	83
	APÊNDICE B.....	97
	BIBLIOGRAFIA	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema elétrico brasileiro apresenta características peculiares como: possui a geração de energia elétrica basicamente hidroelétrica, devido ao grande potencial das bacias hidráulicas, enquanto que a geração da grande maioria dos demais países tem como base a geração termoelétrica. Além disso, o país apresenta: rápido crescimento da demanda, cerca de 5% por ano, grande dimensão territorial e elevada distância existente entre as usinas hidroelétricas de grande porte e os centros consumidores, exigindo assim o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias, requerendo por isto adequada interligação do sistema. Portanto as características mencionadas contribuem para que o problema de planejamento do sistema elétrico, de um modo geral, se torne uma tarefa complexa, tendo como objetivo garantir o suprimento dos consumidores com o menor custo possível. Logo, os agentes devem decidir individualmente quando (visão dinâmica) e onde (visão estática) investir de maneira ótima os recursos financeiros disponíveis e garantir o funcionamento confiável e adequado do sistema elétrico de potência (SEP). No entanto estas decisões estão associadas à seleção das unidades geradoras e das melhores rotas de transmissão e distribuição de energia. Por conseguinte, estratégias devem ser desenvolvidas de modo a garantir que as decisões adotadas durante o processo de planejamento sejam ótimas ou estejam, economicamente, bem próximo. De acordo com as premissas mencionadas, o planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica dá origem a um problema de otimização complexo e de grande porte [1].

Significativos avanços foram obtidos nas últimas décadas no marco legal e regulatório do sistema, denominado novo modelo do sistema elétrico nacional, mas ainda existem problemas, dentre os quais se destaca o planejamento da expansão dos sistemas de transmissão de energia.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 55% das linhas de transmissão estavam atrasadas em 2011 [2].

Problemas semelhantes acontecerão com as hidroelétricas do rio Madeira, as usinas de Jirau e Santo Antônio. A primeira linha deveria entrar em operação em fevereiro de 2012, porém com os atrasos, isso provavelmente não ocorrerá antes de setembro de 2012. Os empreendedores das usinas pretendiam antecipar o início de suas operações para o primeiro semestre de 2012, mas não poderão devido aos atrasos na construção das linhas que estão sob responsabilidade de outras empresas [3].

O prejuízo é triplo, pois perdem os consumidores atuais, forçados a pagar em suas contas de energia, a energia gerada por usinas mais caras, que poderiam ser substituídas por usinas mais baratas. Perdem os empreendedores atuais, que não conseguem transmitir a energia de suas usinas já prontas. E perdem os empreendedores e consumidores futuros, pois as novas usinas e linhas de transmissão que serão leiloadas incorporarão riscos maiores com base neste histórico de atrasos. Portanto, o planejamento das linhas de transmissão de energia precisa ser antecipado, sendo um planejamento de longo prazo (20 anos), e de fundamental importância para o funcionamento satisfatório do SEP.

O problema do planejamento estático da expansão do sistema de transmissão consiste em determinar, entre um conjunto pré-definido de circuitos candidatos à expansão, aqueles que devem ser construídos de forma a minimizar os custos de operação (déficit) e de investimento no sistema elétrico, suprindo a demanda prevista para um horizonte de planejamento [4]. Este é um problema de otimização de difícil solução e que apresenta algumas particularidades: (i) região de solução não convexa, ou seja, várias soluções, o que leva grande parte dos algoritmos a convergirem em direção de uma solução ótima local; (ii) a natureza combinatória do processo de planejamento que normalmente conduz ao fenômeno da explosão combinatorial referente às alternativas de investimento, resultando em um elevado esforço computacional; (iii) a existência de sistemas elétricos não conexos (ilhados); (iv) problema de programação não linear inteira mista (PNLIM), sendo assim de árdua resolução. Estas particularidades ilustram as principais dificuldades na elaboração de algoritmos rápidos, eficientes e robustos para a resolução do problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Na literatura podem-se distinguir três grandes grupos de algoritmos empregados na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão:

- Algoritmos Heurísticos Construtivos: São robustos e apresentam pouco esforço computacional, porém raramente encontram a solução ótima global, principalmente em relação a sistemas reais e/ou de grande porte [5], [6], [7], [8] e [9];
- Algoritmos de Otimização Clássica: Usam técnicas de decomposição matemática e geralmente encontram soluções ótimas globais de sistemas de pequeno e médio porte. Para sistemas de maior porte estes algoritmos ainda podem apresentar problemas de esforço computacional e, em alguns casos, de convergência [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16] e [17];
- Metaheurísticas: Encontram soluções ótimas ou subótimas mesmo de sistemas de maior porte, mas com esforço computacional e até proibitivo em alguns casos [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28] e [29];

Inúmeras características, propriedades e resultados de heurísticas construtivas apresentam grande utilidade no desenvolvimento de algoritmos mais complexos. Portanto, este trabalho propõe a utilização de um algoritmo heurístico construtivo com finalidade de encontrar um conjunto reduzido de rotas relevantes à expansão, sendo este fornecido a um algoritmo desenvolvido com base na metaheurística *Particle Swarm Optimization* (PSO), também denominada Enxame de Partículas (EP), o qual executa o planejamento final dos sistemas de transmissão de energia elétrica.

O problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão teve grande destaque a partir da década de 70, com o advento da informática e a necessidade de atender o crescimento excessivo da demanda de energia elétrica, logo se tem um elevado número de pesquisas na área e novos algoritmos que solucionem o problema de planejamento.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há muitos anos, o fluxo de potência é utilizado como ferramenta para solucionar o problema de planejamento da expansão da transmissão.

Os modelos estáticos de planejamento visam determinar os reforços e quais locais os mesmos deverão ser instalados de forma a minimizar o custo total de investimento no sistema elétrico e a atendê-lo com qualidade e confiabilidade.

Os primeiros trabalhos validados e publicados para o planejamento da expansão dos sistemas de transmissão datam de 1970 [5], Garver [5] formulou o problema com um fluxo de potência utilizando um algoritmo de programação linear para encontrar as rotas de expansão e representou a rede através do modelo de transportes. Este modelo satisfaz somente a primeira lei de Kirchhoff, portanto trata-se de um modelo relaxado. A grande vantagem do modelo de transportes é que praticamente não existe diferença entre resolver problemas de sistemas conexos e altamente ilhados, esta característica se deve ao fato da solução deste modelo não depender das reatâncias dos circuitos, e como desvantagem a solução encontrada por ele pode ser menos adequada para o problema real.

Em [6] foi proposto o uso de métodos iterativos para o planejamento da transmissão, um algoritmo heurístico construtivo que usa o modelo CC, denominado algoritmo de mínimo esforço. As rotas candidatas à expansão eram ordenadas através de um índice de “Mínimo Esforço”, que apresenta uma análise da sensibilidade com relação às susceptâncias dos circuitos na indicação dos caminhos de investimento na transmissão.

Posteriormente foi apresentada por Villanasa et al [7] em 1985 uma modelagem que representa duas redes elétricas sobrepostas com a finalidade de resolver o planejamento da expansão dos sistemas de transmissão, combinando o modelo CC e o modelo de transportes. Enquanto o modelo linearizado calcula o fluxo de potência nos circuitos existentes, o modelo de transportes corresponde aos circuitos artificiais ou fictícios. Foi feita estimação dos fluxos de potência ativa na rede fictícia sendo esta a maior contribuição deste trabalho, eliminando-se a dificuldade dos sistemas ilhados.

No mesmo ano, em [8], Pereira e Pinto propuseram um algoritmo heurístico construtivo denominado algoritmo de "Mínimo Corte de Carga", o qual permitia observar o circuito que uma vez adicionado ao sistema produzia minimização do corte de carga, fazendo uso de geradores artificiais para contornar os problemas de operação do sistema.

A necessidade de se obter soluções de boa qualidade para sistemas cada vez mais complexos e sobrecarregados fez com que a utilização de métodos de busca mais elaborados, denominados metaheurísticas, se intensificasse. Esta característica advinda da facilidade de se trabalhar com problemas não convexos e tratar incertezas contribuíram para o emprego desta técnica na solução do planejamento da expansão da transmissão dos sistemas de energia elétrica.

Portanto, teve início o uso das técnicas metaheurísticas, com o trabalho de Romero, Gallego e Monticelli, em [24], que propuseram uma aproximação para o planejamento da expansão da transmissão baseado na técnica de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*). O método mostrou-se eficiente em sistemas de pequeno porte cujas soluções ótimas eram conhecidas e promissor no sistema de grande porte, obtendo soluções interessantes com custos inferiores às soluções anteriormente conhecidas. Posteriormente paralelizado [30], esta estratégia influenciou nas propriedades de convergência do recozimento simulado sequencial e permitiu obter soluções em um tempo computacional consideravelmente menor.

Cortes-Carmona et al [23], utiliza a mesma técnica anterior, recozimento simulado, para resolver o problema de planejamento da transmissão. É desenvolvido um algoritmo híbrido onde é feito busca local de baixo custo que refina a solução encontrada em cada nível de temperatura e permite a redução do tempo de processamento. A metodologia encontrou bons resultados em baixo tempo de processamento, e permitindo melhoria no desempenho do método.

A Busca Tabu (*Tabu Search*) é outra técnica utilizada para tratar o problema de planejamento da expansão da transmissão, em [31] é proposto um algoritmo de Busca Tabu Paralelo, que combina características de outros métodos como Recozimento Simulado, Algoritmo Genético e Busca Heurística. Nos casos simulados, foi considerada a possibilidade de conexão de novas unidades geradoras e cargas, tornando o problema mais complexo e de

difícil solução devido ao caráter combinatorial. Outros trabalhos que utilizam a Busca Tabu são [28] através dos resultados concluiu-se que a técnica é promissora e robusta ao ser aplicada no problema de planejamento da expansão da transmissão, e em [20] juntamente com outras heurísticas como o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), sendo este empregado para fazer a busca das soluções iniciais. Considerado um algoritmo inteligente, pois fez uso de conhecimentos já adquiridos durante a exploração do espaço de soluções para escapar dos pontos de mínimo local durante a trajetória de busca da solução.

Em [32] foi empregada uma metodologia híbrida entre *Parallel Tabu Search* (PTS) e um algoritmo de otimização, *Ordinal Optimization*, que minimizava a quantidade de candidatos à solução em um caminho provável, reduzindo assim os efeitos de explosão combinatoria e acelerando notavelmente o tempo computacional. O PTS mostrou-se mais eficiente que a Busca Tabu, pois utilizou-se de uma dupla de estratégias: subdivisão de vizinhanças e múltiplos parâmetros.

A metaheurística mais difundida na área de sistemas elétricos de potência é o algoritmo genético (*Genetic Algorithm*).

Em [33] o Algoritmo Genético (AG) foi empregado para o problema do planejamento da expansão de redes de transmissão multizonas. A função objetivo pretendia reduzir os custos de investimento das linhas de transmissão e das perdas das novas linhas a serem construídas. As linhas eram instaladas no sistema e aplicava-se o fluxo de potência ótimo para testar as melhores rotas e obter os melhores resultados para as perdas.

Já em [26] foi utilizada a mesma metaheurística anterior, entretanto foram empregadas modificações para se obter uma melhoria na fase de geração de descendentes, na população inicial e um aumento na diversidade de controle. A melhoria local de um indivíduo foi proposta pela utilização do *Constructive Heuristic Algorithm*- CHA, que adicionava as linhas em ordem decrescente de custos para que pudessem ser eliminadas as soluções que tornariam o custo de expansão elevado. Outro algoritmo genético aprimorado aplicado à síntese de redes foi proposto por Silva et al em [34] e [9] novamente foram obtidos resultados satisfatórios.

Em [35], destacou-se a utilização do algoritmo Colônia de Formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*) para a resolução do problema de planejamento. O ACO trata-se de uma

metaheurística robusta para problemas natureza combinatória. O método baseou-se no comportamento coletivo das formigas na busca por alimento. Por ser um inseto cego as formigas procuram pelo menor caminho de busca de seu ninho até o alimento e se comunicam através de feromônio. A maior probabilidade de escolha do caminho é onde há maior quantidade da substância. A analogia feita com as formigas dizia respeito à obtenção da melhor orientação no espaço de buscas, explorando as melhores regiões do espaço a fim de encontrar uma boa solução para o problema.

Em [18] utilizou-se a técnica ACO citada anteriormente, para resolver o problema de planejamento de expansão da rede. Os resultados obtidos foram comparados com os métodos das abordagens convencionais, como algoritmo genético e busca tabu. Os resultados mostram que o método supera outros em termos de características de convergência e eficiência computacional.

A técnica GRASP também é aplicada ao planejamento da expansão da transmissão. Binato et al [25], propuseram um modelo dividido em duas fases. Na primeira fase, o algoritmo é responsável por determinar uma solução factível para o problema. Já na segunda é realizado um processo de busca local de forma a aprimorar as soluções. A melhor solução obtida por todas as iterações é considerada como o resultado do problema.

Em [36] é proposto um algoritmo heurístico construtivo com fluxo de potência ótimo modelado através da metodologia de pontos interiores (MPI) para determinar as estratégias de expansão do sistema. Em sua formulação, as decisões de expansão (0 ou 1) são mitigadas através da função sigmóide e adicionadas ao fluxo de potência ótimo. As decisões de investimentos são tomadas tendo por base heurística e índices de sensibilidade, sendo a rede modelada pelo fluxo linearizado.

A aplicação da lógica *Fuzzy* é dedicada ao tratamento de incertezas, em [37] utilizou-se esta técnica para tratar incertezas do planejamento da transmissão, como exemplo, a previsão de carga. A estratégia de expansão é obtida por um método *Branch and Bound Fuzzy* e se mostrou eficiente na aplicação em sistemas reais.

Em [38] foi proposto utilização de programação linear, utilizando o modelo CC e a técnica de Enxame de Partículas, que consiste em um algoritmo de busca, que procurava

dentro de uma população de partículas (soluções), a solução ótima do problema. O Enxame foi inicializado com um conjunto de possíveis soluções aleatórias. A técnica apresentou soluções de boa qualidade, convergência estável e baixo esforço computacional.

Verma et al [21] propôs o uso da técnica enxame de partículas, com adaptações. Estas adaptações são feitas, a fim de aumentar a capacidade de busca, o algoritmo foi redefinido de maneira que o movimento do enxame foi controlado pela função objetivo. Obtiveram-se bons resultados mostrando ser o enxame de partículas uma ferramenta de grande potencial.

Em [39] apresenta-se o uso de uma metaheurística denominada *Shuffled Frog Leaping* (SFL), mais conhecida como pulo do sapo, baseada em uma pesquisa cooperativa que começa com uma população virtual de sapos, simulando pulo em um pântano, procurando um lugar com o máximo de alimento disponível. A população inicial foi gerada aleatoriamente, a técnica apresentou ótima convergência e os resultados foram comparados com os obtidos utilizando Enxame de Partículas e Algoritmo Genético para validar o método. A técnica SFL se mostrou muito eficiente, com convergência rápida e assegurando que o sistema elétrico atende a demanda prevista de forma mais econômica e confiável.

Apresentaram-se diversos métodos encontrados na literatura especializada para a solução do problema de planejamento da expansão dos sistemas de transmissão. Foi observado que os trabalhos iniciaram com a utilização dos métodos matemáticos de otimização, os quais permitem obter soluções de boa qualidade, porém com elevado tempo computacional. De modo a aprimorar a convergência dos algoritmos, as técnicas metaheurísticas foram empregadas, pois apresentam a característica de trabalhar com problemas não convexos e de encontrar boas soluções, ainda que não garantam a solução ótima global. Os métodos heurísticos construtivos são alternativas para a solução do problema, possuem baixo tempo computacional e desta forma são viáveis ao se trabalhar com sistemas de grande porte.

1.3 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Como a região de solução do presente problema é não convexa, existem inúmeras combinações de rotas de expansão que garantem o atendimento a demanda. Desta forma, optou-se por fazer uso de um algoritmo heurístico construtivo, sendo o mesmo simulado partindo de pontos iniciais diferentes. Assim, é possível obter um conjunto reduzido de rotas candidatas à expansão. A obtenção de um conjunto reduzido de rotas de expansão é bastante importante, pois para metodologias baseadas em processos de busca, como é o caso do Enxame de Partículas, este conjunto pode permitir conciliar rapidez e eficiência na resolução do problema referente ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo, esta dissertação contém mais quatro capítulos e dois apêndices.

O capítulo II apresenta os principais conceitos referentes à técnica de otimização bioinspirada enxame de partículas, EP.

No capítulo III são descritas a formulação, a modelagem e a metodologia proposta para a resolução do problema referente à expansão estática de sistemas de transmissão. Além disso, também será apresentado um sistema tutorial com o objetivo de ilustrar a metodologia proposta.

No capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta em sistemas utilizados na literatura. Para tanto, será utilizado um sistema acadêmico e dois sistemas reais envolvendo as malhas equivalentes da região sul e sudeste do Brasil. As análises visam validar o método proposto e realizar um estudo comparativo entre as soluções obtidas pela metodologia e as encontradas na literatura.

No capítulo V são apresentadas as principais conclusões referentes à metodologia proposta, bem como sugestões de trabalhos futuros, tendo em vista os desenvolvimentos realizados nesta dissertação.

O Apêndice A exibe os dados dos sistemas elétricos simulados nesta dissertação.

O Apêndice B apresenta os principais aspectos da metodologia primal-dual de pontos interiores.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA PESQUISA

Em decorrência da presente pesquisa foram produzidos os seguintes trabalhos:

- “Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Otimização por Enxame de Partículas”, *XLIII SBPO, Simpósio de Pesquisa Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Ubatuba, São Paulo, Agosto de 2011. Autores: Mendonça, I. M.; Silva Junior, I. C.; Moreira, T. G. ; Marcato, A. L. M. ; Dias, B. H. ; Oliveira, E. J.
- “Utilização da Otimização por Enxame de Partículas e Informações Heurísticas no Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica”, *IX Congresso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica*, Mar Del Plata, Argentina, Novembro de 2011. Autores: Mendonça, I. M.; Silva Junior, I. C.; Marcato, A. L. M.; Dias, B. H.; Oliveira, E. J; Poubel, B. R.

Artigo submetido à SBA.

- “Determinação de Rotas de Expansão para Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Heurística Construtiva”, submetido à *Revista Sociedade Brasileira de Automática*, Julho, 2012. Autores: Mendonça, I. M.; Silva Junior, I. C.; Marcato, A. L. M.

2 ENXAME DE PARTÍCULAS (EP)

2.1 INTRODUÇÃO

A técnica de otimização bioinspirada “*Particle Swarm Optimization (PSO)*”, conhecida como Enxame de Partículas (EP), teve início nos anos noventa com James Kennedy e Russell Eberhart [40], sendo inspirada no comportamento social de determinadas espécies, tais como, aves, peixes. Esta metodologia foi baseada no estudo feito pelo biólogo Frank Heppner [41], onde foi modelado o comportamento social das aves na busca de alimento. Nesse modelo, as aves inicialmente estão distribuídas aleatoriamente em um determinado espaço, onde começam a busca pelo alimento e por um local para construir o ninho.

Inicialmente tomando como exemplo os pássaros, denominados de partículas, voam sem orientação prévia e têm a característica de se aglomerarem, já que vivem em sociedade. Quando um determinado pássaro encontrar o alimento ou o local para o ninho, as chances dos outros pássaros encontrarem esse mesmo local aumentam consideravelmente, uma vez que as demais partículas são atraídas pelo pássaro que obteve sucesso. Este comportamento é baseado na inteligência coletiva ou social. O comportamento descrito acima é base do processo de otimização descrito a seguir.

2.2 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM ENXAME DE PARTÍCULAS

No processo de otimização EP, cada solução do problema corresponde a um ponto no interior da região de solução. Essas soluções são denominadas de partículas e têm associados: (i) um valor, que é avaliado individualmente para cada partícula e que indica a adequação da partícula como solução para o problema; (ii) uma velocidade que define a direção do movimento da partícula. Cada partícula vai atualizando sua velocidade, levando em conta a

melhor posição da partícula e a melhor posição do grupo, e ao longo do tempo, o enxame obtém sucesso.

Dentre as características atrativas para a utilização do processo de otimização por enxame de partículas, têm-se: (i) fácil implementação; (ii) não requer informação referente ao gradiente da função [42], [43]. Ou seja, podem-se tratar variáveis contínuas e discretas com certa facilidade.

O critério de busca do processo de otimização consiste em, a cada iteração, alterar a velocidade de cada partícula em duas direções: (a) em direção a melhor posição encontrada por cada partícula (pbest); (b) em direção a melhor posição encontrada pelo grupo de partículas (gbest). A aceleração da busca é ponderada por um termo gerado de forma aleatória, vinculados a estes de forma separada às localizações do pbest e do gbest. O procedimento para implementação do algoritmo é regido pelas etapas enumeradas a seguir:

- Etapa 1: Inicia-se uma população de partículas, com posições e velocidades de forma aleatória com distribuição uniforme;
- Etapa 2: Para cada partícula, determinar o valor da função de adequação (função objetivo do problema em estudo);
- Etapa 3: Avaliar o valor atual da função de adequação obtida com o pbest da partícula. Se o valor atual é melhor do que o pbest, atualiza-se o pbest;
- Etapa 4: Avaliar o valor atual da função de adequação de cada partícula obtida com o gbest do enxame. Caso algum dos valores atuais de pbest seja melhor do que o gbest atualiza-se o gbest;
- Etapa 5: Atualizar a velocidade e a posição de cada partícula conforme as equações (2.1) e (2.2), respectivamente. Vide Figura 2.1;
- Etapa 6: Volta-se a etapa 2, até que um determinado critério de parada, pré-estabelecido, seja alcançado. Este critério de parada é, usualmente, dado por uma função de adequação suficientemente boa ou um número máximo de iterações.

$$V_k = w.V_{k-1} + c_1.rand().(pbest_{k-1} - X_{k-1,i}) + c_2.rand().(gbest_{k-1} - X_{k-1,i}) \quad (2.1)$$

$$X_{k,i} = (X_{k-1,i} + V_k) \quad (2.2)$$

onde:

V_k = Velocidade da partícula na iteração k;

V_{k-1} = Velocidade da partícula na iteração anterior;

w = Peso de inércia;

c_1 e c_2 = Constantes positivas que correspondem aos parâmetros cognitivos e sociais das partículas;

$rand$ = Função de números aleatórios no intervalo [0,1];

$pbest_{k-1}$ = Melhor posição da partícula k até a iteração anterior;

$gbest_{k-1}$ = Melhor posição do enxame até a iteração anterior;

$X_{k,i}$ = Posição da partícula k, na iteração i;

$X_{k-1,i}$ = Posição da partícula k, na iteração anterior;

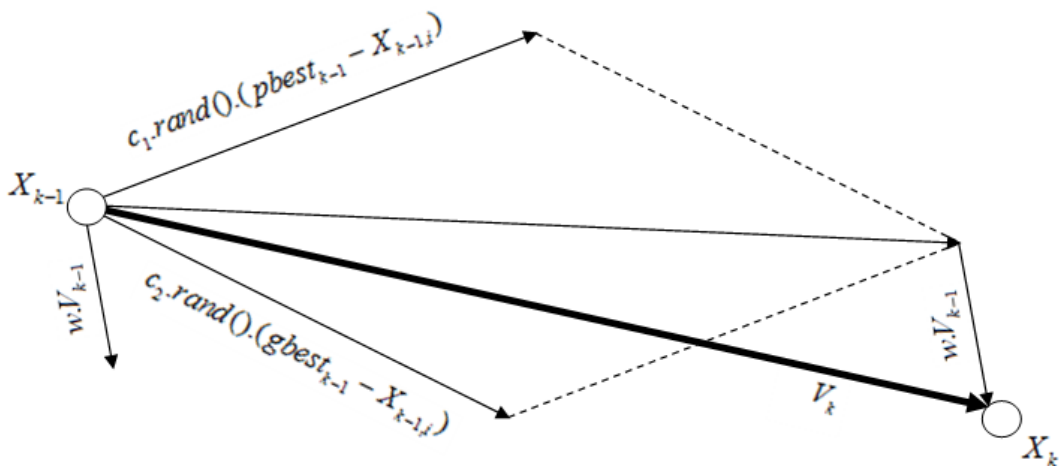


Figura 2.1- Atualização da Partícula.

