

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

ISABELA MIRANDA DE MENDONÇA

**IDENTIFICAÇÃO DE ROTAS RELEVANTES PARA O
PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Tese de Doutorado

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

Juiz de Fora
2016

ISABELA MIRANDA DE MENDONÇA

**IDENTIFICAÇÃO DE ROTAS RELEVANTES PARA O
PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica, área de concentração em Sistemas de Energia

Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Prof. Rubén Augusto Romero Lázaro, D.Sc.
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP

Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso, D.Sc.
Universidade Federal de São João Del Rei, UFSJ

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Mendonça, Isabela Miranda de.

Identificação de rotas relevantes para o planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica / Isabela Miranda de Mendonça. -- 2016.

169 f. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Juinor

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Expansão da transmissão. 2. Heurísticas construtivas. 3. Otimização bioinspirada. I. Silva Juinor, Ivo Chaves da, orient. II. Título.

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

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida, revigorar minhas forças, colocar anjos em forma de amigos na minha 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, amizade e por acreditar em mim nos momentos mais difíceis. Ao meu pai, que estará em minhas melhores lembranças para sempre, meu anjo e maior incentivador.

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

Aos meus amigos, familiares, alunos 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 amigos do IFSUDESTEMG e aos colegas do NUPESP, pela convivência e apoio.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, à Faculdade de Engenharia, à PPEE, ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia - Campus Juiz de Fora pelo apoio e formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste grande sonho pessoal e profissional.

*"Reze como se tudo dependesse de Deus
e trabalhe duro como se tudo dependesse de você"*

Cardeal Shellman

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova estratégia visando à redução do espaço de busca e à inicialização do processo de otimização multimodal para resolução do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tanto, a metodologia proposta faz uso de um algoritmo heurístico construtivo baseado em índices de sensibilidade, no qual as decisões de expansão são relaxadas e representadas através da função tangente hiperbólica. Através da consideração de diferentes inclinações da função tangente hiperbólica, dentro de um intervalo previamente determinado, associadas aos principais índices de sensibilidade existentes na literatura é possível extrair um conjunto reduzido de alternativas de expansão. Sendo assim, com base nas informações heurísticas obtidas, é utilizado um algoritmo bioinspirado visando obter de um plano final de expansão para sistemas de transmissão de energia elétrica. A rede de transmissão de energia elétrica é representada por um modelo linearizado de fluxo de carga.

Os planos finais de expansão obtidos pela metodologia proposta foram satisfatórios, mostrando que a utilização da função tangente hiperbólica agregada às heurísticas adotadas resultaram em uma estratégia eficiente de decisão.

Foram analisados os sistemas Garver, IEEE 24 barras, Sul Brasileiro de 46 barras, e o Colombiano de 93 barras. Os resultados obtidos pela a metodologia proposta foram satisfatórios e de excelente qualidade.

PALAVRAS CHAVE: Expansão da Transmissão, Heurísticas Construtivas, Otimização Bioinspirada.

ABSTRACT

This thesis presents a new strategy aimed at the search space reduction and initialization of the multimodal optimization process to solve the problem of static expansion planning of electric power transmission systems. The proposed methodology uses a constructive heuristic algorithm based on sensitivity indices, in which the expansion decisions are relaxed and represented through the hyperbolic tangent function. By considering different slopes of the hyperbolic tangent function, within a predetermined range, associated with the main existing sensitivity indices in the literature, it is possible to extract a reduced set of expansion alternatives. Thus, based on the heuristic information obtained, a bio-inspired algorithm is used to obtain a final expansion plan for electric power transmission systems. The electric power transmission network is represented by a linear load flow.

The final expansion plans obtained by