A primeira parcela, da equação referente à atualização da velocidade de cada partícula, equação (2.1), corresponde ao momento de inércia da partícula, sendo a ponderação de inércia w , o grau de momento da partícula. A segunda parcela é referente à parte “cognitiva”, que representa o conhecimento individual da partícula adquirido ao longo do processo de busca. A terceira parcela é referente à parte “social”, que representa a colaboração entre as partículas,

ou seja, o conhecimento coletivo adquirido do enxame ao longo do processo de busca. A segunda e terceira parcela são ponderadas por duas constantes, c_1 e c_2 que representam a ponderação das componentes individuais e coletivas que influenciam cada partícula em direção a nova solução. Estes parâmetros são, usualmente, ajustados por tentativa no intervalo contínuo [0-2] [40]. Já a primeira parcela é ponderada por uma função, denominada de função ponderação inercial w , e introduz a preferência da partícula por mover-se em novas direções. Valores elevados da função de ponderação facilitam uma exploração global enquanto que valores pequenos tendem a representar uma exploração local. Resultados obtidos na literatura especializada [44], [45] mencionam que é melhor ajustar a função de ponderação em um valor elevado no início do processo de busca, promovendo uma busca mais abrangente da região de solução, e gradualmente, ao longo do processo, diminuí-lo para refinar a busca. A atualização da função de ponderação é dada pela equação (2.3). As alterações das velocidades modificam as posições das partículas, fazendo-as moverem-se através da região de solução. Como resultado da combinação entre a decisão individual e a decisão do enxame, as partículas acabam convergindo para uma solução ótima ou subótima.

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (2.3)$$

Onde:

w = Peso de Inércia;

w_{\max} = Peso de Inércia Máximo;

w_{\min} = Peso de Inércia Mínimo;

$iter$ = Iteração atual;

$iter_{\max}$ = Número máximo de iterações;

A Figura 2.2 ilustra o processo de deslocamento da otimização baseado no enxame de partículas, onde o objetivo é maximização de uma determinada função. Percebe-se que inicialmente as partículas apresentam-se distribuídas em uma determinada parte da região de solução e com o passar das iterações, as mesmas acabam convergindo para a solução desejada através do processo bioinspirado anteriormente descrito.

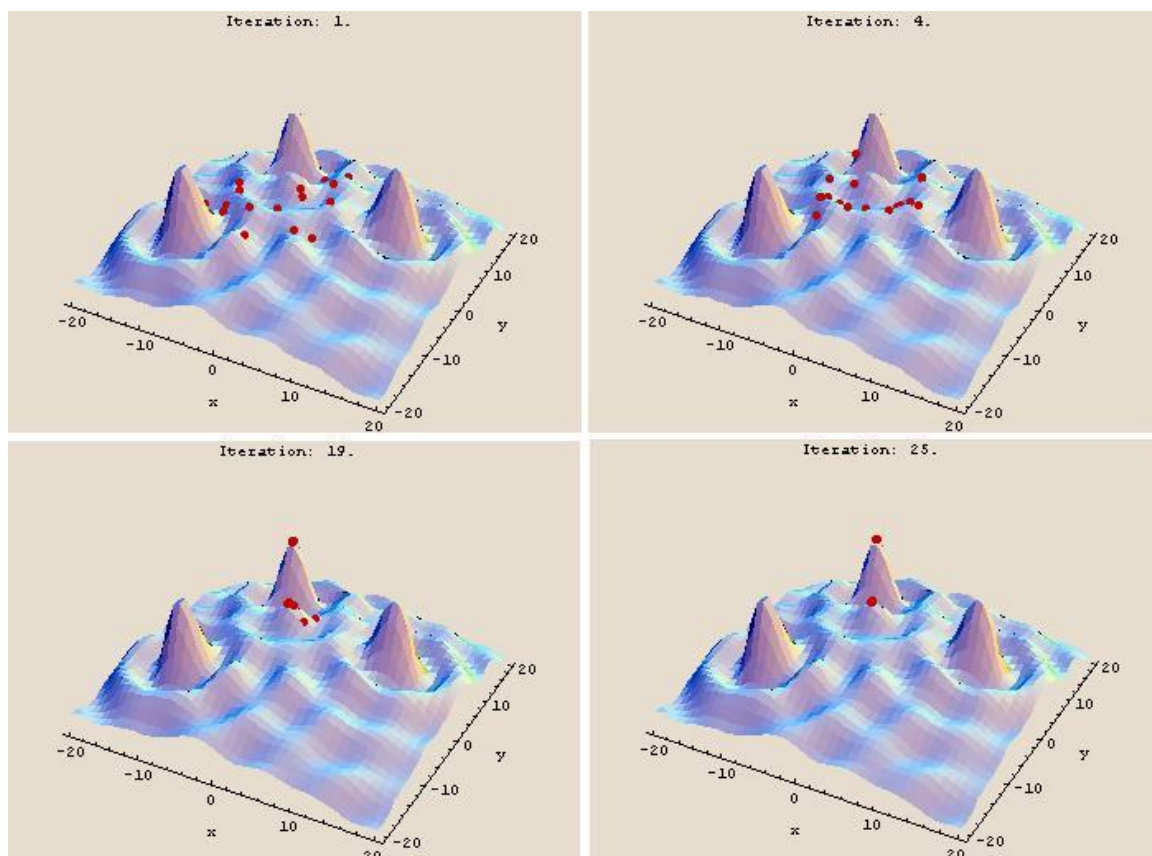


Figura 2.2- Processo de Busca.

Fonte: <http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~khemka/pso/model.html>

2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM ENXAME DE PARTÍCULAS PARA A RESOLUÇÃO DA EXPANSÃO ESTÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica pode ser formulado como um problema de programação não linear inteira mista, com variáveis contínuas e discretas. Além disso, sendo a região de solução não convexa, há inúmeras soluções possíveis e as condições iniciais tendem a interferir na qualidade da solução obtida, principalmente para técnicas de otimização baseadas em derivadas e gradientes. Logo, o processo de otimização baseado em enxame de partículas tem se mostrado eficiente para resolução de problemas com as características acima mencionadas. Assim, será apresentada a modelagem, parâmetros e os critérios utilizados para adaptar o algoritmo de otimização bioinspirado ao problema em estudo.

2.3.1 Representação da Partícula

Cada partícula foi modelada através de uma codificação inteira, onde o número inteiro diferente de zero representa o número de linhas de transmissão construídas em uma determinada rota candidata à expansão. Para tanto, o vetor posição é um vetor linha com dimensão referente ao número de rotas candidatas a expansão. A Figura 2.3 apresenta a representação de uma partícula, a qual é apresentada uma possível solução de expansão, onde somente uma linha de transmissão foi construída entre as barras s e t de um determinado sistema elétrico.

PE_{i-j}	PE_{i-k}	PE_{m-i}	PE_{s-t}
0	0	0	1

Figura 2.3- Representação da Partícula.

2.3.2 Inicialização do Enxame

O algoritmo é representado por uma população de soluções, o enxame. O enxame é constituído por partículas, sendo cada partícula constituída por um vetor posição e um vetor velocidade, os quais são responsáveis pelo deslocamento através da região de solução. Tradicionalmente, a formação inicial do enxame (posição e velocidade) é realizada de forma aleatoriamente controlada, pois é desejável que as soluções sejam factíveis ou pelo menos, grande parte delas, e a velocidade inicial igual a zero. Entretanto, no presente trabalho, foram feitas duas análises para a formação inicial do enxame: (i) geração aleatoriamente controlada, ou seja, é gerado um número aleatório contínuo para cada partícula, pertencente a um intervalo $[0, NEPC]$, onde NEPC é o número máximo de expansões por rotas candidatas a expansão. Como a codificação da partícula é inteira, arredonda-se o número sorteado para o inteiro mais próximo; (ii) inicialização, de uma parte do enxame (50 partículas), através do algoritmo heurístico construtivo dedicado ao problema em estudo. Esta inicialização tende a aumentar a eficiência do processo de busca

como poderá ser observado posteriormente. Maiores detalhes sobre a heurística construtiva adotada serão apresentadas no capítulo subsequente.

2.3.3 Avaliação da Partícula

A atualização da velocidade de cada partícula existente no enxame é dada através da equação (2.1), sendo esta função do parâmetro $pbest$ (melhor posição individual) e $gbest$ (melhor posição do enxame). Assim sendo, há necessidade de se quantificar a qualidade de cada partícula, solução. Esta análise é feita através do valor da função objetivo (função de adequação) do problema de otimização em estudo. Ou seja, na minimização do custo da expansão do sistema de transmissão e dos custos associados aos possíveis não atendimentos à demanda de energia elétrica, oriundos da falta de capacidade de transmissão de energia.

2.3.4 Deslocamento e Velocidade

Para a atualização da velocidade de cada partícula deve se determinar a melhor posição de cada partícula e a melhor posição do enxame. A melhor posição inicial encontrada por cada partícula, $pbest$, será a posição obtida no início do processo de otimização. A melhor posição inicial do enxame, $gbest$, será a melhor solução obtida entre todas as partículas. Ou seja, a que apresentar o menor valor da função objetivo entre todas as partículas inicialmente geradas.

A escolha dos parâmetros do algoritmo é de grande importância para a convergência do mesmo para uma solução de boa qualidade. Nos trabalhos publicados na literatura, os coeficientes de ponderação c_1 e c_2 são geralmente considerados constantes positivos e pertencentes ao intervalo [0-2], nesta dissertação adotou-se $c_1 = c_2 = 2$ [42]. Já o valor do peso inercial w é determinado através de (2.3), onde o mesmo varia de um peso inicial até um peso final, adotou-se peso inicial igual a 0,9 e final igual a 0,4, isto é $w_{max} = 0,9$ e $w_{min} = 0,4$.

Deste modo, determinados os valores dos parâmetros do algoritmo e os valores correntes dos vetores de posição e velocidade de cada partícula, bem como a melhor posição encontrada por cada partícula e a melhor posição encontrada pelo enxame, pode atualizar o deslocamento e a velocidade do enxame.

Como o deslocamento deve ser discreto, pois as soluções são referentes às construções ou não de linhas de transmissão, decisões discretas, optou-se por resolver esta questão, simplesmente, arredondando o deslocamento final atualizado, equação (2.4). Destaca-se que na literatura [46], [47], existem outras formas para o tratamento de variáveis discretas via enxame de partículas.

$$X_{k,i} = \text{round}(X_{k-1,i} + V_k) \quad (2.4)$$

Após a atualização final, equação (2.4), deve-se verificar se há alguma violação referente ao número máximo e/ou mínimo de expansões por rota candidata a expansão. Assim, devem-se verificar as seguintes situações, equação (2.5):

$$\begin{cases} X_{k,i} > NEPC \rightarrow X_{k,i} = NEPC \\ X_{k,i} < 0 \rightarrow X_{k,i} = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3.5 Critério de Convergência

Como critério de convergência do processo de otimização foi adotado, nesta dissertação, um número máximo de iterações. Destaca-se que existem, na literatura, outros critérios de convergência como o da estagnação, onde o processo é tido como convergido quando todas as partículas representam a mesma solução, para futura investigação. Ou seja, quando todo o enxame está na mesma posição.

2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Foram apresentadas as informações básicas do processo de otimização bioinspirado em enxames de partículas, tais como: inspiração biológica, modelagem, formulação, algoritmo e as adequações e considerações feitas ao processo de otimização na resolução do problema referente à expansão estática de sistemas de transmissão de energia elétrica. As aplicações presentes na literatura [21], [38], [39] e [48] mostram a capacidade do algoritmo na resolução do problema aqui em estudo.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia proposta nesta dissertação tem como objetivo melhorar a eficiência do processo de otimização bioinspirado e encontrar soluções competitivas com as apresentadas na literatura especializada. Para tanto, a metodologia proposta faz uso de uma heurística construtiva proposta em [9], com a finalidade de identificar as rotas relevantes de expansão e assim, diminuir de maneira eficiente o espaço de busca para o processo de otimização bioinspirado. A redução das rotas candidatas é bastante importante e pertinente, pois independente da metodologia a ser utilizada na resolução do problema, este conjunto reduzido permite melhorar a qualidade da solução do problema, oferecendo assim eficiência ao método, sendo por isso uma área atrativa de estudo e pesquisa.

A seguir será apresentado um breve resumo da heurística construtiva utilizada pela metodologia proposta, partindo da formulação matemática do problema até o algoritmo heurístico construtivo utilizado.

3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão pode ser formulado como um problema de otimização não linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução envolve a seleção, dentre todos os circuitos candidatos à expansão, dos circuitos que minimizam o custo de investimento na transmissão e um conjunto de restrições que devem ser satisfeitas. Assim, o problema pode ser formulado como:

Minimizar Custo de Investimento no Sistema de Transmissão

Sujeito a:

- Restrições de Balanço de Potência Ativa
- Restrições do Parâmetro de Expansão (PE)
- Restrições de Violação de Fluxo de Potência Ativa
- Restrições de Conexidade

A seguir, serão apresentadas as características da função objetivo e das restrições que fazem parte da formulação proposta.

Representando por E o conjunto de circuitos existentes na topologia base de um sistema, C o conjunto de circuitos candidatos à expansão e por F o conjunto de circuitos fictícios, o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão é formulado como:

$$\text{Min} \sum_{m=1}^{nr} c_m \cdot r_m + \sum_{k=1}^{nc} c_k \cdot PE_k \quad (3.1)$$

s.a

$$g_i + r_i + \sum_{j \in \Omega_i} f_{ij} = d_i \quad (3.2)$$

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in E, C \quad (3.3)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (3.4)$$

$$0 \leq r \leq \bar{r} \quad (3.5)$$

$$0 \leq PE_{ij} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in C \quad (3.6)$$

$$f_{ij} = \gamma_{ij} \theta_{ij} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.7)$$

$$f_{ij} = \gamma_{ij_{FC}} \phi_{ij} \quad \forall (i, j) \in F \quad (3.8)$$

$$f_{ij} = PE_{ij} \gamma_{ij} \theta_{ij} \quad \forall (i, j) \in C \quad (3.9)$$

$$\varphi_{ij} \gg \frac{\overline{f_{ij}}}{\gamma_{ij}} \quad \forall (i, j) \in F \quad (3.10)$$

$$\gamma_{ijFIC} \ll \gamma_{ij} \quad \forall (i, j) \in F \quad (3.11)$$

onde:

nr é o número de geradores fictícios;

nc é o número de circuitos candidatos;

c_m é o custo do déficit de energia (US\$/MW-ano);

c_k é o custo da construção do circuito candidato k (US\$/ano);

g_i é a geração da unidade geradora na barra i (MW);

\overline{g}_i é o limite máximo de geração na barra i (MW);

r_i é a geração da unidade geradora fictícia na barra i (MW);

\overline{r}_i é o limite máximo da geração fictícia na barra i (MW);

Ω_i é o conjunto de barras conectadas a barras i ;

PE_k é o parâmetro de expansão do circuito candidato k , mitigado por função linear entre o intervalo[0-1];

f_{ij} é o fluxo de potência ativa no circuito $i-j$ (MW);

\overline{f}_{ij} é o limite de fluxo de potência ativa no circuito $i-j$ (MW);

γ_{ij} é a susceptância dos circuito $i-j$;

d_i é a demanda na barra i (MW);

φ_{ij} é a diferença angular do circuito fictício entre as barras $i-j$;

θ_{ij} é a diferença angular entre as barras $i-j$;

γ_{ijFIC} é a susceptância do circuito fictício $i-j$.

3.2.1 Função Objetivo (FOB)

A função objetivo, equação (3.1) corresponde à minimização da soma dos custos do déficit de energia e dos investimentos referentes à expansão do sistema de transmissão. Contudo, o foco do trabalho é a minimização da soma dos custos de investimento para a construção de novos circuitos, ou seja, da expansão. Porém, para evitar possíveis inviabilidades, considera-se uma parcela adicional denominada custo do corte de carga. Esta última pode ser interpretada como uma geração fictícia de potência ativa, de alto custo operacional, também conhecida como geração de déficit. Os geradores fictícios são inseridos em cada barra de carga do sistema e caso as expansões realizadas não garantam o atendimento à demanda, os geradores fictícios entram em operação garantindo o atendimento a demanda, porém a custos elevados. Ao introduzir esta parcela na função objetivo o problema torna-se sempre viável.

3.2.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa

Para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, tradicionalmente, é utilizado o modelo de fluxo de carga CC. Esta modelagem é baseada no acoplamento entre a potência ativa e o ângulo da tensão e permite de forma simples, com baixo esforço computacional, precisão aceitável, determinar a distribuição dos fluxos de potência ativa na rede de transmissão. Este tipo de modelagem é utilizado tanto para estudos de planejamento quanto para estudos preliminares da operação de sistemas elétricos de potência.

A equação de restrição do balanço de potência é dada na equação (3.2), também podendo ser chamada de equação de atendimento a demanda. Esta verifica o estado da rede, além de representar as duas Leis de Kirchhoff que devem ser satisfeitas de forma coerente para o funcionamento satisfatório do modelo. Estudos com o sistema brasileiro [49] mostram que os erros na aproximação são relativamente pequenos, entre 2% e 5% em circuitos mais sobrecarregados.

3.2.3 Restrições de Canalização de Fluxo de Potência Ativa

A restrição (3.3) corresponde aos limites de fluxo de potência ativa nos circuitos existentes e candidatos, representando assim a capacidade de transporte de fluxo das linhas de transmissão.

3.2.4 Restrições de Canalização de Geração Potência Ativa

As restrições (3.4), (3.5) representam restrições de canalização, ou seja, limites inferiores e superiores, dos geradores existentes e artificiais, sendo estes últimos referentes aos eventuais cortes de carga existentes no sistema.

3.2.5 Restrições de Fluxo de Potência Ativa

A formulação proposta em [9] é composta por três tipos de circuitos: (i) circuitos existentes na topologia base; (ii) dos fictícios que permitem deixar os sistemas conexos; (iii) dos candidatos à expansão; dados pelas equações (3.7), (3.8) e (3.9), respectivamente. É importante mencionar que a não-linearidade existente no termo $PE_{ij}\theta_{ij}$ da equação (3.9), é tratada pelo método primal-dual de pontos interiores (MPI), a qual soluciona o fluxo de potência ótimo (FPO), vide Apêndice B. Pode-se notar que quando um circuito candidato é adicionado à topologia existente, isto é, $PE_{ij} = 1$, a equação (3.9) fica idêntica à equação (3.7) e, portanto, o circuito candidato passa a fazer parte da topologia existente.

3.2.6 Restrições de Conexidade

Uma das dificuldades na solução do problema de planejamento de sistemas de transmissão é a possibilidade da existência de sistemas elétricos não conexos ou ilhados, uma vez que para estes sistemas a modelagem CC não apresenta solução [50]. De modo a contornar este problema, o trabalho proposto em [9] recorreu à utilização de circuitos fictícios. Assim, os circuitos fictícios devem obedecer às seguintes condições: (i) possuir valores muito pequenos de susceptância em relação aos circuitos candidatos; (ii) devem ter uma capacidade de transmissão muito maior que a capacidade permitida aos circuitos candidatos, isto é, os circuitos fictícios devem ter aberturas angulares maiores que as máximas permitidas [8]. Esta condição garante que as diferenças angulares entre os laços fictícios não modifiquem as aberturas angulares dos circuitos existentes e candidatos. Assim, para cada circuito fictício têm-se as restrições (3.10) e (3.11).

3.2.7 Restrições do Parâmetro de Expansão (PE)

O problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão consiste em decidir entre um conjunto de circuitos candidatos à expansão quais circuitos devem ser construídos de modo a otimizar os recursos financeiros disponíveis. Esta decisão de construir ou não determinados circuitos é representada pelo parâmetro de expansão, onde o valor nulo deste parâmetro significa a não construção do determinado circuito e o valor unitário indicaria a construção. Assim, o parâmetro de expansão corresponde a uma variável discreta no problema de planejamento. Entretanto, de modo a evitar as dificuldades peculiares da resolução de problemas de programação inteira, foi adotado em [9] a mesma heurística proposta inicialmente por Garver [5], isto é, permite-se ao parâmetro de expansão assumir valores contínuos dentro do intervalo $[0,1]$. Assim, o problema que originalmente é de programação inteira passa a ser um problema de programação contínua. Os valores contínuos assumidos pelo parâmetro de expansão são inaceitáveis a princípio como propostas de expansão, porém podem ser indicativos interessantes na procura de boas propostas discretas.

Teoricamente, qualquer função contínua pode ser utilizada para representar o parâmetro de expansão. Porém, nesta dissertação, adotou-se a função linear de uma reta para a representação do PE , por ser uma função contínua, já em [9] utilizou-se a função sigmóide.

3.3 ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO UTILIZADO

O algoritmo heurístico construtivo proposto em [9] é dividido em duas fases: (i) fase de construção, onde o objetivo é a obtenção de um plano inicial de expansão factível; (ii) fase de verificação, onde são geradas topologias a partir da solução encontrada na fase de construção com o objetivo de verificar a existência de planos de expansão mais econômicos. Entretanto, a metodologia proposta neste trabalho faz uso apenas da fase de construção deste algoritmo, a fase de verificação sendo desnecessária neste caso, pois o planejamento final é efetuado pelo algoritmo bioinspirado via enxame de partículas.

A fase de construção é dividida em duas etapas: (i) etapa contínua; (ii) etapa discreta. A etapa contínua tem como objetivo a obtenção dos valores contínuos dos parâmetros de expansão (PE) de todos os circuitos candidatos, $0 \leq PE \leq 1$, e dos fluxos de potência ativa dos mesmos. Com estes valores obtidos, o próximo passo consiste em definir entre os circuitos candidatos à expansão, quais devem ser construídos. A heurística de decisão adotada é a mesma empregada por Garver [5]. Sendo assim, o circuito candidato à expansão que transportar o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa, equação (3.9), corresponde ao circuito que deve ser construído ou adicionado à topologia corrente. A observação experimental de que o valor do fluxo de potência ativa é um bom critério de decisão é puramente empírico, não havendo justificativa matemática. Assim, com as decisões de expansão conhecidas, parte-se para a etapa discreta.

Na etapa discreta, é imposto ao parâmetro de expansão do circuito selecionado para construção, pela etapa contínua, o valor unitário, e aos demais parâmetros dos circuitos candidatos não selecionados, valores nulos. Assim, com os valores discretos dos parâmetros de expansão definidos, é verificado se o sistema elétrico, com as expansões realizadas, está operando adequadamente. Portanto, se o sistema estiver operando com o valor de corte de

carga menor que uma tolerância (ε), 1 MW, considera-se o plano de expansão viável para o sistema de transmissão e o processo termina. Caso contrário, volta-se para a etapa contínua à procura do próximo circuito candidato a ser adicionado à topologia corrente. Neste caso, os circuitos candidatos previamente selecionados à construção devem possuir $PE = 1$ até o final do processo, uma vez que estes agora fazem parte da topologia corrente.

O processo de resolução inicia-se pela etapa discreta originalmente, com todos os parâmetros de expansão nulos, isto é, $PE = 0$. Assim, é verificada a operação do sistema elétrico com a topologia base ou corrente e, os resultados obtidos são utilizados para inicializar o problema de planejamento propriamente dito (etapa contínua). O fluxograma da primeira fase é apresentado na Figura 3.1.

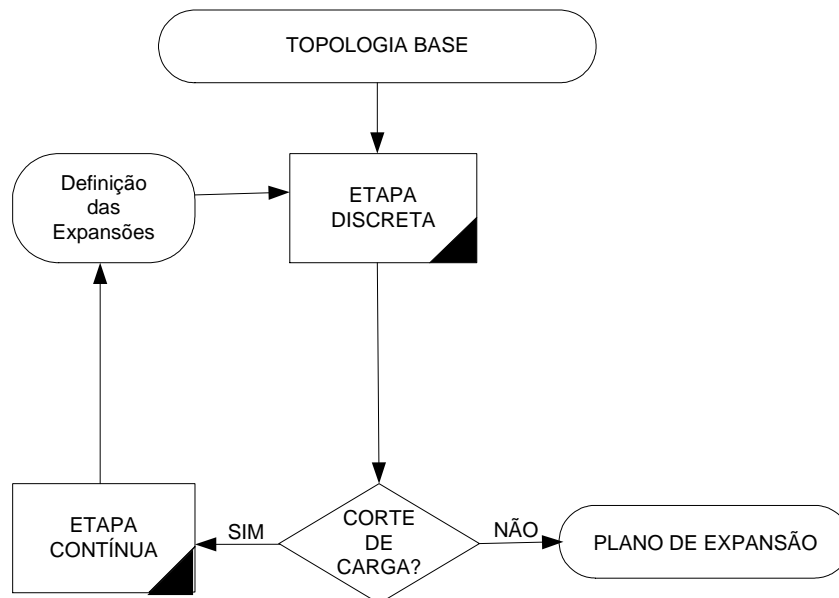


Figura 3.1- Fluxograma do Algoritmo Heurístico - AHC.

3.4 ALGORITMO PROPOSTO

Como já mencionado anteriormente, a metodologia proposta utiliza a heurística construtiva com o objetivo de identificar as rotas relevantes de expansão e assim, diminuir de maneira eficiente o espaço de busca para o processo de otimização bioinspirado. Como se trata de um problema de otimização não convexo, com vários pontos de mínimos, é evidente que o ponto de partida do processo de otimização tem grande influência na forma como a

solução final vai ser obtida e da qualidade desta solução. Sendo assim, a metodologia proposta faz uso da heurística construtiva, partindo de várias soluções iniciais randômicas para o parâmetro de expansão, com o objetivo de obter vários planos factíveis de expansão.

Desta forma, com as várias soluções conhecidas, é possível estabelecer um conjunto reduzido, porém relevante, de rotas candidatas a expansão do sistema de transmissão em estudo. A obtenção de um conjunto reduzido de rotas de expansão é bastante importante e pertinente, pois independente da metodologia a ser utilizada, permite a eficiência na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia, o que é uma área atrativa de estudo e pesquisa.

Com o conjunto relevante de rotas conhecidas, este é passado ao processo de otimização por enxame de partículas. Destaca-se que além da seleção das rotas têm-se, também, os planos de expansão gerados pela heurística construtiva, os quais serão apresentados ao enxame como soluções iniciais, permitindo assim que o processo de otimização bioinspirado parta de alguns pontos factíveis. Diante das considerações apresentadas, o plano final de expansão é obtido pelo processo de busca descrito no capítulo 2.

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma da metodologia proposta, o qual é dividido em três blocos; o primeiro: representa o AHC e o número de planos gerados por este; o segundo: reúne as rotas relevantes e as soluções finais, ou seja, quantas linhas foram construídas para cada simulação final do AHC, após o número de planos executados no Bloco 1; e finalmente o terceiro: o Enxame de Partículas que faz o planejamento final da transmissão utilizando a inteligência do AHC, isto é, as informações advindas do mesmo.

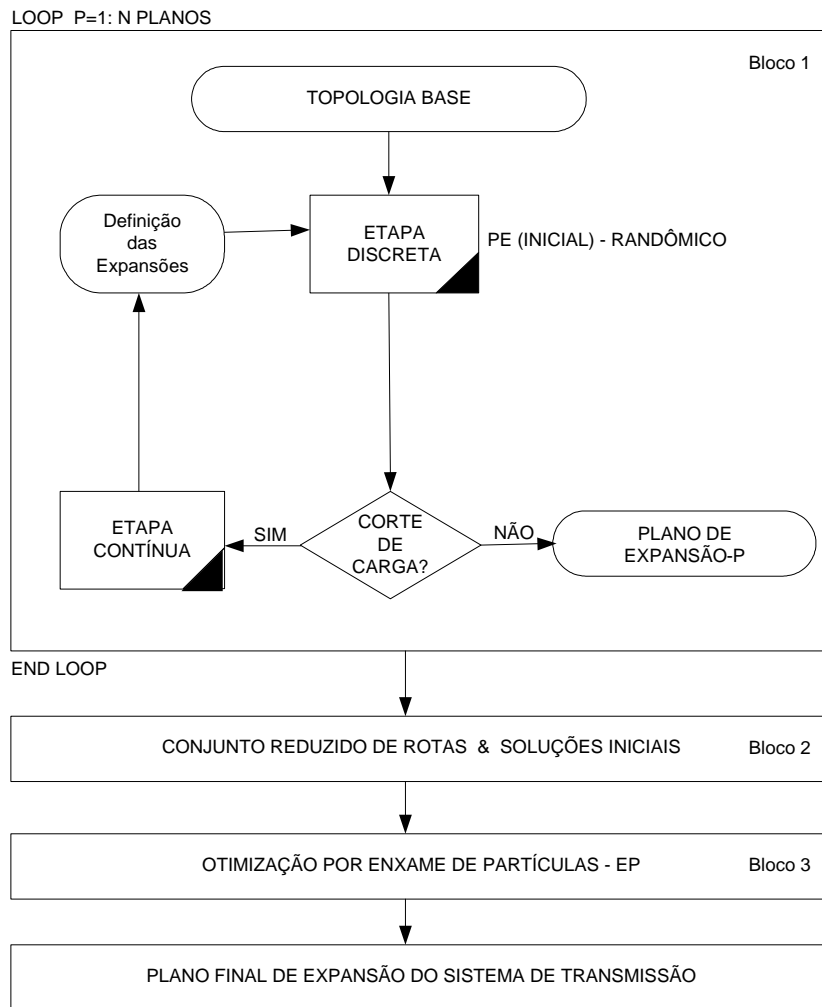


Figura 3.2- Fluxograma da Metodologia Proposta.

3.5 SISTEMA TUTORIAL

Como forma didática de exemplificar a metodologia proposta, utilizou-se um sistema teste de quatro barras conforme Figura 3.3. Dentre as barras que compõem este sistema, existem três barras de carga e uma barra de geração. Este sistema é não conexo (ilhado), apresentando uma barra isolada e um circuito entre as barras 1-3 e 2-3 na configuração base. Os problemas de operação do sistema elétrico são contornados através de três geradores fictícios (r) de elevado custo operacional (400 US\$/ MWh), inseridos nas barras de carga, representando os possíveis cortes de carga no sistema e, com a utilização de um circuito

fictício de susceptância $\gamma_{ij_{FIC}} = \gamma_{ij} \cdot 10^{-3}$, entre as barras 1-4, de maneira a tornar o sistema elétrico conexo, e sempre viável.

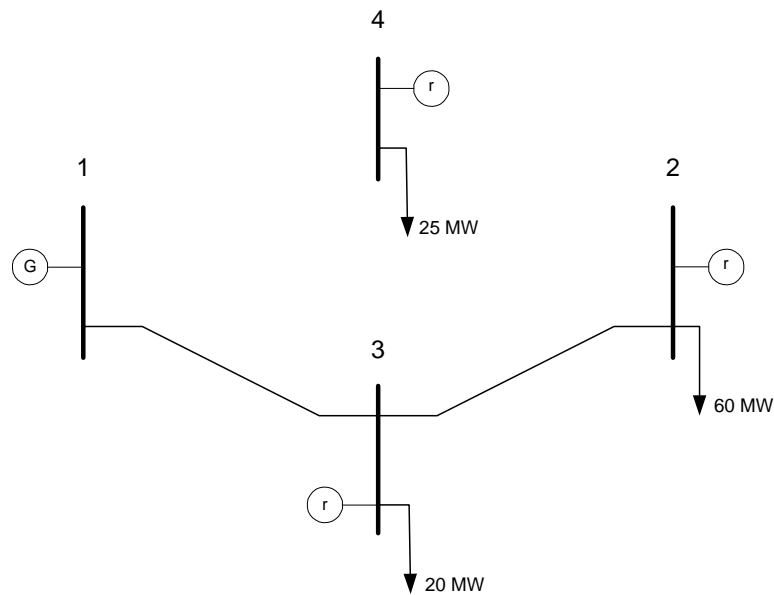


Figura 3.3- Sistema Teste.

Em todos os caminhos possíveis tem-se a possibilidade de expansão do sistema de transmissão, sendo permitida apenas uma expansão por caminho candidato. É importante ressaltar que a unidade geradora (G) tem capacidade de geração suficiente para atender a demanda prevista (105 MW) para o horizonte de planejamento, ficando o problema restrito apenas aos limites de fluxo de potência ativa das linhas de transmissão. Os dados do sistema teste são apresentados nas Tabela 3.1, Tabela 3.2, Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.1- Dados de barra e geração: Sistema teste

Barra	Capacidade de Geração (MW)	Carga (MW)	Custo (US\$/MWh)
1	120.0	0.0	0.00
2	0.0	60.0	400
3	0.0	20.0	400
4	0.0	25.0	400

Tabela 3.2- Dados dos circuitos existentes: Sistema teste

Caminhos	Circuito Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-3	1	200	40
2-3	1	200	40

Tabela 3.3- Dados do circuito fictício: Sistema teste

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-4	1	200000	500

Tabela 3.4- Dados dos circuitos candidatos: Sistema teste

Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (mil dólares)
1-2	300	30	3,0
1-3	200	40	0,9
2-3	200	40	0,9
1-4	200	40	2,0
2-4	200	40	2,0

Para o sistema tutorial, aqui em estudo, serão gerados apenas dois planos de expansão pelo AHC. A partir destas soluções serão determinados os conjuntos de rotas relevantes à expansão, sendo estas repassadas ao algoritmo de busca bioinspirado para a obtenção do planejamento final da expansão do sistema de transmissão. A seguir serão apresentados os passos desta simulação.

1ª PLANO DE EXPANSÃO - BLOCO 1

Etapa Contínua: Nesta etapa o objetivo é a determinação dos valores contínuos referentes aos parâmetros de expansão iniciais randômicos, advindos do sorteio contínuo da função reta, dentro do intervalo [0,1], apresentados na Tabela 3.5, e conseqüentemente dos fluxos de potência ativa passantes pelos circuitos candidatos. Diante destes valores, é possível definir pela heurística adotada quais circuitos candidatos à expansão devem ser construídos. Esta

seleção é feita de acordo com a heurística adotada que seleciona o circuito que apresentar o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa ($f_{ij} = PE_{ij}\gamma_{ij}\theta_{ij}$) dentre todos os candidatos [5]. Assim, com as expansões decididas na etapa contínua, parte-se para etapa discreta.

Tabela 3.5- Valores iniciais aleatórios de PE

$i - j$	PE_{i-j}
1-3	0.7577
2-3	0.7431
1-4	0.3922
1-2	0.6555
2-4	0.1712

Etapa Discreta: Nesta etapa, o objetivo é verificar como o sistema está operando com a construção dos circuitos na topologia base, definidos na etapa contínua, via FPO [9]. Assim, com as expansões realizadas é possível verificar se o sistema elétrico opera de forma adequada. Uma vez que ainda haja a necessidade da realização de cortes de carga, tornam-se necessárias novas expansões no sistema de transmissão, sendo assim, o algoritmo proposto parte para uma nova etapa contínua (construtivo). Ao final das etapas discretas foram obtidos os seguintes valores para o parâmetro de expansões, ou seja, foram definidas as construções das rotas, conforme exposto na Tabela 3.6.

Tabela 3.6- Resultado da etapa discreta - PE(final)

$i - j$	PE_{i-j}
1-3	1
2-3	1
1-4	1
1-2	0
2-4	0

O sistema contendo as expansões, para o primeiro plano final, bloco 1 da Figura 3.2, é representado na Figura 3.4.

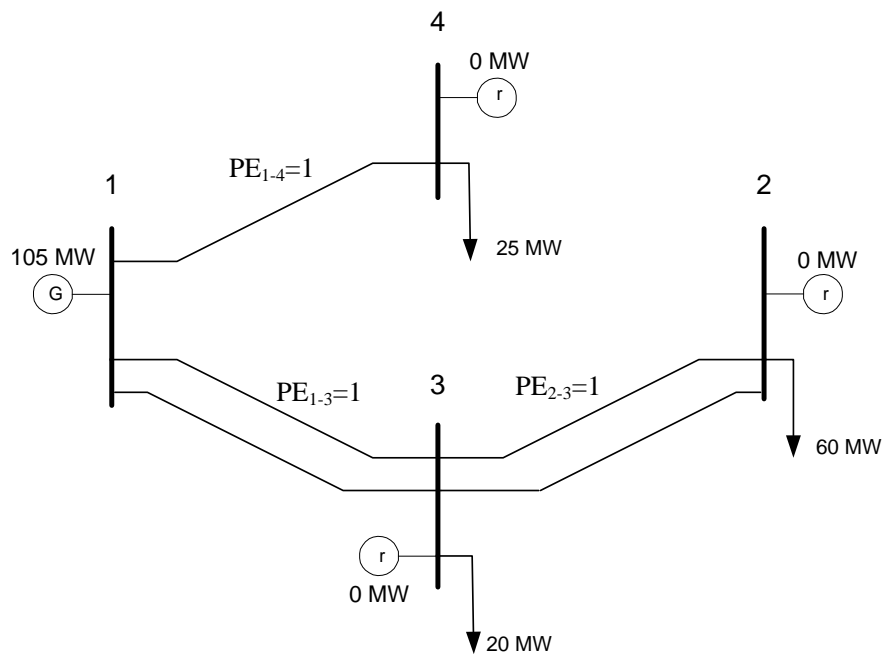


Figura 3.4- Solução do 1ª plano.

A topologia corrente, com a construção dos circuitos candidatos entre as barras 1-3, 2-3 e 1-4, atende perfeitamente a demanda prevista pelo horizonte de planejamento sem que exista a necessidade de cortes de carga no sistema elétrico, indicando uma operação adequada do sistema. Com isso, tem-se uma topologia factível para o sistema teste, com um custo de investimento de US\$3800,00 no sistema de transmissão.

2ª PLANO DE EXPANSÃO - BLOCO 1

Para a obtenção do segundo plano de expansão, bloco 1 da Figura 3.2, o procedimento é análogo ao descrito anteriormente, sendo as soluções iniciais aleatoriamente geradas para o parâmetro de expansão apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7- Valores iniciais aleatórios de PE

$i - j$	PE_{i-j}
1-3	0.4387
2-3	0.3816
1-4	0.7655
1-2	0.7952
2-4	0.1869

Os valores contínuos aleatoriamente gerados, através do mecanismo de resolução do AHC, vide bloco 1, Figura 3.2, converge com os valores discretos para os parâmetro de expansão apresentados na Tabela 3.8. O sistema contendo as expansões finais é apresentado na Figura 3.5.

Tabela 3.8- Resultado da etapa discreta - PE(final)

$i-j$	PE_{i-j}
1-3	1
2-3	1
1-4	1
1-2	1
2-4	0

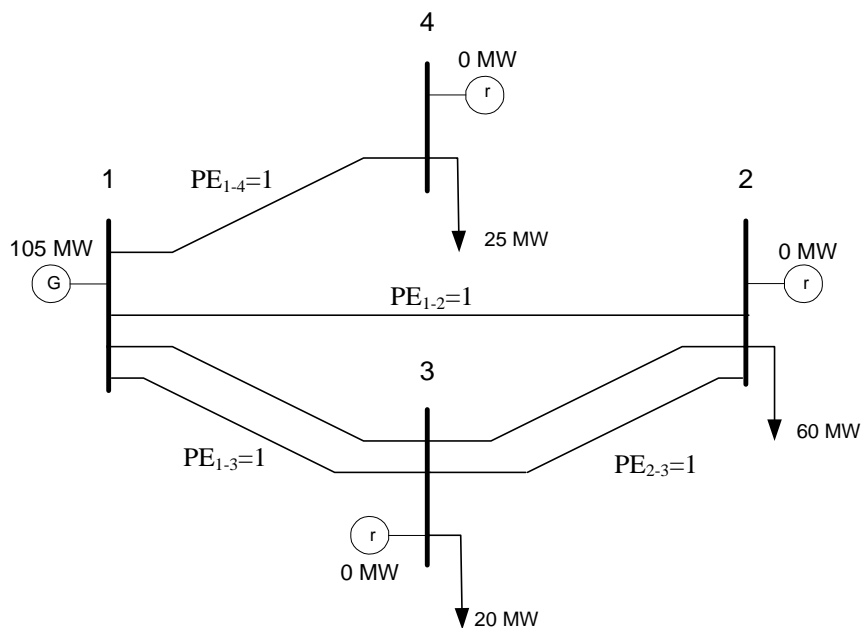


Figura 3.5- Solução do 2ª plano.

A topologia corrente, com a construção dos circuitos candidatos entre as barras 1-2, 1-3, 2-3 e 1-4, atende perfeitamente a demanda prevista pelo horizonte de planeamento sem que exista a necessidade de cortes de carga no sistema eléctrico. Ou seja, tem-se uma topologia inicial factível, com um custo de investimento de US\$6800,00 no sistema de transmissão.

CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS - SOLUÇÕES INICIAIS - BLOCO 2

Observa-se que ao simular duas vezes o sistema teste usando o AHC, foram obtidos dois conjuntos de rotas diferentes, Figura 3.6, e consequentemente dois planos de custo diferentes conforme as características apresentadas do problema de planejamento estático da expansão da transmissão, Capítulo 1. Contudo, estes dois planos diferentes atendem o sistema elétrico de forma satisfatória, ou seja, sem necessidade de usar os geradores artificiais, portanto sem corte de carga. Depreende-se das análises realizadas que os valores iniciais dos parâmetros de expansão influenciam na solução final.

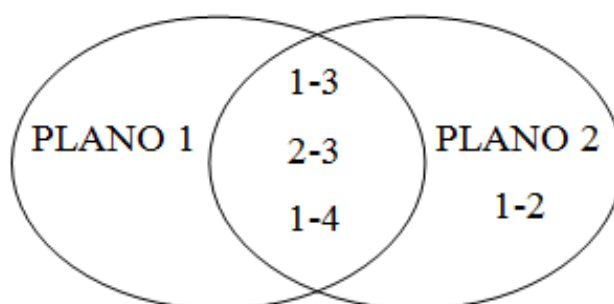


Figura 3.6- Planos Gerados.

Pela metodologia proposta, o conjunto de rotas relevantes à expansão fornecido ao algoritmo bioinspirado é a união das rotas de expansão obtidas via AHC, vide Figura 3.6, sendo as mesmas apresentadas pela Tabela 3.9.

Tabela 3.9- Conjunto reduzido de rotas - Simulações do AHC

$i - j$	PE_{i-j}
1-3	1
2-3	1
1-4	1
1-2	1

Assim, foram selecionados quatro caminhos candidatos à expansão (1-3, 2-3, 1-4 e 1-2) de dois planos factíveis de expansão que serão fornecidos ao processo de otimização baseado em enxames de partículas.

PLANEJAMENTO FINAL DA EXPANSÃO – BLOCO 3

Em relação ao processo de otimização bioinspirado foram adotados os seguintes parâmetros para esta simulação: (i) cinco partículas; (ii) dez iterações como critério de parada; (iii) soluções iniciais aleatórias. O sistema tutorial optou-se por não utilizar os planos finais de expansão obtidos via AHC, por ser um sistema pequeno.

A técnica bioinspirada em Enxame de Partículas obteve o planejamento final da expansão da transmissão, conforme Figura 3.7 e Tabela 3.10, a um custo de investimento de US\$3800,00 no sistema de transmissão de energia elétrica, o qual representa o planejamento ótimo final.

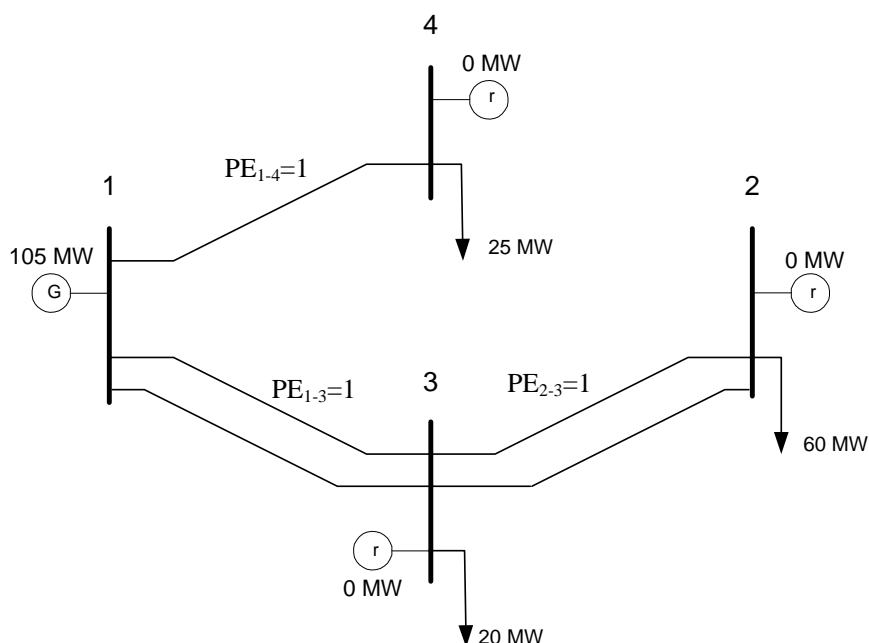


Figura 3.7- Solução Final via Enxame de Partículas.

Tabela 3.10– Resultado dos circuitos selecionados pelo Enxame de Partículas

$i - j$	PE_{i-j}
1-3	1
2-3	1
1-4	1

A Figura 3.8 apresenta o gráfico da evolução do processo de otimização bioinspirado, convergência. Destaca-se que a solução ótima foi obtida na sétima iteração, com o tempo total de simulação de 2,5 segundos. Entretanto, algumas considerações devem ser feitas para o sistema tutorial aqui analisado: (i) Se as soluções iniciais obtidas pelo AHC fossem consideradas no algoritmo de enxame de partículas, a solução final teria sido obtida já na primeira iteração, pois a mesma foi encontrada no primeiro plano gerado pelo AHC; (ii) Pelo fato de se tratar de um sistema pequeno, não houve redução significativa no número de rotas candidatas a expansão, porém para sistemas maiores, como poderá ser observado posteriormente, esta redução via AHC torna-se muito importante e oportuna para o processo de busca.

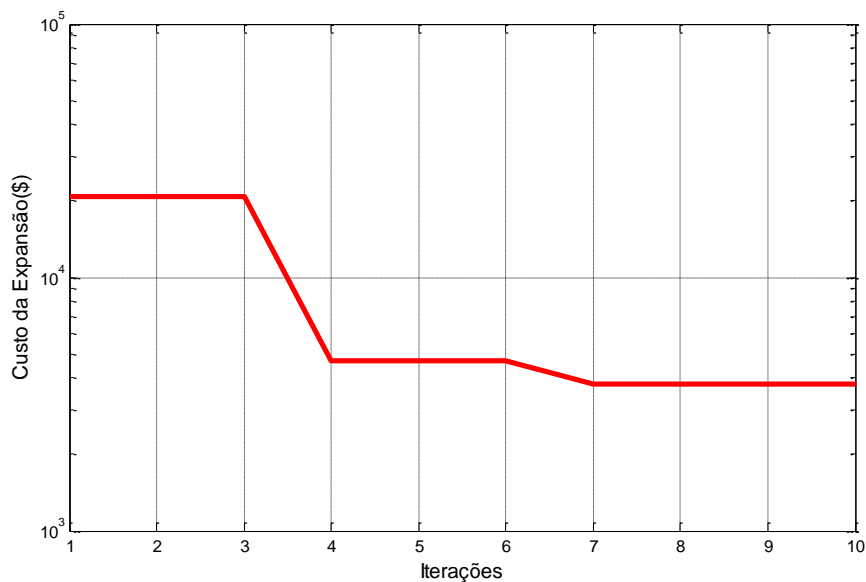


Figura 3.8- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas.

3.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados detalhes da formulação e da modelagem da metodologia proposta empregada na resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão.

As decisões de expansão (0-1) modeladas por uma função contínua, reta, foram incorporadas ao problema de otimização através das equações originais do modelo CC. As

características e os resultados obtidos com a utilização da reta foram satisfatórios na resolução do problema.

A heurística adotada é a mesma empregada por Garver [5] aplicado no algoritmo heurístico construtivo, com o objetivo de simplificar a resolução do problema de planejamento, reduzindo desta forma a explosão combinatorial referente às alternativas de investimento. Além disso, foi apresentado um pequeno sistema tutorial com o objetivo de mostrar as etapas da metodologia proposta.

4 ESTUDO DE CASOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pela metodologia proposta para o problema referente ao planejamento estático da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tanto, serão analisados um sistema acadêmico proposto por Garver e dois sistemas das regiões sul e sudeste do Brasil. Os resultados obtidos serão comparados com os existentes na literatura especializada, de modo a avaliar o desempenho da metodologia proposta. Os dados dos sistemas mencionados nesse capítulo estão contidos no Apêndice A.

4.2 SISTEMA GARVER

Este sistema, proposto inicialmente por Garver, é bastante conhecido na literatura sendo formado por 6 barras, 6 circuitos existentes na topologia base, 15 caminhos candidatos à expansão e uma demanda prevista para o horizonte de planejamento de 760MW.

Para ilustrar os resultados obtidos pela metodologia proposta serão feitas duas análises em relação ao sistema de Garver. Na primeira análise será permitido o redespacho das unidades geradoras e no segundo caso as unidades geradoras terão os despachos pré-determinados.

- **Caso 1: Sistema Garver com Redespacho de Geração**

Para esta primeira análise, com o redespacho de geração, adotou-se os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 3 expansões por caminho candidato; (iii) enxame composto por 150 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações. Assim, serão resolvidos 15.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima global.

O sistema proposto por Garver, apesar de ser de pequeno porte, já ilustra as principais dificuldades encontradas na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, pois é um sistema não conexo, Figura 4.1, e apresenta, para este caso, um número total de $4^{15} \approx 10^9$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente à explosão combinatória das alternativas de investimento. A seguir estão dispostas as três simulações realizadas para o sistema Garver com redespacho.

A) 1ª Simulação: Consideração de Todas as Rotas Candidatas à Expansão.

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, ou seja, 15 rotas candidatas, vide apêndice A. Nesta simulação não foi utilizado o algoritmo heurístico construtivo a fim de selecionar as rotas relevantes à expansão. A Tabela 4.1 apresenta o plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema de Garver com redespacho de geração.

Tabela 4.1- Plano final de expansão para o sistema de Garver com redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
4-6	3
3-5	1

A Figura 4.1 ilustra a configuração final obtida para o sistema de Garver com redespacho de geração, onde as linhas tracejadas representam as expansões realizadas.

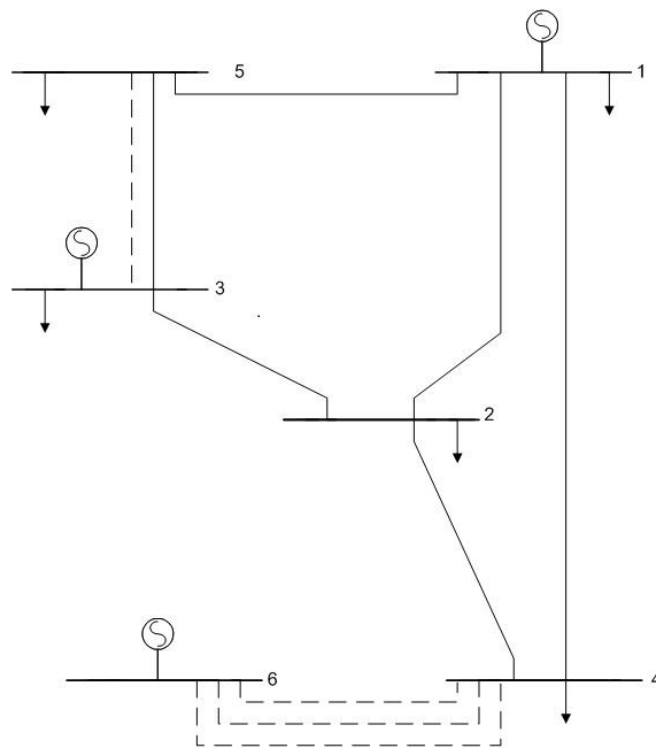


Figura 4.1- Configuração Final para o Sistema de Garver com Redespacho.

A solução apresentada acima tem um custo total de investimento de US\$110.000.000,00. O tempo total de simulação foi de 152 segundos, sendo a solução ótima obtida na décima primeira iteração do processo de busca via Enxame de Partículas, vide Figura 4.2.

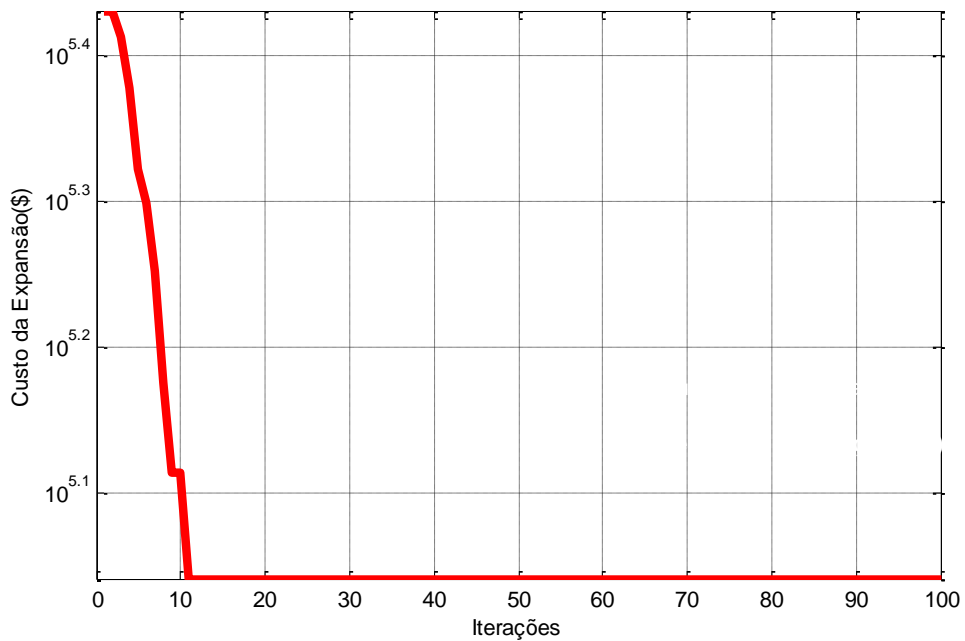


Figura 4.2- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema de Garver com Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC.

Neste caso fez-se o uso do AHC para reduzir o espaço de busca do enxame e assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca. Para tanto, simulou-se o AHC 50 vezes e construiu-se um conjunto formado pelas rotas seleccionadas por este, sendo estas consideradas relevantes à expansão. Desta forma, foram seleccionadas três rotas das quinze possíveis, vide Tabela 4.2, reduzindo o número de combinações possíveis de investimento para $4^3 = 64$.

Tabela 4.2- Rotas propostas pelo AHC

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
4-6, 2-6, 3-5

O plano final de expansão obtido para o sistema de Garver, considerando as rotas pré-seleccionadas pelo AHC é o mesmo apresentado na Tabela 4.1, com um custo total de investimento de *US*\$110.000.000,00. A Figura 4.3 apresenta o gráfico de convergência do processo de busca bioinspirado, onde se pode concluir que a solução ótima foi encontrada na primeira iteração. Este fato deve-se a qualidade da redução do espaço de busca. O tempo total de simulação foi de 180 segundos, tempo superior pelo fato de simular o AHC 50 planos.

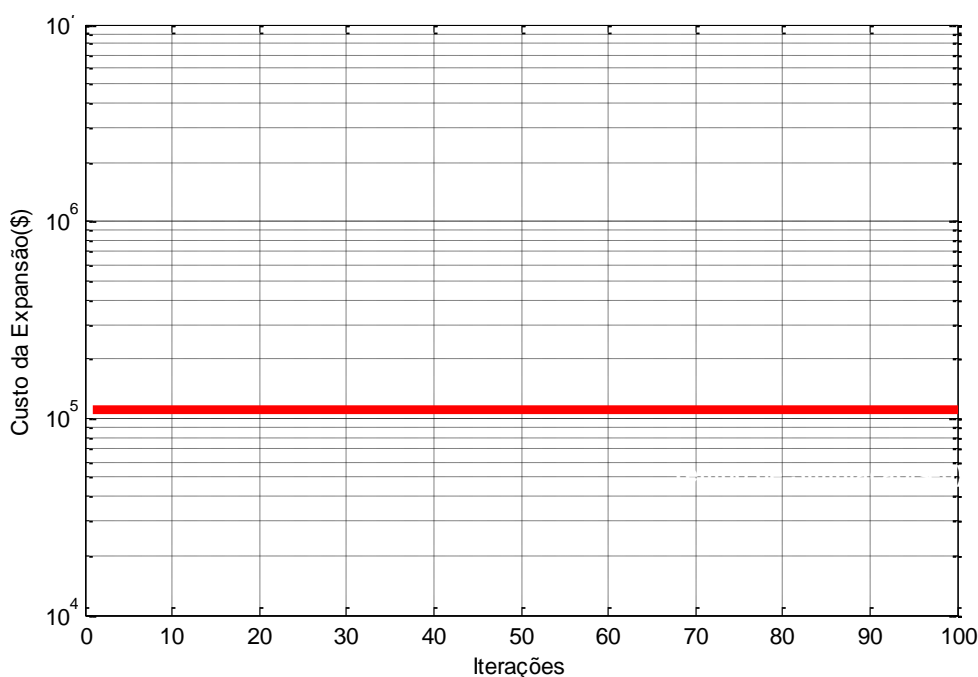


Figura 4.3- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema de Garver com Redespacho.

C) 3ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC e das Soluções Obtidas pelo AHC.

Inicialmente, com a finalidade de reduzir o número de rotas candidatas a expansão utilizou-se o AHC. Entretanto ao simulá-lo, têm-se as informações das soluções finais encontradas, isto é, quantas linhas foram construídas para cada simulação final do AHC. Desta forma, além do conjunto reduzido de rotas relevante à expansão, são fornecidas ao Enxame de Partículas as soluções finais encontradas pelo AHC. Estas soluções farão parte do conjunto de soluções iniciais do Enxame de Partículas, enxame inicial.

Para esta terceira análise, com o redespacho de geração, adotou-se os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 3 expansões por caminho candidato; (iii) enxame composto por 150 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações; (v) 50 simulações do AHC. Como foram utilizadas 150 partículas, compondo o enxame, e já se conhece 50 soluções (AHC), as demais 100 partículas são iniciadas aleatoriamente.

O plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema de Garver com redespacho de geração, considerando as rotas pré-seleccionadas e as soluções obtidas pelo AHC, é a mesma solução das análises anteriores, vide Tabela 4.1.

Apresenta o gráfico de convergência do processo de busca via Enxame de Partículas idêntico ao caso anterior, vide Figura 4.3.

A Tabela 4.3 apresenta a comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura: Mínimo Corte de Carga [8], Greedy Randomized Adaptive Search Procedure GRASP [25], Hybrid Simulated Annealing (HSA) [23], Scatter Search (SS) [29] e Branch-and-Bound (B&B) [13].

Tabela 4.3- Comparação custo de investimento para o sistema Garver

Sistema de Garver com Redespacho de Geração	
Algoritmos de Solução	Custo Total de Investimento (em milhões de dólares)
Mínimo Corte de Carga	130
GRASP	110
HSA	110
SS	110
B&B	110
Proposto	110

Pode-se verificar que o resultado obtido pelo algoritmo proposto corresponde ao mesmo custo de investimento alcançado por outras metodologias existentes na literatura, sendo esta a solução ótima global conhecida para o sistema em análise.

- **Caso 2: Sistema Garver sem Redespacho de Geração**

Para o caso sem redespacho de geração, o problema de planejamento torna-se mais difícil, uma vez que as unidades geradoras têm seus despachos de potência pré-determinados.

Foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 4 expansões por caminho candidato (iii) enxame composto por 150 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações. Assim, serão resolvidos 15.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima. Para este caso, o número total de combinações possíveis de investimento é da ordem de $5^{15} \approx 3.10^{10}$. A seguir estão dispostas as três simulações realizadas para o sistema Garver sem redespacho.

A) 1ª Simulação: Consideração de Todas as Rotas Candidatas à Expansão.

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, vide Apêndice A. A Tabela 4.4 apresenta o plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema de Garver sem redespacho de geração.

Tabela 4.4- Plano final de expansão para o sistema de Garver sem redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
2-6	4
4-6	2
3-5	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$200.000.000,00, construindo-se sete circuitos novos em três caminhos selecionados. A Figura 4.4 ilustra o gráfico de convergência do processo de otimização bioinspirado, sendo gasto 180 segundos de simulação computacional.

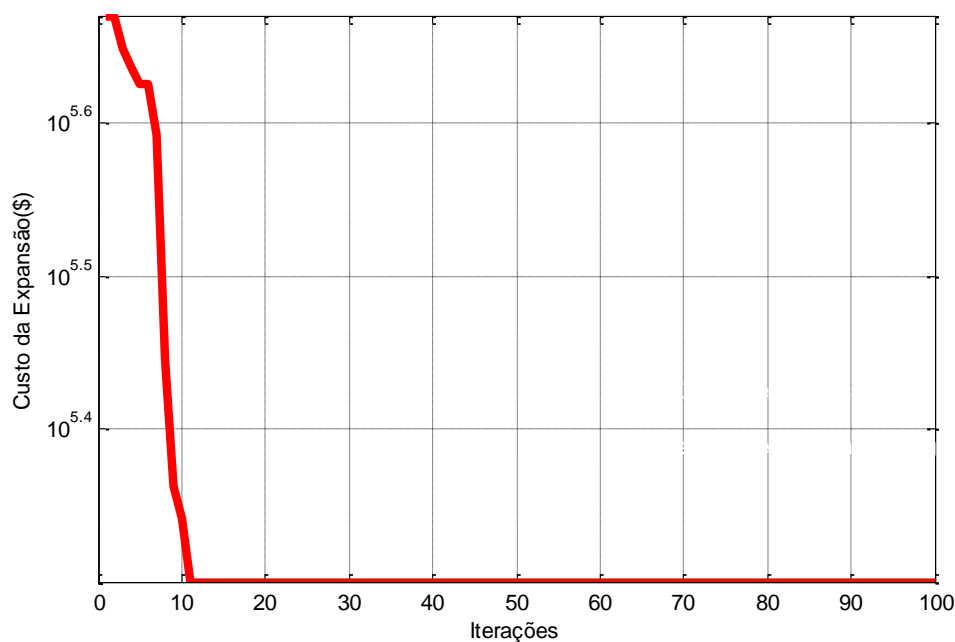


Figura 4.4- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema de Garver sem Redespacho.

Ao analisar a Figura 4.4 depreende-se que o enxame encontra a solução final com um pouco mais de dez iterações, mostrando-se eficiente e rápido no processo de busca.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC.

Neste caso, simulou-se o AHC 50 vezes e construiu-se um conjunto formado pelas rotas de expansão seleccionadas. Desta forma, foram seleccionadas quatro rotas das quinze possíveis, Tabela 4.5, reduzindo o número de combinações possíveis de investimento para $5^4 = 625$.

Tabela 4.5- Rotas propostas pelo AHC

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
4-6, 2-6, 3-5, 5-6

O plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema de Garver sem redespacho de geração, considerando as rotas pré-seleccionadas pelo AHC, é dado pela Tabela 4.4. Esta solução representa um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a *US\$200.000.000,00*. A Figura 4.5 ilustra o gráfico de convergência do processo de otimização bioinspirado, sendo gasto 237 segundos de simulação computacional, tempo superior ao caso anterior pelo fato de simular o AHC 50 planos. Comparando a convergência obtida nesta segunda análise com a primeira, verifica-se que houve uma eficiência na obtenção da solução ótima com a redução do espaço de busca. Com as rotas oriundas do AHC, o Enxame de Partículas obteve a solução ótima mais rápida, quinta iteração.

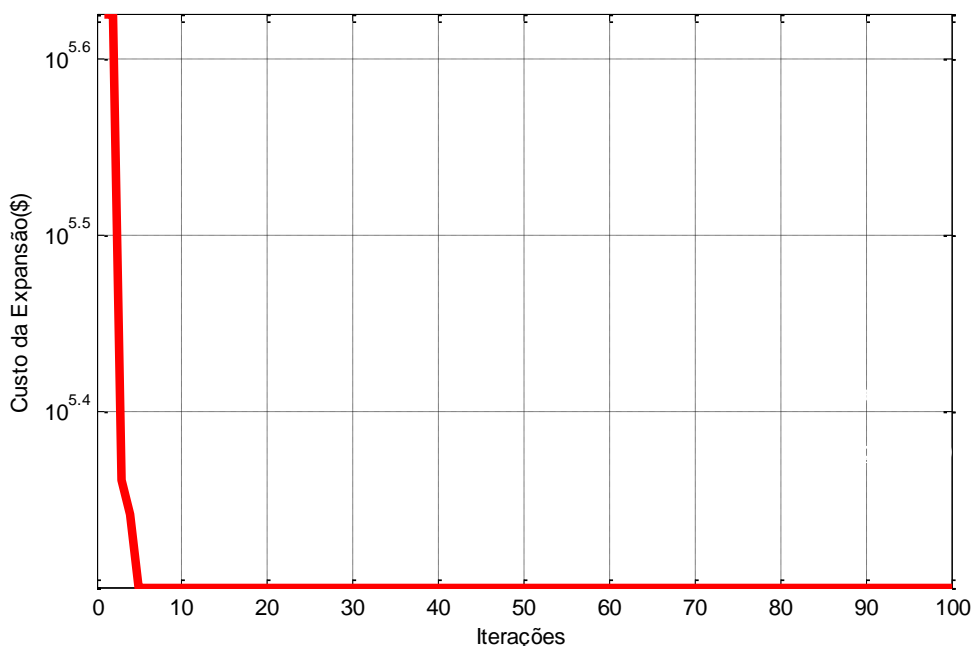


Figura 4.5- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema de Garver sem Redespacho.

C) 3ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC e das Soluções Obtidas pelo AHC.

O plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema de Garver sem redespacho de geração, considerando as rotas pré-seleccionadas e as soluções obtidas pelo AHC, também é dado pela Tabela 4.4, sendo obtida a mesma solução das análises anteriores, com um plano de expansão de *US\$* 200.000.000,00 .

A Figura 4.6 ilustra o gráfico de convergência do processo de otimização, sendo gasto aproximadamente 241 segundos de simulação computacional. Nesta análise verifica-se que a solução ótima foi encontrada na primeira iteração do processo de busca. Este fato deve-se a qualidade da redução do espaço de busca e as soluções finais geradas pelo AHC.

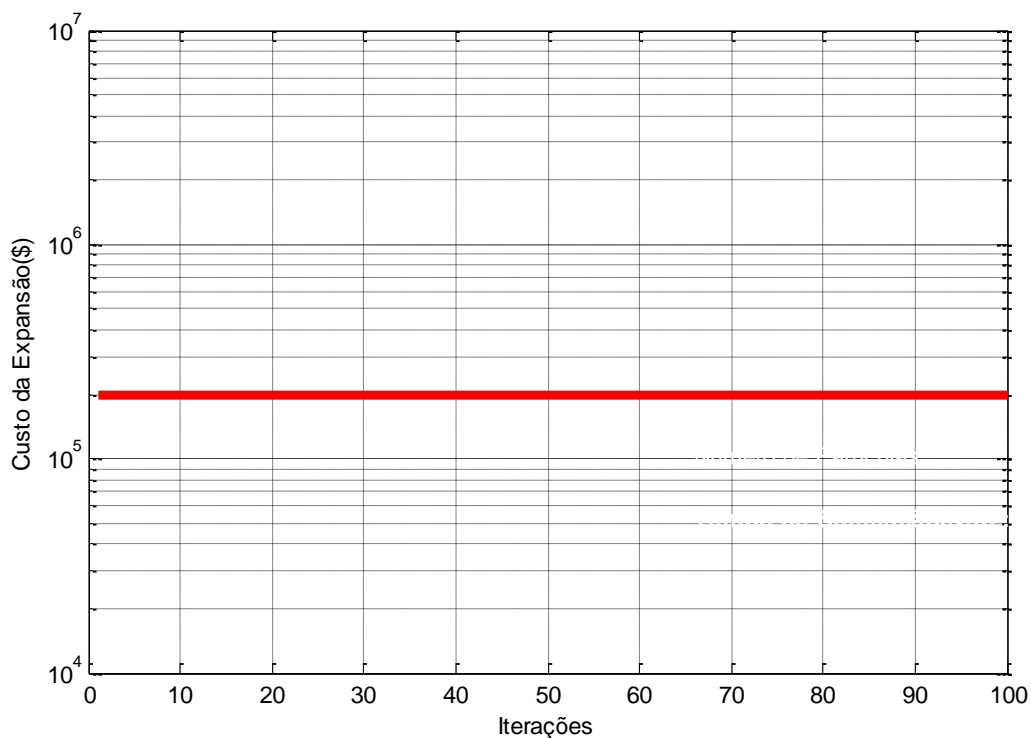


Figura 4.6- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema de Garver sem Redespacho.

A solução encontrada pela metodologia proposta, Tabela 4.4, corresponde à solução ótima global conhecida para o sistema de Garver sem redespacho de geração, sendo confirmada pelas referências [13], [15], [18] e [29].

4.3 SISTEMA SUL EQUIVALENTE

Este sistema real, porém antigo sendo este utilizado para efeito de comparação com a literatura, formado originalmente por 46 barras, das quais 11 barras estão isoladas, 66 circuitos existentes na topologia base, 79 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 6880 MW. Este sistema foi proposto inicialmente em [6] e vem sendo muito utilizado para validar os resultados de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão.

Novamente serão consideradas duas situações, onde na primeira análise será permitido o redespacho das unidades geradoras e na segunda, as unidades geradoras terão os despachos de potência pré-determinados.

- **Caso 1: Sistema Sul com Redespacho de Geração**

Para este caso tem-se um número total de $3^{79} \approx 5.10^{37}$ combinações possíveis de investimento, demonstrando a dificuldade da obtenção do ponto de mínimo global. Foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 2 expansões por caminho candidato (iii) enxame composto por 150 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações. A seguir estão novamente dispostas as três simulações realizadas para o sistema Sul com redespacho.

A) 1ª Simulação: Consideração de Todas as Rotas Candidatas à Expansão

Neste caso foram consideradas todas as 79 rotas candidatas à expansão, vide apêndice A. A Tabela 4.6 apresenta o plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema equivalente da região Sul do Brasil com redespacho de geração. Destaca-se que foram resolvidos 15.000 problemas de otimização na busca do plano de expansão mais econômico.

Tabela 4.6- Plano final de expansão para o sistema Sul com redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
46-06	1
20-21	2
05-06	2
42-43	1
20-23	1
13-20	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$70.289.000,00. A Figura 4.7 apresenta a evolução do processo de otimização bioinspirado com a construção final de oito novos circuitos de transmissão que atendem à demanda de forma adequada, sendo necessários 420 segundos de simulação computacional. Pode-se verificar analisando o gráfico abaixo que a solução final foi encontrada com um pouco mais de noventa iterações.

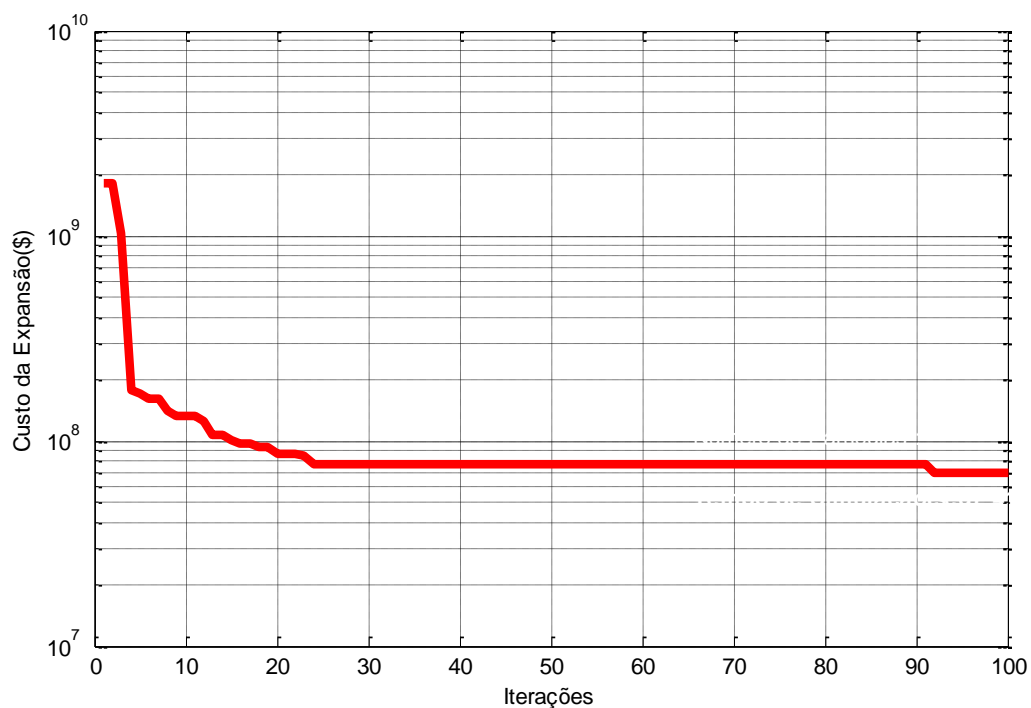


Figura 4.7- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sul com Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC.

Neste caso o AHC foi usado com a finalidade de reduzir o espaço de busca do enxame e assim, proporcioná-lo maior rapidez e eficiência ao processo de busca. Neste caso fez-se 50 simulações do AHC e, posteriormente, reuniram-se as rotas seleccionadas em cada simulação, sendo estas consideradas, pela metodologia proposta, indispensáveis à expansão. Desta forma, foram seleccionadas apenas 20 rotas das 79 possíveis, redução de aproximadamente 75% das alternativas de expansão. A Tabela 4.7 apresenta as rotas seleccionadas pelo AHC e que serão entregues ao enxame.

Tabela 4.7- Rotas propostas pelo AHC

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
13-20, 1-7, 1-2, 13-18, 19-21, 20-23, 18-19, 20-21, 42-43, 46-10, 5-11, 46-6, 46-3, 21-25, 46-11, 24-25, 40-41, 2-3, 5-6, 9-10.

O plano final de expansão obtido pelo enxame de partículas, para o sistema Sul, considerando as rotas sinalizadas pelo AHC é dado na Tabela 4.6. Desta forma, obteve-se um custo total de investimento no sistema de transmissão de *US\$70.289.000*, isto é, mesmo resultado obtido da simulação anterior. Entretanto, como pode ser observada pela Figura 4.8, a solução foi obtida pelo enxame na 45ª iteração, sendo gastos cerca de 1005 segundos de simulação total.

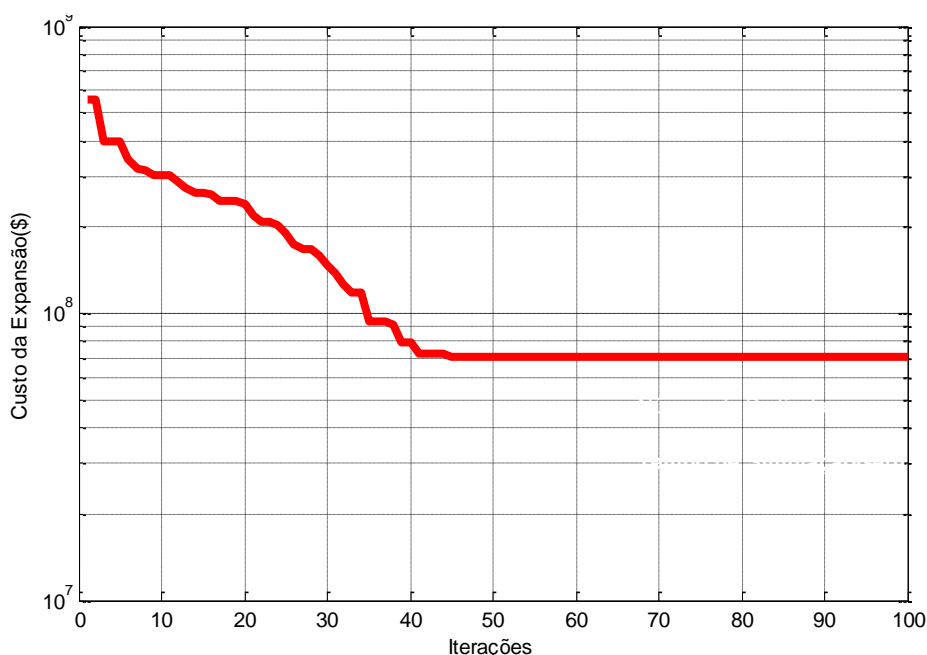


Figura 4.8 Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sul com Redespacho.

C) 3ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC e das Soluções Obtidas pelo AHC.

Nesta terceira simulação foram consideradas as rotas candidatas pré-seleccionadas pelo AHC e as soluções finais de expansão obtidas pelo AHC. Desta forma, o processo de otimização bioinspirado obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$70.289.000, referente à construção de oito novos circuitos, vide Tabela 4.6. Destaca-se, novamente, que a solução aqui encontrada é a mesma obtida anteriormente. Entretanto, a inicialização do enxame com as informações oriundas do AHC verifica-se, Figura 4.9, a eficiência do processo de busca do enxame, isto é, a solução ótima foi encontrada na 16ª iteração em 1045 segundos.

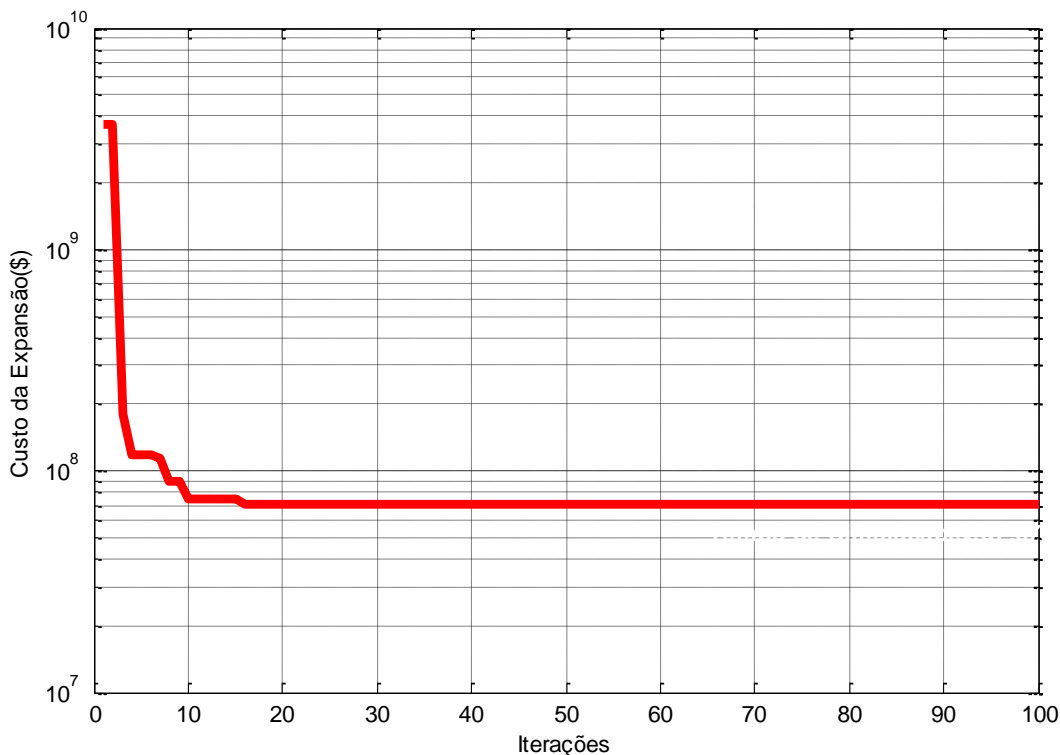


Figura 4.9- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no sistema Sul com redespacho

A Tabela 4.8 apresenta uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos na literatura especializada, sendo \$70.289.000,00 a solução ótima global conhecida para o sistema equivalente da região sul do Brasil com redespacho de geração.

Tabela 4.8- Comparação entre os custos de investimento: Sistema sul com redespacho

Sistema Sul Equivalente com Redespacho de Geração	
Algoritmos de Solução	Custo Total de Investimento (em milhões de dólares)
Algoritmo de Mínimo Corte de Carga [8]	102,300
Metaheurísticas [26]	72,870
Decomposição de Benders [10]	70,289
Branch and Bound [13]	70,289
Algoritmo Proposto	70,289

- **Caso 2: Sistema Sul sem Redespacho de Geração**

A melhor solução para este caso foi inicialmente publicada em [16] por Romero e Monticelli e posteriormente confirmada por Binato [14] como sendo o plano de expansão ótimo global. O custo total deste plano de expansão é de US\$154.420.000,00, que corresponde à adição de 16 novos circuitos a topologia base.

Para simulação da metodologia proposta foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 3 expansões por caminho candidato (iii) enxame composto por 150 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações. Este sistema apresenta um número total de $4^{79} \approx 3.10^{47}$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão.

A) 1ª Simulação: Consideração de Todas as Rotas Candidatas à Expansão.

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, isto é, as 79 rotas candidatas, vide apêndice A. A Tabela 4.9 apresenta o plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema Sul sem redespacho de geração.

Tabela 4.9- Plano final de expansão para o sistema Sul sem redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
32-43	1	25-32	1
44-45	1	31-32	1
20-21	1	28-31	1
42-43	2	24-25	2
46-06	1	05-06	2

A topologia final apresenta um custo total de investimento na transmissão de US\$173.200.000,00, com o tempo de simulação total de 799 segundos, de acordo com a Tabela 4.9, observa-se que este custo foi encontrado aproximadamente na 68ª iteração.

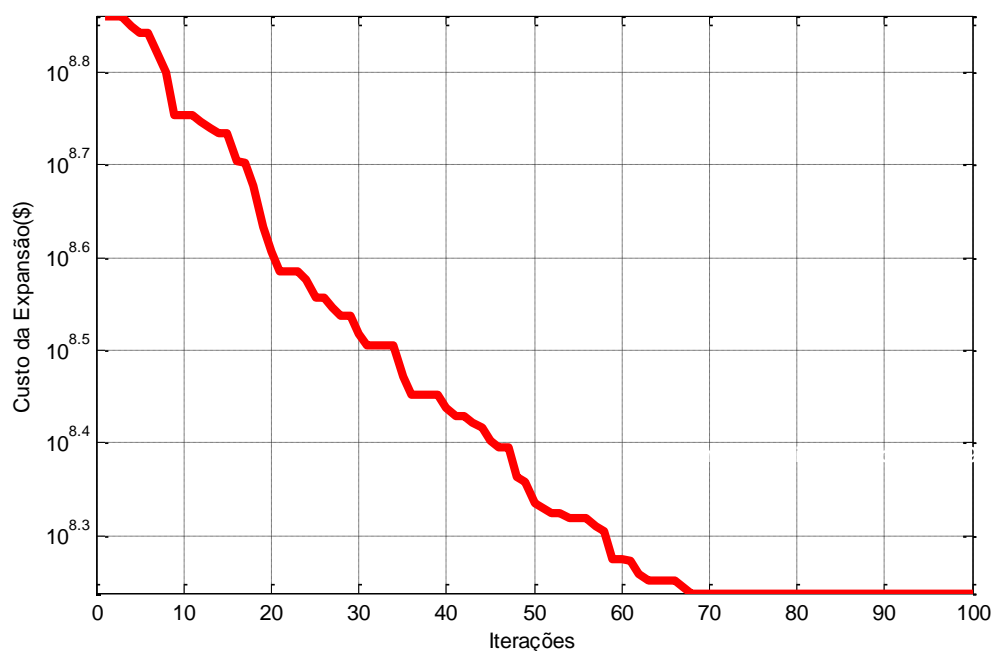


Figura 4.10- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sul sem Redespacho.

Assim verifica-se que para este caso não foi encontrado a solução ótima, utilizando todas as rotas candidatas à expansão, ou seja, sem utilizar as informações do AHC.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC.

Neste caso fez-se o uso do AHC para reduzir o espaço de busca do Enxame de Partículas. Desta forma foram seleccionadas 30 rotas de 79 possíveis, vide Tabela 4.10, reduzindo o número de combinações possíveis de investimento para $4^{30} = 10^{18}$.

Tabela 4.10- Rotas propostas pelo AHC

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
29-30, 1-7, 1-2, 4-9, 18-20, 19-21, 17-19, 20-23, 40-42, 32-43, 20-21, 42-43, 46-6, 46-3, 16-28, 19-25, 21-25, 31-32, 28-31, 28-30, 27-29, 26-29, 28-41, 31-41, 41-43, 24-25, 40-41, 2-3, 5-6, 9-10

A Tabela 4.11 apresenta o plano final de expansão alcançado pela metodologia proposta para o sistema Sul sem redespacho de geração que obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$154.420.000,00.

Tabela 4.11- Plano final de expansão para o sistema de Sul sem redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
42-43	2	29-30	2
20-21	1	19-25	1
05-06	2	28-30	1
24-25	2	26-29	3
46-06	1	31-32	1

A Figura 4.11 apresenta o gráfico de convergência do processo de busca via otimização bioinspirada, solução ótima foi encontrada na 38ª iteração. O tempo total de simulação foi de aproximadamente de 2186 segundos, tempo superior a análise anterior, pelo fato de gerar 50 planos factíveis com o AHC.

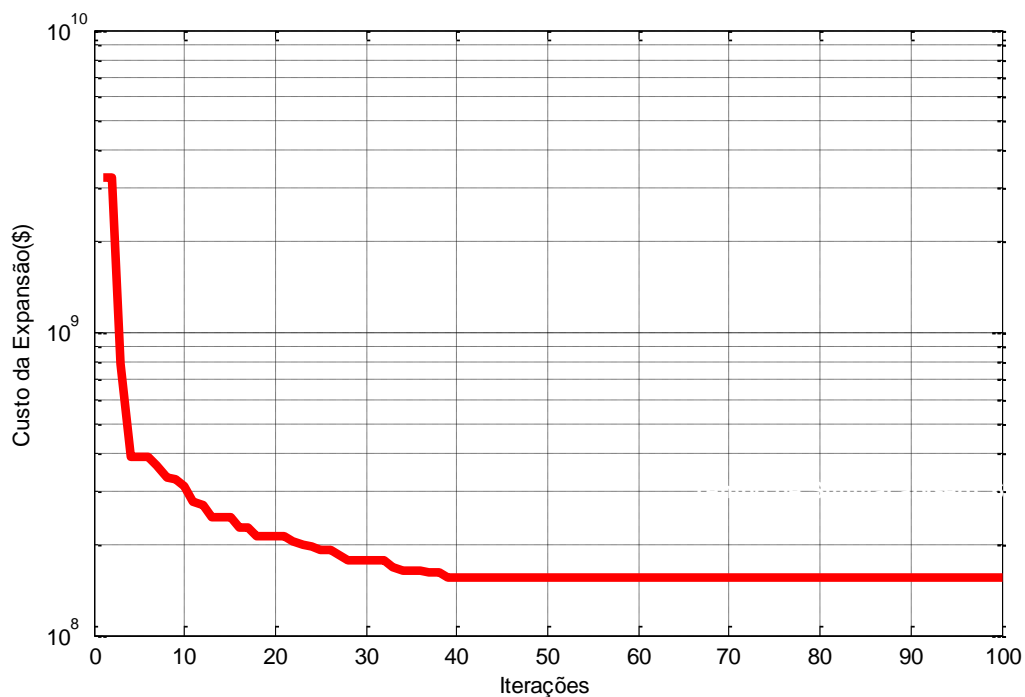


Figura 4.11- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sul sem Redespacho.

C) 3ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC e das Soluções Obtidas pelo AHC.

Novamente, utilizou-se o AHC, ou seja, o conjunto reduzido de rotas relevante à expansão e as soluções finais que são fornecidas ao Enxame de Partículas.

A metodologia proposta apresenta o plano final de expansão obtido para o sistema Sul sem redespacho de geração, vide Tabela 4.11, o qual obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$154.420.000,00.

Através da Figura 4.12, verifica-se a convergência na 11ª iteração, com o tempo total de simulação de 2105 segundos. Esta eficiência no processo de convergência se deve a qualidade da redução do espaço de busca e das soluções geradas pelo AHC.

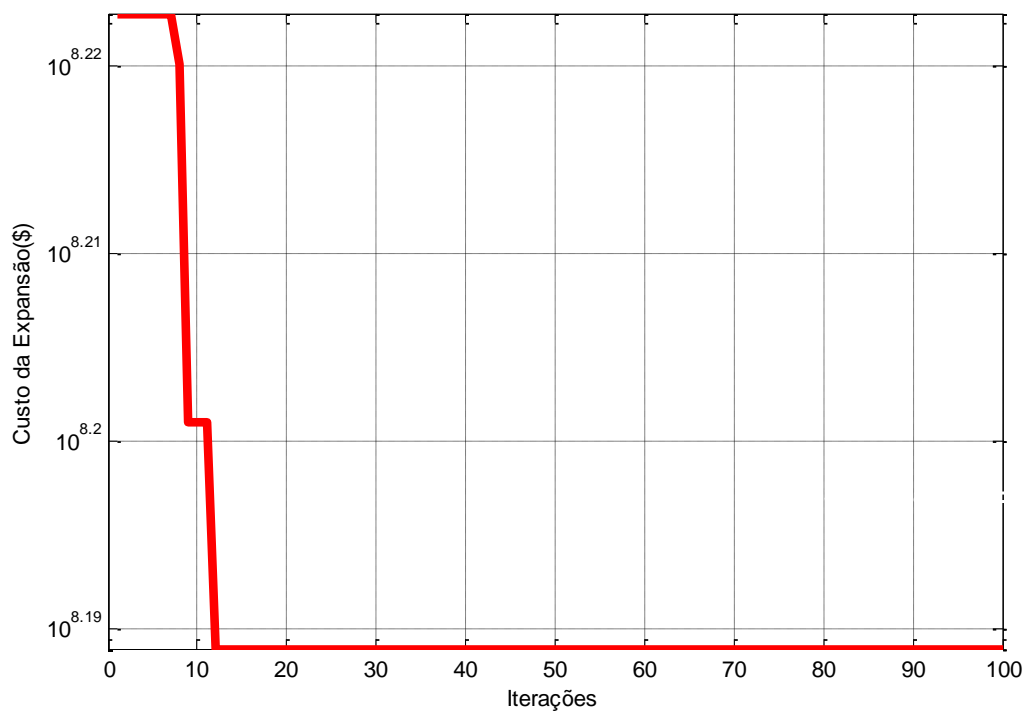


Figura 4.12- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sul sem Redespacho.

Destaca-se que, para a segunda e terceira simulação utilizando a metodologia proposta encontrou-se a melhor solução, isto é, *US\$154.420.000,00* como custo de investimento na transmissão.

A solução encontrada acima, pela metodologia proposta, corresponde à solução ótima global conhecida para o sistema Sul sem redespacho de geração, sendo confirmada pelas referências [9], [13], [16], [18] e [25].

A Figura 4.13 abaixo corresponde ao sistema Sul equivalente, onde as linhas tracejadas representam as expansões realizadas para o caso sem redespacho de geração.

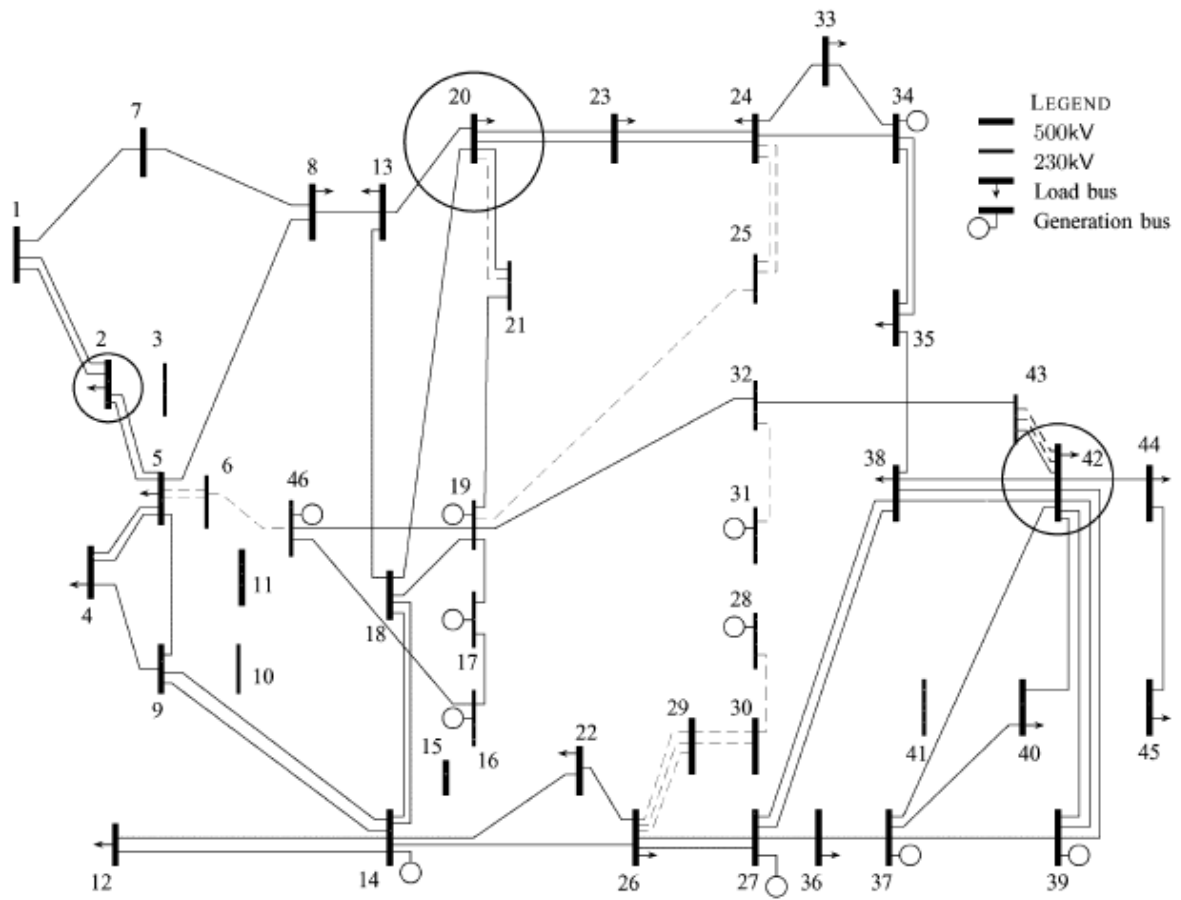


Figura 4.13- Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil.

4.4 SISTEMA SUDESTE EQUIVALENTE

O sistema equivalente da região Sudeste do Brasil é ilustrado pela Figura 4.14.

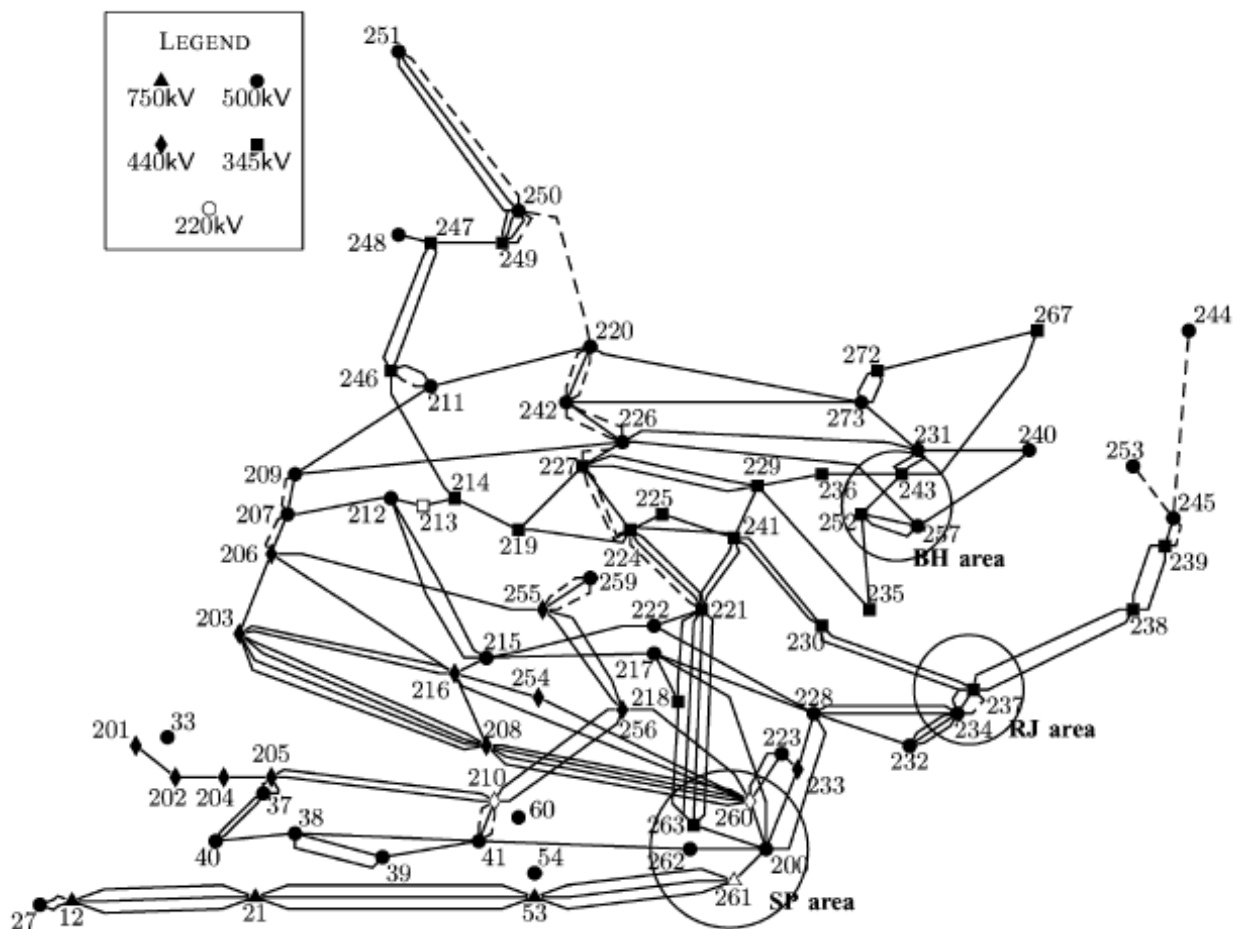


Figura 4.14- Sistema Equivalente da Região Sudeste Brasileira.

A Eletrobrás propôs este sistema em 1987, para estudos de planejamento de expansão da região sudeste para os anos de 1995, 2000 e 2005. O sistema aqui analisado corresponde ao ano de 2000 e será abordada a situação sem redespacho de geração, por ser a configuração explorada na literatura.

- **Caso 1: Sistema Sudeste Equivalente sem Redespacho de Geração**

Este sistema é formado por 79 barras, das quais 8 barras estão isoladas, trazendo maior dificuldade ao problema, 155 circuitos existentes na topologia base, 143 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 37999 MW. Para este caso, foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1% de sobrecarga para os circuitos do sistema de transmissão; (ii) um número máximo de 3 expansões por caminho candidato (iii) enxame composto por 350 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações. Para este caso tem-se

um número total de $4^{143} \approx 10^{86}$ combinações possíveis de investimento. Assim, serão resolvidos 35.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima global.

A) 1ª Simulação: Consideração de Todas as Rotas Candidatas à Expansão.

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, ou seja, as 143 rotas candidatas, vide apêndice A. A Tabela 4.12 apresenta a topologia final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema Sudeste sem redespacho de geração.

Tabela 4.12- Plano final de expansão para o sistema Sudeste sem redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
207-206	1	213-214	1
234-237	1	215-217	1
226-242	1	233-223	1
224-227	1	235-252	2
210-041	2	243-252	1
211-246	1	265-266	1
220-242	1	209-212	1
245-239	1	211-212	2
214-218	2	216-215	1
039-041	1	220-250	1
200-217	2	231-250	1
202-204	1	235-237	2
212-213	1	245-253	1
212-215	1	-	-

A topologia final considerando todas as linhas candidatas à expansão apresentou um custo total de investimento na transmissão de US\$588.700.000,00. A Figura 4.15 apresenta a evolução do algoritmo bioinspirado, com o tempo total de simulação de 4346 segundos.

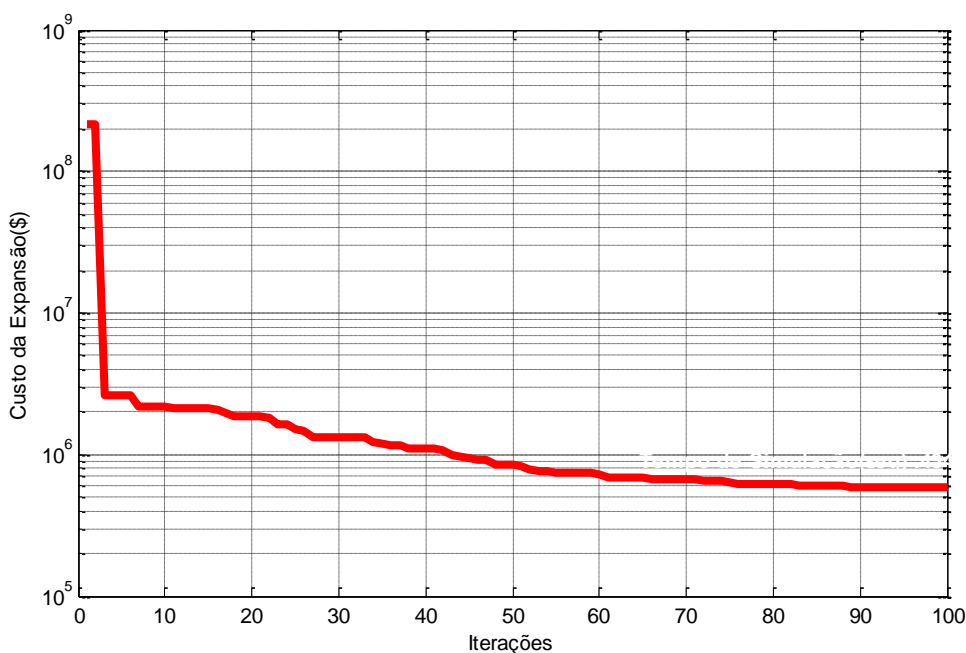


Figura 4.15- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sudeste sem Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC.

Neste caso fez-se o uso do AHC para reduzir o espaço de busca do enxame. Foram seleccionadas pelo AHC 42 de 143 rotas candidatas, uma redução de aproximadamente 70% das alternativas de expansão, Tabela 4.13, reduzindo assim o número de combinações possíveis de investimento deste caso para $4^{42} = 10^{25}$.

Tabela 4.13- Rotas propostas pelo AHC

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
207-209, 207-206, 234-237, 226-242, 226-227, 226-259, 224-227, 210-041, 221-224, 211-246, 220-242, 245-239, 249-250, 250-251, 214-218, 214-246, 037-205, 038-040, 039-041, 037-040, 200-228, 200-260, 200-261, 200-262, 202-204, 212-213, 212-215, 213-214, 215-217, 262-218, 211-212, 216-215, 220-250, 222-226, 231-250, 240-244 240-253, 244-245, 245-253, 248-247, 248-250, 255-259

A Tabela 4.14 apresenta o plano final de expansão obtido para o sistema Sudeste sem redespacho de geração, considerando as rotas pré-seleccionadas pelo AHC o qual obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$396.160.000,00, construção de 26 novos circuitos.

Tabela 4.14- Plano final de expansão para o sistema Sudeste sem redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
226-242	1	202-204	1
226-259	1	212-215	2
221-224	1	262-218	1
211-246	1	211-212	2
220-242	1	216-215	2
214-218	3	245-253	1
214-246	2	248-247	2
037-205	1	248-250	1
038-040	1	255-259	1
039-041	1	-	-

A Figura 4.16 apresenta a evolução da metodologia proposta, com o tempo de simulação de 11823 segundos e encontra a solução final na 43ª iteração, que reflete a importância da redução eficiente das rotas candidatas.

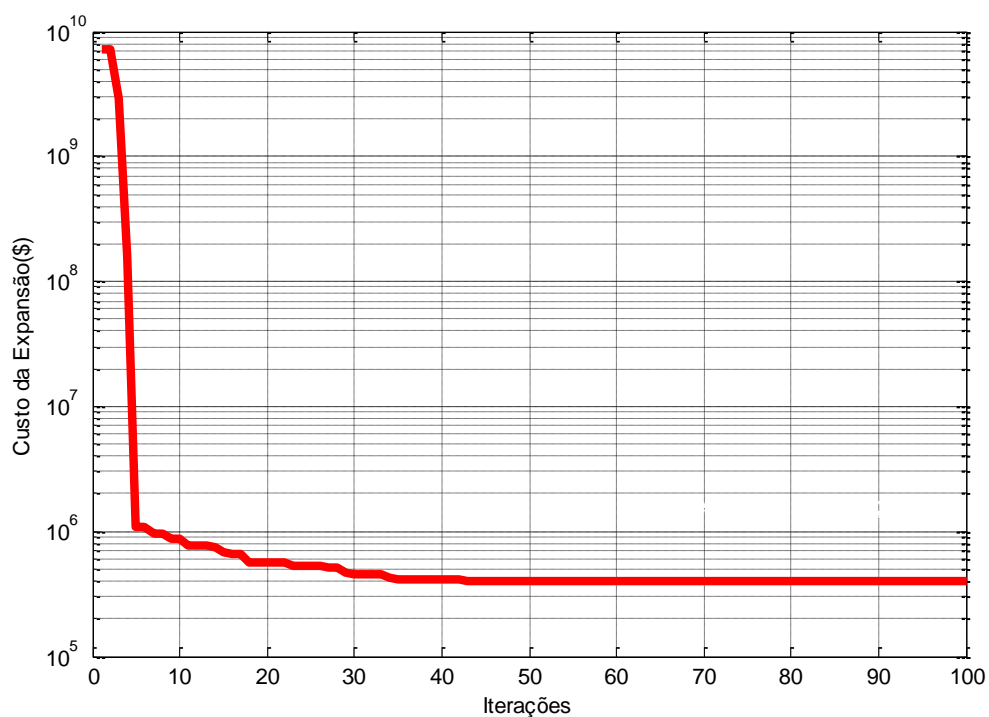


Figura 4.16- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sudeste sem Redespacho.

C) 3ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHC e das Soluções Obtidas pelo AHC.

Novamente, usou-se o AHC, isto é, o conjunto reduzido de rotas indispensáveis à expansão, e as soluções finais são fornecidas ao Enxame de Partículas. Foram utilizadas 350 partículas, compondo o enxame, sendo 50 obtidas via AHC e as demais aleatoriamente.

A Tabela 4.15 apresenta o melhor plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema Sudeste sem redespacho de geração. Foi alcançada uma solução melhor que das análises anteriores, este fato se deve ao uso das informações advindas do AHC.

Tabela 4.15- Plano final de expansão para o sistema Sudeste sem redespacho

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
207-209	1	214-246	2
207-206	1	202-204	1
226-242	1	212-215	1
226-259	1	262-218	1
210-041	2	211-212	1
221-224	2	216-215	3
211-246	3	220-250	1
220-242	1	245-253	1
249-250	1	255-259	1
214-218	3	-	-

Obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$382.920.000,00, com o tempo de simulação total de aproximadamente 10761 segundos, conforme a Figura 4.17, esta solução foi obtida 43ª iteração com a construção de 28 novos circuitos.

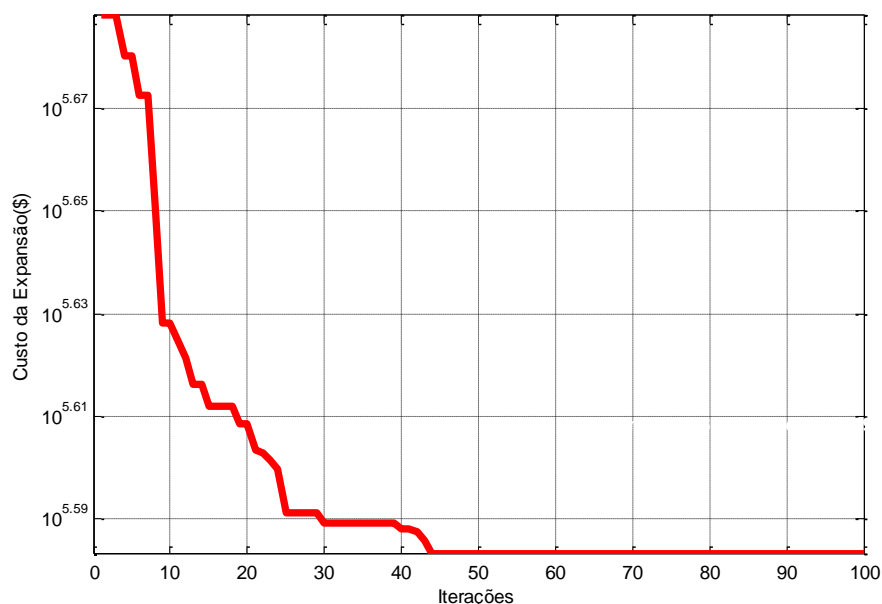


Figura 4.17- Evolução do Algoritmo de Enxame de Partículas no Sistema Sudeste sem Redespacho.

A Tabela 4.16 apresenta uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos pelos principais algoritmos existentes na literatura especializada. São estes (i) GRASP [25]; (ii) Algoritmo Heurístico Construtivo [9]; (iii) Metaheurística Híbrida [27]; (iv) Busca Tabu [28]; (v) Modelagem Mista Inteira Disjuntiva [17]; (vi) Algoritmo de decomposição Matemática [14].

Tabela 4.16- Comparação entre os custos de investimentos: Sistema sudeste equivalente

Sistema Sudeste Equivalente sem Redespacho de Geração	
Algoritmos Utilizados	Custo Total de Investimento (em milhões de dólares)
GRASP	512,800
Algoritmo Heurístico Construtivo	470,800
Metaheurística Híbrida	425,000
Busca Tabu *	444,490
Modelagem Mista Inteira Disjuntiva *	422,000
Algoritmo de Decomposição Matemática *	422,000
Algoritmo Proposto	382,920

* permitem sobrecargas excessivas no sistema de transmissão de até 10%.

As rotas selecionadas para o sistema Sudeste nas simulações B e C, onde se encontrou custos menores que os apresentados na literatura, foram testadas através de um algoritmo de

fluxo de potência ótimo, utilizando o modelo linearizado de rede, onde as rotas selecionadas pelo algoritmo bioinspirado foram incorporadas ao sistema, passando assim a fazer parte da configuração base e verificado se o mesmo atende a demanda de forma satisfatória, ou seja, sem cortes de carga, como forma de avaliar e validar o desempenho da metodologia proposta.

Devido à aleatoriedade do processo heurístico, principalmente ao analisar sistemas maiores, muitas das vezes não é possível encontrar o mesmo resultado para várias simulações, portanto considerando o sistema Sudeste sendo o maior sistema em análise, optou-se por simulá-lo dez vezes considerando as informações do AHC, isto é, rotas selecionadas por este e soluções finais e fazer uma média com os valores encontrados para o investimento na expansão da transmissão, segue na Tabela 4.17.

Tabela 4.17- Média dos resultados encontrados para o sistema Sudeste

SIMULAÇÕES	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (milhões de dolares)
1	431,700
2	416,500
3	396,300
4	431,800
5	402,980
6	399,800
7	391,280
8	402,080
9	391,280
10	382,920
MÉDIA	404,664

Para este caso, a melhor solução obtida é encontrada em [14] e [17], com investimento de US\$422.000.000,00 sendo considerada a melhor solução conhecida para este caso [27]. Entretanto, estes trabalhos permitem sobrecargas de até 10% em alguns circuitos do sistema de transmissão [27]. Do ponto de vista operacional, não é muito adequada à permissão destas sobrecargas no sistema de transmissão, pois se deve ter em mente que os planos de expansão obtidos serão posteriormente testados através do fluxo de carga CA e as topologias

encontradas podem ficar muito distantes da realidade. Quando se permitem sobrecargas no sistema elétrico, mesmo que pequenas, o custo de investimento na transmissão pode apresentar reduções significativas e ser mais atrativo que determinados planos de expansão obtidos sem sobrecarga. Assim, como a metodologia proposta não permite sobrecargas excessivas na rede, e destaca-se que foi obtido o menor investimento *US\$382.920.000* dentre as soluções apresentadas pela literatura, Tabela 4.16, mesmo avaliando o valor da média das simulações, Tabela 4.17, têm um investimento menor que os demais encontrados na literatura especializada. Sendo que para o planejamento estático da expansão dos sistemas de transmissão pode-se considerar somente a melhor solução encontrada.

4.5 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

O programa computacional desenvolvido nesta dissertação foi implementado em MATLAB e o ambiente computacional utilizado para o processamento dos casos foi um Intel Core I7, 2.93 Ghz e 8 Gb.

4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

O capítulo 4 ilustrou os resultados obtidos pela metodologia proposta através de um sistema acadêmico e dois sistemas reais equivalentes às regiões sul e sudeste do Brasil. Para cada um destes, com exceção do sistema equivalente da região sudeste, foram consideradas duas situações: (i) com redespacho de geração, isto é, permitindo que as unidades geradoras modifiquem seus pontos de operação; (ii) sem redespacho de geração, ou seja, com ponto de operação pré-determinado. E dentro destas duas situações foram feitos testes para analisar a eficiência da metodologia proposta.

Através dos resultados obtidos, pode-se verificar o bom desempenho da metodologia em relação aos principais algoritmos existentes na literatura e a eficiência da heurística adotada. Para o sistema sudeste equivalente, sem a permissão de sobrecargas excessivas no sistema de

transmissão, o algoritmo proposto obteve resultado excelente, que foi comparado com a literatura especializada na Tabela 4.16. Diante destes resultados pode se concluir que a combinação da técnica de otimização bioinspirada e as soluções iniciais advindas do AHC são promissoras. A Tabela 4.18 apresenta de forma resumida as informações obtidas para o sistema Sul e Sudeste: o custo de investimento, a iteração na qual foi obtido o custo o final (solução ótima) e o tempo de simulação computacional do Algoritmo Heurístico Construtivo e do Enxame de Partículas.

Tabela 4.18- Comparação para as análises feitas para o sistema Sul e Sudeste

Sistema Sul Equivalente com Redespacho de Geração				
SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO AHC (s)	TEMPO ENXAME (s)
PRIMEIRA	70,289	92 ^a	-	420
SEGUNDA	70,289	45 ^a	629	376
TERCEIRA	70,289	16 ^a	629	416
Sistema Sul Equivalente sem Redespacho de Geração				
SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO AHC (s)	TEMPO ENXAME (s)
PRIMEIRA	173,200	68 ^a	-	799
SEGUNDA	154,420	38 ^a	1511	675
TERCEIRA	154,420	11 ^a	1511	594
Sistema Sudeste Equivalente sem Redespacho de Geração				
SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO AHC (s)	TEMPO ENXAME (s)
PRIMEIRA	588,700	90 ^a	-	4346
SEGUNDA	396,160	43 ^a	6822	5001
TERCEIRA	382,920	43 ^a	6822	3939

Conforme exposto na Tabela 4.18, verifica-se a eficiência da metodologia proposta, destacando a terceira simulação, a qual faz uso de todas as informações do AHC. O algoritmo proposto aumentou a eficiência do processo de busca bioinspirado, com destaque para o sistema equivalente da região sudeste do Brasil, obtendo solução mais econômica do que a divulgada na literatura especializada.

5 CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES FINAIS

No presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia para a resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, sendo esta dividida em duas etapas. Na primeira utilizou-se um algoritmo heurístico construtivo [9], onde a variável decisão de expansão é mitigada por uma função contínua, sendo esta introduzida ao modelo de fluxo de carga CC através da metodologia primal-dual de pontos interiores. Esta primeira etapa tem por finalidade, na metodologia proposta, determinar um conjunto reduzido de rotas candidatas à expansão e assim, diminuir de maneira eficiente o espaço de busca. Já na segunda etapa, o processo de otimização baseado no enxame de partículas faz uso do conjunto de rotas selecionadas na primeira etapa e também as soluções finais oriundas do algoritmo heurístico construtivo de modo a melhorar a eficiência do processo de otimização bioinspirado.

Os resultados apresentados apontam para um aumento da eficiência do processo de busca do enxame de partículas através da etapa heurística adotada. Destaca-se que para o sistema equivalente da região sudeste do Brasil, sem a permissão de sobrecargas excessivas na rede de transmissão, procedimento muito encontrado na literatura [14], [17], a metodologia proposta obteve excelente desempenho, gerando um plano de expansão mais econômico do que os encontrados na literatura especializada. Este fato se deve principalmente a redução, com qualidade, das rotas de expansão, diminuindo a explosão combinatória inerente ao problema e aumentando a eficiência do enxame na obtenção de soluções de melhor qualidade.

Diante dos resultados obtidos, os seguintes aspectos podem ser enfatizados:

- A utilização do algoritmo heurístico construtivo, visando à redução do espaço de busca e a inicialização do processo bioinspirado, foi capaz de proporcionar a obtenção de soluções ótimas, com um número reduzidos de partículas;
- O aumento do número de partículas tende a melhorar a qualidade das soluções obtidas, mas não garante a obtenção do ótimo global. No entanto, o

esforço computacional torna-se um fator preocupante, principalmente, para sistemas com um número elevado de rotas candidatas e com a opção de construção de muitos circuitos;

- Apesar do excelente desempenho na redução das rotas candidatas à expansão deve-se ter em mente que a heurística utilizada não garante a otimalidade do conjunto de rotas selecionadas. Porém, como conclusão deste trabalho, pode ser empregada na geração de planos iniciais de expansão, pois se sabe que a eficiência do processo de busca é função das soluções iniciais factíveis;
- A metodologia se mostra promissora para sistemas grandes, conforme foi verificado no sistema Sudeste;
- A garantia de obtenção do ponto de mínimo global só pode ser obtida através da enumeração de todas as combinações possíveis de investimento, o que nem sempre é possível devido ao elevado tempo de processamento e armazenamento de memória.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Neste item são apresentadas de forma geral, algumas sugestões de possíveis temas para desenvolvimentos futuros, visando dar continuidade ao presente trabalho. As principais são:

- Inclusão das perdas ativas inerentes ao sistema de transmissão de energia elétrica e a influência destas no problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão;
- Estudo do planejamento dinâmico da expansão de sistemas de transmissão, isto é, a determinação de “quando” as expansões devem entrar em operação de modo a garantir o atendimento confiável e econômico da demanda prevista para o horizonte de planejamento;
- Implementação computacional do algoritmo de enxame de partículas dedicado a problemas discretos, [46], [47];
- A inclusão da análise de contingências no planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

APÊNDICE A

Dados dos Sistemas de Transmissão

A.1 Considerações Iniciais

Neste apêndice são apresentados os dados dos sistemas elétricos de potência utilizados nesta dissertação para validar a metodologia proposta. Assim, para cada sistema serão apresentadas três tabelas: (i) dados de geração e carga; (ii) dados dos circuitos existentes na topologia base; (iii) dados sobre os caminhos e circuitos candidatos à expansão. Em relação aos custos dos geradores fictícios adotou-se o valor de 900 US\$/MWh em todas as simulações realizadas.

A.2 Sistema de Garver

Níveis de Geração e Carga			
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	150	50	80
2	0,0	0,0	240
3	360	165	40
4	0,0	0,0	160
5	0,0	0,0	240
6	600	545	0,0

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-2	1	40	100
1-4	1	60	80
1-5	1	20	100
2-3	1	20	100
2-4	1	40	100
3-5	1	20	100

Circuitos Candidatos			
Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
1-2	40	100	40
1-4	60	80	60
1-5	20	100	20
2-3	20	100	20
2-4	40	100	40
3-5	20	100	20
1-3	38	100	38
1-6	68	70	68
2-5	31	100	31
2-6	30	100	30
3-4	59	82	59
3-6	48	100	48
4-5	63	75	63
4-6	30	100	30
5-6	61	78	61

A.3 Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil

Níveis de Geração e Carga			
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	443,1
3	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	300,7
5	0,0	0,0	238
6	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	72,2
9	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	511,9
13	0,0	0,0	185,8
14	1257	944	0,0
15	0,0	0,0	0,0
16	2000	1366	0,0
17	1050	1000	0,0
18	0,0	0,0	0,0
19	1670	773	0,0
20	0,0	0,0	1091
21	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	81,9

Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
23	0,0	0,0	458,1
24	0,0	0,0	478,2
25	0,0	0,0	0,0
26	0,0	0,0	231,9
27	220	54	0,0
28	800	730	0,0
29	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0
31	700	310	0,0
32	500	450	0,0
33	0,0	0,0	229,1
34	748	221	0,0
35	0,0	0,0	216,0
36	0,0	0,0	90,1
37	300	212	0,0
38	0,0	0,0	216
39	600	221	0,0
40	0,0	0,0	262,1
41	0,0	0,0	0,0
42	0,0	0,0	1607
43	0,0	0,0	0,0
44	0,0	0,0	79,1
45	0,0	0,0	86,7
46	700	599	0,0

Circuitos Existentes na Topologia Base

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-7	1	6,16	270
1-2	2	10,65	270
4-9	1	9,24	270
5-9	1	11,73	270
5-8	1	11,32	270
7-8	1	10,23	270
4-5	2	5,66	270
2-5	2	3,24	270
8-13	1	13,48	240
9-14	2	17,56	220
12-14	2	7,40	270
14-18	2	15,14	240
13-18	1	18,05	220
13-20	1	17,03	270
18-20	1	19,97	200
19-21	1	2,78	1500
16-17	1	0,78	2000
17-19	1	0,61	2000

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
14-26	1	16,14	220
14-22	1	8,40	270
22-26	1	7,90	270
20-23	2	9,32	270
23-24	2	7,74	270
26-27	2	8,32	270
24-34	1	16,47	220
24-33	1	14,48	240
33-34	1	12,65	270
27-36	1	9,15	270
27-38	2	20,8	200
36-37	1	10,57	270
34-35	2	4,91	270
35-38	1	19,80	200
37-39	1	2,83	270
37-40	1	12,81	270
37-42	1	21,05	200
39-42	3	20,30	200
40-42	1	9,32	270
38-42	3	9,07	270
32-43	1	3,09	1400
42-44	1	12,06	270
44-45	1	18,64	200
19-32	1	1,95	1800
46-19	1	2,22	1800
46-16	1	2,03	1800
18-19	1	1,25	600
20-21	1	1,25	600
42-43	1	1,25	600

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
1-7	6,16	270	4,35
1-2	10,65	270	7,08
4-9	9,24	270	6,22
5-9	11,73	270	7,74
5-8	11,32	270	7,50
7-8	10,23	270	6,83
4-5	5,66	270	4,05
2-5	3,24	270	2,58
8-13	13,48	240	8,80
9-14	17,56	220	11,27
12-14	7,40	270	5,11

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
14-18	15,14	240	9,80
13-18	18,05	220	11,57
13-20	17,03	270	7,17
18-20	19,97	200	12,74
19-21	2,78	1500	32,64
16-17	0,78	2000	10,51
17-19	0,61	2000	8,72
14-26	16,14	220	10,41
14-22	8,40	270	5,72
22-26	7,90	270	5,41
20-23	9,32	270	6,27
23-24	7,74	270	5,31
26-27	8,32	270	5,66
24-34	16,47	220	10,61
24-33	14,48	240	9,34
33-34	12,65	270	8,28
27-36	9,15	270	6,17
27-38	20,8	200	13,24
36-37	10,57	270	7,02
34-35	4,91	270	3,59
35-38	19,80	200	12,63
37-39	2,83	270	2,33
37-40	12,81	270	8,38
37-42	21,05	200	13,38
39-42	20,30	200	12,93
40-42	9,32	270	6,26
38-42	9,07	270	6,11
32-43	3,09	1400	35,917
42-44	12,06	270	7,93
44-45	18,64	200	11,94
19-32	1,95	1800	23,42
46-19	2,22	1800	26,36
46-16	2,03	1800	24,31
18-19	1,25	600	8,17
20-21	1,25	600	8,17
42-43	1,25	600	8,17
02-04	8,82	270	5,97
14-15	3,74	270	2,89
46-10	0,81	2000	10,89
04-11	22,46	240	14,25
05-11	9,15	270	6,17
46-06	1,28	2000	16,00
46-03	2,03	1800	24,32
16-28	2,22	1800	26,36
16-32	3,11	1400	36,21

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
17-32	2,32	1700	27,51
19-25	3,25	1400	37,75
21-25	1,74	2000	21,12
25-32	3,19	1400	37,11
31-32	0,46	2000	7,14
28-31	0,53	2000	7,82
28-30	0,58	2000	8,33
27-29	9,98	270	6,67
26-29	5,41	270	3,89
28-41	3,39	1300	39,29
28-43	4,06	1200	47,70
31-41	2,78	1500	32,63
32-41	3,09	1400	35,95
41-43	1,39	2000	17,29
40-45	22,05	180	13,99
15-16	1,25	600	8,17
46-11	1,25	600	8,17
24-25	1,25	600	8,17
29-30	1,25	600	8,17
40-41	1,25	600	8,17
02-03	1,25	600	8,17
05-06	1,25	600	8,17
09-10	1,25	600	8,17

A.4 Sistema Equivalente da Região Sudeste do Brasil

Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
12	0,0	0,0
21	1740	0,0
27	3890	958
33	272	0,0
37	0,0	62
38	352	95
39	185	203
40	60	178
41	120	633
43	0,0	0,0
53	0,0	0,0
54	0,0	0,0
60	0,0	0,0
200	936	9580
201	1531	499

Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
202	425	45
203	4982	718
204	544	147
205	0,0	134
206	1174	592
207	0,0	0,0
208	234	391
209	1429	0,0
210	0,0	0,0
211	2953	0,0
212	1266	0,0
213	0,0	0,0
214	279	216
215	0,0	0,0
216	0,0	828
217	0,0	0,0
218	0,0	669
219	323	0,0
220	1937	372
221	0,0	542
222	0,0	0,0
223	0,0	1007
224	939	0,0
225	407	401
226	0,0	0,0
227	531	398
228	0,0	8,0
229	0,0	151
230	0,0	0,0
231	0,0	470
232	2182	67
233	0,0	0,0
234	1257	7423
235	278	1107
236	0,0	151
237	231	0,0
238	409	287
239	143	1156
240	88	829
241	1116	0,0
242	766	0,0
243	97	0,0
244	317	0,0
245	0,0	0,0
246	549	882
247	0,0	807

Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
248	0,0	0,0
249	118	994
250	0,0	0,0
251	2798	0,0
252	0,0	633
253	499	0,0
254	0,0	647
255	188	848
256	0,0	1712
257	0,0	0,0
259	0,0	0,0
260	0,0	0,0
261	0,0	0,0
262	0,0	0,0
263	0,0	0,0
267	954	1159
272	0,0	0,0
273	0,0	0,0

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos Existentes	Circuitos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
12-21	3	0,91	2200
12-27	4	0,34	1650
21-53	3	0,78	2200
37-40	2	4,92	200
37-205	2	6,67	150
38-39	2	5,30	200
38-40	1	3,37	200
38-41	1	13,20	200
39-41	1	8,48	200
200-217	1	1,47	1200
200-228	1	2,47	1200
200-233	1	1,41	1200
200-260	1	0,02	9999
200-261	1	0,02	9999
200-262	1	0,02	9999
200-263	1	0,02	9999
201-33	1	0,34	1100
201-202	2	1,85	1100
202-203	1	3,70	1100
202-204	1	1,34	1100
202-205	1	3,07	1100
203-206	1	2,45	1100
203-208	3	5,12	1100
203-216	2	6,21	1100

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos Existentes	Circuitos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
204-205	1	1,78	1100
205-208	1	2,30	1100
205-210	2	3,53	1100
206-216	1	5,46	1100
206-255	1	5,32	1100
207-206	1	1,33	750
207-209	1	1,47	1200
207-212	1	2,10	1200
208-216	1	1,75	1100
209-211	1	2,47	1200
209-226	1	5,21	1200
210-256	2	1,71	1100
211-220	1	2,16	1200
211-246	1	2,14	560
212-213	1	2,14	560
212-215	2	3,10	1200
213-214	1	2,45	600
214-218	1	1,38	600
214-246	1	6,27	600
215-217	1	2,58	1200
215-222	1	2,64	1200
216-254	1	2,69	1100
216-256	1	2,42	1100
217-218	1	2,14	560
217-228	1	3,27	1200
218-221	1	3,95	600
219-224	1	3,51	600
219-227	1	2,76	600
220-242	1	1,32	1200
220-273	1	2,98	1200
221-222	1	2,14	560
221-224	2	6,18	600
221-241	2	4,23	600
222-228	1	2,86	1200
224-225	1	1,03	600
224-227	1	0,75	600
224-241	1	4,14	600
225-241	1	3,29	600
226-227	3	2,25	400
226-231	1	4,87	1200
226-242	1	1,47	1200
226-257	1	6,26	1200
227-229	2	5,70	600
228-232	1	1,51	1200
228-233	1	1,21	1200

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos Existentes	Circuitos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
228-234	2	2,55	1350
229-235	1	7,24	600
229-236	1	3,29	600
229-241	1	2,00	600
229-243	1	6,74	600
230-237	2	6,21	600
230-241	2	6,24	600
231-240	1	2,52	1200
231-243	3	2,25	400
231-273	1	3,03	1200
232-234	3	1,72	1200
233-223	1	1,11	900
234-237	2	2,14	560
235-252	1	2,17	600
236-243	1	3,80	600
237-238	2	8,65	600
238-239	2	7,43	600
240-257	1	2,24	1200
242-273	1	2,69	1200
243-252	1	3,95	600
243-267	1	6,81	600
245-239	1	2,14	560
246-247	2	6,05	600
247-249	2	5,62	600
249-250	3	2,14	560
250-251	2	2,36	1300
255-256	1	4,08	1100
257-252	2	2,25	400
260-208	4	3,98	1100
260-216	1	4,92	1100
260-223	2	2,44	1100
260-254	1	2,69	1100
260-256	1	2,52	1100
261-53	3	0,92	2200
262-218	1	2,82	600
262-221	3	6,58	600
263-41	1	19,20	200
267-272	1	4,93	600
272-273	2	2,25	400

Circuitos Candidatos			
Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
12-21	0,91	2200	85,9

Circuitos Candidatos			
Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
12-27	0,34	1650	11,7
21-53	0,78	2200	73,7
27-200	4,37	1200	67,6
37-40	4,92	200	4,1
37-205	6,67	150	3,6
38-39	5,30	200	4,4
38-40	3,37	200	2,8
38-41	13,20	200	11,0
39-41	8,48	200	7,0
53-54	0,34	1650	11,7
54-60	0,72	1200	25,8
200-60	1,1	1200	39,5
200-217	1,47	1200	17,6
200-228	2,47	1200	29,6
200-233	1,41	1200	16,8
200-260	0,02	9999	51
200-261	0,02	9999	51
200-262	0,02	9999	51
200-263	0,02	9999	51
201-33	0,34	1100	3,6
201-43	1,33	750	6,1
201-202	1,85	1100	19,6
201-203	5,34	1100	56,8
202-203	3,70	1100	39,3
202-204	1,34	1100	14,3
202-205	3,07	1100	32,7
203-206	2,45	1100	26,1
203-208	5,12	1100	54,5
203-216	6,21	1100	66,1
204-205	1,78	1100	18,9
205-208	2,30	1100	24,5
205-210	3,53	1100	37,5
206-216	5,46	1100	58,1
206-255	5,32	1100	56,6
207-206	1,33	750	6,1
207-209	1,47	1200	17,6
207-212	2,10	1200	25,1
208-216	1,75	1100	18,6
209-211	2,47	1200	29,6
209-212	3,15	1200	37,6
209-226	5,21	1200	62,3
210-41	6,67	150	3,6
210-60	1,33	750	6,1
210-256	1,71	1100	18,2
211-212	3,22	1200	38,5

Circuitos Candidatos			
Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
211-220	2,16	1200	25,8
211-246	2,14	560	5,0
211-248	2,76	1200	33,0
211-250	4,79	1200	57,3
212-213	2,14	560	5,0
212-215	3,10	1200	37,1
212-226	2,70	1200	32,2
213-214	2,45	600	9,7
214-219	1,38	600	5,5
214-246	6,27	600	24,9
215-217	2,58	1200	30,8
215-222	2,64	1200	31,5
215-226	3,30	1200	39,4
216-215	1,33	750	6,1
216-254	2,69	1100	28,6
216-255	2,69	1100	28,6
216-256	2,42	1100	25,7
217-218	2,14	560	5,0
217-222	2,25	1200	26,9
217-22	3,27	1200	39
218-221	3,95	600	15,7
219-224	3,51	600	14,0
219-227	2,76	600	11,0
220-242	1,32	1200	17,4
220-250	4,49	1200	53,7
220-273	2,98	1200	39,4
221-222	2,14	560	5,0
221-224	6,18	600	24,6
221-241	4,23	600	16,8
222-226	3,75	1200	44,8
222-228	2,86	1200	34,2
224-225	1,03	600	4,1
224-227	0,75	600	3,0
224-241	4,14	600	16,4
225-241	3,29	600	13,1
226-227	2,25	400	4,6
226-231	4,78	1200	64,4
226-242	1,47	1200	19,4
226-257	6,26	1200	82,9
226-259	2,25	1200	26,8
227-229	5,70	600	22,7
228-232	1,51	1200	18,1
228-233	1,21	1200	14,5
228-234	2,55	1350	30,4
229-235	7,24	600	28,8

Circuitos Candidatos			
Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
229-236	3,29	600	13,1
229-241	2,00	600	8,0
229-243	6,74	600	26,8
230-237	6,21	600	24,7
230-241	6,24	600	24,8
231-240	2,52	1200	33,3
231-243	2,25	400	4,6
231-250	9,36	1200	111,9
231-257	1,68	1200	22,2
231-273	3,03	1200	40,1
232-234	1,72	1200	20,6
233-223	1,11	900	6,4
234-237	2,14	560	5,0
234-257	70,18	1200	12,6
235-237	3,62	600	12,9
235-238	6,74	600	24,1
235-252	2,17	600	7,7
236-243	3,80	600	15,1
237-238	8,65	600	30,9
238-239	7,43	600	26,5
240-244	7,49	1200	89,5
240-245	3,75	1200	44,8
240-253	2,45	1200	32,4
240-257	2,24	1200	29,6
242-273	2,69	1200	41,6
243-252	3,95	600	14,1
243-267	6,81	600	27,1
244-245	7,49	1200	89,5
245-239	2,14	560	5,0
245-253	1,50	1200	17,9
246-247	6,05	600	21,6
246-249	10,52	600	37,5
247-249	5,62	600	20,1
248-247	2,14	560	5,0
248-250	1,87	1200	22,4
248-251	7,71	1200	92,2
249-250	2,14	560	5,0
250-251	2,36	1300	56,7
255-256	4,08	1100	43,4
255-259	1,33	750	6,1
257-252	2,25	400	4,6
260-208	3,98	1100	42,3
260-216	4,92	1100	52,3
260-223	2,44	1100	25,9
260-254	2,69	1100	28,6

Circuitos Candidatos			
Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
260-256	2,52	1100	26,8
261-53	0,92	2200	86,6
262-218	2,82	600	11,2
262-221	6,58	600	23,5
263-41	19,20	200	16,0
267-272	4,93	600	17,6
272-273	2,25	400	4,6

APÊNDICE B

Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores

B.1 Considerações Iniciais

Este apêndice descreve os aspectos computacionais da metodologia primal-dual de pontos interiores [51], [52] na resolução de problemas de fluxo de potência ótimo (FPO). A motivação desta aplicação deve-se ao bom desempenho mostrado pelos métodos de pontos interiores em programação linear de grande porte, assim como em programação quadrática e convexa. O algoritmo implementado resolve o sistema de equações resultante da formulação primal-dual pelo método de Newton-Raphson com critérios específicos de convergência e ajuste do parâmetro barreira.

B.2 Formulação do Problema de FPO

Um problema de FPO pode ser formulado genericamente como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.a} \\ & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\ & l \leq x \leq u \quad (\pi) \end{aligned} \tag{B.1}$$

onde:

$f(x)$ função objetivo;

$h(x)$ restrições referentes as equações de balanço de potência e as restrições funcionais;

l, u limites inferiores e superiores sobre as variáveis de controle, variáveis de estado e folgas associadas às restrições funcionais;

Com a inclusão de variáveis de folga nas restrições de canalização, o sistema (B.1) resulta no equivalente a:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) \\
 & \text{s.a} \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & x - sl = l \quad (\pi_l) \\
 & x + su = u \quad (\pi_u) \\
 & sl, su \geq 0
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

Pode ser observado que as restrições de desigualdade que aparecem são do tipo (“ ≥ 0 ”), ou seja, as restrições de desigualdade originais foram transformadas em variáveis não negativas, sendo tratadas através de penalização interna. Desta forma, este tipo de restrição pode ser incluída ao problema através de uma função penalidade conhecida como barreira logarítmica ($-\sum \ln(s)$). Com a inclusão da função barreira logarítmica, o problema original é transformado em uma sequência de problemas parametrizados pelo parâmetro barreira (μ). Assim, o problema primal (B.2) é escrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) \\
 & \text{s.a} \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & x - sl = l \quad (\pi_l) \\
 & x + su = u \quad (\pi_u)
 \end{aligned} \tag{B.3}$$

onde:

n é o número de variáveis que possuem restrições de canalização.

Observe que para cada valor do parâmetro barreira, tem-se um novo problema de otimização. Resolver (B.3) é equivalente a achar um ponto no interior da região de solução. O conjunto de pontos obtidos para cada valor de μ define a trajetória de convergência no interior da região viável em relação às restrições de canalização.

A otimalidade do problema original (B.2) será alcançada quando $\mu = 0$. Por este motivo, durante o processo iterativo, deve ser imposto um decréscimo do parâmetro barreira ($\mu_{k+1} < \mu_k$) de tal forma que:

$$\mu_k \Rightarrow 0 \text{ quando } k \Rightarrow +\infty$$

Assim, quando $\mu = 0$, a função objetivo do problema (B.3) torna-se a função objetivo do problema que se deseja resolver, ou seja, torna-se o problema (B.1). Os processos adotados para o decrescimento do parâmetro barreira dão origem a varias metodologias de pontos interiores. Nesta dissertação, será abordada a metodologia primal-dual de pontos interiores.

Com o objetivo de transformar um determinado problema de otimização sujeito a apenas restrições de igualdade (B.3) em um problema de otimização sem restrições, utiliza-se a função Lagrangeana (L). Esta função é originada através de uma combinação linear entre as restrições do problema (B.3), onde os coeficientes desta combinação são os coeficientes de Lagrange (λ, π_l e π_u). Assim, a função Lagrangeana referente ao problema (B.3) pode ser escrita como:

$$L = f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) - \lambda^T . h(x) - \pi_l^T . (x - sl - l) - \pi_u^T . (x + su - u) \quad (\text{B.4})$$

B.3 Resolução do Problema

Para atingir a otimalidade do problema (B.4) deve-se derivar a equação Lagrangeana em relação as suas variáveis (primais e duais) e igualar a zero. Fazendo isto tem-se:

$$(\nabla L_x) \quad \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_l^T - \pi_u^T = 0 \quad (\text{B.5})$$

$$(\nabla L_\lambda) \quad h(x) = 0 \quad (\text{B.6})$$

$$(\nabla L_{\pi_l}) \quad x - sl - l = 0 \quad (\text{B.7})$$

$$(\nabla L_{\pi_u}) \quad x + su - u = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$(\nabla L_{sl}) \quad \mu e = S_l \pi_l \quad (\text{B.9})$$

$$(\nabla L_{su}) \quad \mu e = -S_u \pi_u \quad (\text{B.10})$$

onde:

S_l e S_u são matrizes diagonais cujos elementos diagonais são as componentes dos vetores sl e su respectivamente e $e^T = [1, \dots, 1]$.

Estas seis equações vetoriais determinam a otimalidade do problema (B.3). Observe que os critérios do sinal de π_l e π_u são deduzidos de (B.9) e (B.10), dada a positividade de S_l, S_u e μ . Aplicando a método de Newton-Raphson ao sistema de equações (B.5 a B.10) para a determinação de $\Delta x, \Delta s_l, \Delta s_u, \Delta \lambda, \Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$ tem-se:

$$(\nabla^2 f(x) - \lambda \nabla^2 h(x)) \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda - \Delta \pi_l - \Delta \pi_u = -t \quad (\text{B.11})$$

$$\nabla^T h(x) \Delta x = -h(x) \quad (\text{B.12})$$

$$\Delta x - \Delta s_l = -(x - s_l - l) \quad (\text{B.13})$$

$$\Delta x + \Delta s_u = -(x + s_u - u) \quad (\text{B.14})$$

$$-\Pi_l \Delta s_l - S_l \Delta \pi_l = -(\mu e - S_l \pi_l) \quad (\text{B.15})$$

$$\Pi_u \Delta s_u - S_u \Delta \pi_u = -(\mu e + S_u \pi_u) \quad (\text{B.16})$$

onde:

Π_l e Π_u são matrizes diagonais cujos elementos diagonais são as componentes dos vetores π_l e π_u respectivamente e, $t = \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_l - \pi_u$.

Considerando em (B.13) e (B.14) que os pontos são viáveis, isto é, que as variáveis estejam dentro da região de solução, tem-se que:

$$\Delta s_l - \Delta x = 0 \quad (\text{B.18})$$

$$\Delta s_u + \Delta x = 0 \quad (\text{B.19})$$

Substituindo as equações acima em (B.15) e (B.16), obtém-se:

$$\Delta \pi_l = +S_l^{-1}(\mu e - S_l \pi_l - \Pi_l \Delta x) \quad (\text{B.20})$$

$$\Delta \pi_u = -S_u^{-1}(\mu e - S_u \pi_u - \Pi_u \Delta x) \quad (\text{B.21})$$

Substituindo as equações (B.9) e (B.10) nas equações (B.20) e (B.21) respectivamente, tem-se:

$$\Delta \pi_l = +S_l^{-1}(-\Pi_l \Delta x) \quad (\text{B.22})$$

$$\Delta \pi_u = S_u^{-1}(\Pi_u \Delta x) \quad (\text{B.23})$$

Com estas substituições, as incógnitas do problema são Δx e $\Delta \lambda$. Substituindo as expressões de $\Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$ em (B.11), tem-se:

$$(\nabla^2 f(x) - \lambda^T \nabla^2 h(x) \Delta \pi_l + S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u) \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda = Z \quad (\text{B.24})$$

com:

$$Z = -(\nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x)) + \mu(S_l^{-1} e - S_u^{-1} e) \quad (\text{B.25})$$

Desta forma o sistema a ser resolvido, dado pelas equações (B.24) e (B.12), é equivalente a:

$$\begin{bmatrix} H & -J^T \\ -J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ h(x) \end{bmatrix} \quad (\text{B.26})$$

com:

$$H = \nabla^2 f(x) - \lambda^T \nabla^2 h(x) + S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u \quad (\text{B.27})$$

$$J = \nabla h(x) \quad (\text{B.28})$$

Uma vez calculados Δx e $\Delta \lambda$, os vetores Δs_l e Δs_u são obtidas a partir de (B.18 e B.19) e os vetores $\Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$ são obtidos a partir de (B.22 e B.23). Observe que H e Z representam a Hessiana e o Jacobiano da função Lagrangeana associada ao problema só com restrições de igualdade e, mais um termo contendo informações correspondentes ao termo barreira sendo: $(S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u)$ em H e $\mu(S_l^{-1} e - S_u^{-1} e)$ em Z.

B.4 Atualização das variáveis

Diferentemente do fluxo de potência convencional, os deltas obtidos pela resolução do sistema (B.26) não são incrementados diretamente em suas respectivas variáveis. Assim, é calculado um passo de otimização α_p para as variáveis primais e um passo α_d para as variáveis duais, pelas expressões (B.29) e (B.30).

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\Delta s < 0} \frac{s_l}{|\Delta s_l|}, \min_{\Delta s < 0} \frac{s_u}{|\Delta s_u|}, 1 \right] \quad (\text{B.29})$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\Delta\pi < 0} \frac{\pi_l}{|\Delta\pi_l|}, \min_{\Delta\pi < 0} \frac{\pi_u}{|\Delta\pi_u|}, 1 \right] \quad (\text{B.30})$$

Estes passos têm por objetivo não deixar que nenhuma variável, primal ou dual, tenha um valor de incremento (Δ) que a faça violar suas restrições de canalização. Assim, calculados os passos de otimização (α), atualiza-se as variáveis primais e duais do problema, determinando o próximo ponto da trajetória, onde é utilizado um fator de redução (σ) de passo para evitar singularidades na barreira logarítmica, o valor utilizado na prática para este fator é de 0.99995.

Depois de resolvido o sistema (B.26), utiliza-se (B.18 e B.19) para determinar os Δs e através de (B.22 e B.23), obtém-se os $\Delta\pi$. Então, os novos valores de x, s, λ e π podem ser calculados por:

$$x^{k+1} = x^k + \sigma\alpha_p\Delta x \quad (\text{B.31})$$

$$s^{k+1} = s^k + \sigma\alpha_p\Delta s \quad (\text{B.32})$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \sigma\alpha_d\Delta\lambda \quad (\text{B.33})$$

$$\pi^{k+1} = \pi^k + \sigma\alpha_p\Delta\pi \quad (\text{B.34})$$

B.5 Atualização do Parâmetro Barreira e Cálculo do GAP

Para o processo de otimização convergir para uma resposta correta o parâmetro μ que multiplicada a função barreira logarítmica deve tender a zero no decorrer das iterações, logo ele deve ser atualizado a cada iteração segundo as equações abaixo:

$$gap = \sum sl \cdot \pi_l - \sum su \cdot \pi_u \quad (\text{B.35})$$

$$\mu = \beta \cdot \frac{gap}{2n} \quad (0 < \beta < 1) \quad (\text{B.36})$$

O valor do gap é um parâmetro de “distância” das variáveis em relação à solução ótima do problema. Assim, o valor da gap vai decrescendo durante o processo e, é mínimo quando a solução ótima é alcançada.

O parâmetro β tem como objetivo modificar a direção de busca e com isso, reduzir o número de iteração do FPO. O valor ótimo de β depende do sistema considerado e das condições iniciais do problema. Assim, nesta dissertação optou-se pela utilização de um valor fixo $\beta = 0.1$.

B.6 Algoritmo de Solução do MPI

O algoritmo de solução resultante dos passos descritos anteriormente pode ser resumido como:

1. Inicialização das variáveis primais e duais.
2. Montagem da função Lagrangeana (B.4).
3. Cálculo dos termos da matriz Hessiana (B.27 e B.28) e dos termos do vetor independente (B.6 e B.25).
4. Resolução do sistema de equações (B.26).
5. Cálculo do passo primal (B.29) e dual (B.30).
6. Atualização das variáveis do problema (B.31 a B.34).
7. Cálculo do GAP (B.35) e Atualização do parâmetro barreira (B.36).
8. Teste de otimalidade:

Se $(\mu \leq 5.10^{-4}, gap \leq 5.10^{-4}, \Delta p \leq 1MW)$ PARE

Senão VOLTE ao passo 2.

onde:

Δp é o resíduo do balanço de potência ativa em cada barra do sistema.

Se o valor do gap se torna maior que um valor máximo cujo "default" é 1.10^8 , o processo iterativo deve ser interrompido, indicando que o problema é provavelmente inviável ou mal condicionado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. R. Borenstein, C. C. B. Camargo, “O Setor Elétrico no Brasil - Dos Desafios do Passado às Alternativas do Futuro” 1.ed. Porto Alegre, 1997, Editora Sagra Luzzato.
- [2] site:“<http://www.aneel.gov.br/>”.
- [3] C. J. Sales, “Os Enormes Desafios da Transmissão de Energia”, Valor Econômico, site: “<http://www.jornaldaciencia.org.br>”p. 2, ago-2011.
- [4] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, A. Villegas, “Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, n.º. 2, p. 938- 946, maio 2003.
- [5] L. L. Garver, “Transmission Network Estimation Using Linear Programming”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, n.º. 7, p. 1688-1697, set. 1970.
- [6] A. Monticelli, A. Santos, M. V. Pereira, S. H. Cunha, B. J. Parker, J. C. Praca, “Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, n.º. 10, p. 3919-3925, out. 1982.
- [7] R. Villasana, L. L. Garver, S. J. Salon, “Transmission Network Planning Using Linear Programming”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n.º. 2, p. 349-356, fev. 1985.
- [8] M. V. Pereira e L. M. V. Pinto, “Application Of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability To Interactive Transmission Expansion Planning”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n.º. 2, p. 381-389, fev. 1985.

- [9] I. C. Silva, “Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão Utilizando um Novo Algoritmo Heurístico Construtivo”, Dissertação MSc, UFJF, 2003.
- [10] S. Binato, M. V. Pereira, S. Granville, “A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, n.º. 2, p. 235-240, maio 2001.
- [11] M. O. Buygi, G. Balzer, H. M. Shanechi, M. Shahidehpour, “Market-Based Transmission Expansion Planning”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, n.º. 4, p. 2060- 2067, nov. 2004.
- [12] S. Dehghan, H. Saboori, A. Kazemi, S. Jadid, “Transmission Network Expansion Planning Using a DEA-Based Benders Decomposition”, 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2010, p. 955-960.
- [13] M. J. Rider, A. V. Garcia, R. Romero, “Transmission System Expansion Planning by a Branch-and-Bound Algorithm”, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 2, n.º. 1, p. 90-99, jan. 2008.
- [14] S. Binato, “Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão Através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes”, Tese DSc, UFRJ-COPPE, 2000.
- [15] I. de J Silva, M. J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia, C. A. Murari, “Transmission Network Expansion Planning with Security Constraints”, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 152, n.º. 6, p. 828 - 836, nov. 2005.
- [16] R. Romero e A. Monticelli, “A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning”, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 9, n.º. 1, p. 373 -380, fev. 1994.
- [17] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, S. Granville, “A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion”, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 16, n.º. 3, p. 560 -565, ago. 2001.

[18] P. Limsakul, S. Pothiya, N. Leeprechanon, "Application of Ant Colony Optimization to Transmission Network Expansion Planning with Security Constraint", in 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), 2009, p. 1-6.

[19] L. P. Garces, A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand, R. Romero, "A Bilevel Approach to Transmission Expansion Planning Within a Market Environment", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, n^o. 3, p. 1513-1522, ago. 2009.

[20] A. M. da Silva, L. A. da Fonseca Manso, L. C. de Resende, L. S. Rezende, "Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interruption Costs", in Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS '08, 2008, p. 1-7.

[21] A. Verma, B. K. Panigrahi, P. R. Bijwe, "Transmission Network Expansion Planning with Adaptive Particle Swarm Optimization", in World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, 2009, NaBIC p. 1099-1104.

[22] A. S. Sousa, E. N. Asada, "A Heuristic Method Based on the Branch and Cut Algorithm to the Transmission System Expansion Planning Problem", in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, p. 1-6.

[23] M. Cortes-Carmona, R. Palma-Behnke, O. Moya, "Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm", in 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP '09, 2009, p. 1-7.

[24] R. Romero, R. A. Gallego, A. Monticelli, "Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing", IEEE Power Industry Computer Application Conference, Conference Proceedings, 1995, p. 278-283.

[25] S. Binato, G. C. de Oliveira, J. L. de Araujo, "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, n^o. 2, p. 247-253, maio 2001.

- [26] R. Romero, M. J. Rider, I. de J. Silva, "A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, n^o. 4, p. 2289-2291, nov. 2007.
- [27] H. Faria, S. Binato, M. G. C. Resende, D. M. Falcao, "GRASP com Path-Relinking para Planejamento da Expansão de Redes de Transmissão", n^o. XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, 2002, p. 599-603.
- [28] E. L. Da Silva, J. M. A. Ortiz, G. C. De Oliveira, S. Binato, "Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 16, n^o. 1, p. 62 -68, fev. 2001.
- [29] H. Mori, K. Shimomugi, "Transmission Network Expansion Planning With Scatter Search", in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, ISIC, 2007*, p. 3749-3754.
- [30] R. A. Gallego, A. B. Alves, A. Monticelli, R. Romero, "Parallel Simulated Annealing Applied To Long Term Transmission Network Expansion Planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, n^o. 1, p. 181-188, fev. 1997.
- [31] R. A. Gallego, R. Romero, A. J. Monticelli, "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, n^o. 2, p. 490-495, maio 2000.
- [32] H. Mori, Y. Iimura, "Transmission Network Expansion Planning with a Hybrid Meta-Heuristic Method of Parallel Tabu Search and Ordinal Optimization", in *International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007.*, p. 1-6.
- [33] W. Tangkananuruk, P. Damrongkulkamjorn, "Multi-Zone Transmission Expansion Planning Using Genetic Algorithm", in *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2008*, vol. 2, p. 881-884.

[34] E. L. Da Silva, H. A. Gil, J. M. Areiza, “Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, n^o. 3, p. 1168-1174, ago. 2000.

[35] S. S. Resende, “Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão através de Otimização de Colônia de Formigas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá -UNIFEI, Itajubá, 2006.

[36] E. J. de Oliveira, I. C. da Silva, J. L. Pereira, S. Carneiro, “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, n^o. 3, p. 1616- 1621, ago. 2005.

[37] Hongsik Kim, Seungpil Moon, Jaeseok Choi, Chulhu Lee, Jaemyong Wang, R. Billinton, “Transmission System Expansion Planning of KEPCO System (Youngnam area) Using Fuzzy Set Theory”, in 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, p. 535-540 vol.1.

[38] D. Kavitha e K. S. Swarup, “Transmission Expansion Planning Using LP-Based Particle Swarm Optimization”, in 2006 IEEE Power India Conference.

[39] M. Eghbal, T. K. Saha, K. N. Hasan, “Transmission Expansion Planning by Meta-Heuristic Techniques: A Comparison of Shuffled Frog Leaping Algorithm, PSO and GA”, in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, p. 1-8.

[40] J. Kennedy, R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, p. 1942 – 1948, New Jersey, USA 1995.

[41] F. Heppner, U. Grenander, “A Stochastic Nonlinear Model for Coordinated Bird Flocks”, The Ubiquity of Chaos, AAAS Publications, Washington DC, 1990.

[42] X. S. Yang, Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms: Second Edition. Luniver Press, 2010.

- [43] C. E. Sacramento, “Planejamento Dinâmico da Expansão dos Sistemas de Subtransmissão Através de Metaheurísticas”, Tese DSc, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, 2007.
- [44] E. R. C. Viveros, “Ajuste Coordenado de Controladores de Sistemas de Potência Usando Metaheurísticas”, Tese DSc, UFRJ-COPPE, 2007.
- [45] M. A. Abido, “Optimal Design of Power-System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization”, Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 17, n.º. 3, p. 406 - 413, set. 2002.
- [46] M. C. S. Oliveira, T. L. Silva, D. J. Aloise, “Otimização por Nuvem de Partículas: Diferença entre Aplicações a Problemas Contínuos e Discretos”, n.º. XXXVI-SBPO, 2004.
- [47] M. A. Khanesar, M. Teshnehlab, M. A. Shoorehdeli, “A Novel Binary Particle Swarm Optimization”, MED’07. Mediterranean Conference on Control and Automation, 2007, p. 1 -6.
- [48] A. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, L. M. Honorio, L. A. F. Manso, “Performance Comparison of Metaheuristics to Solve the Multi-Stage Transmission Expansion Planning Problem”, Generation, Transmission Distribution, IET, vol. 5, n.º. 3, p. 360 -367, mar. 2011.
- [49] B. J. Parker, A. Watanabe, M. T. Schiling, “Precisão do Modelo Linearizado de Fluxo de Potência para Simulação do Sistema Brasileiro”, NT DEST, p. 18/80.
- [50] A. J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, 2^o ed. Edgard Blucher, 1983.
- [51] S. Granville, M. C. Abib Lima, “Application of Decomposition Techniques to VAR Planning: Methodological And Computational Aspects”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, n.º. 4, p. 1780 -1787, nov. 1994.

[52] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, n^o. 1, p. 136 -146, fev. 1994.

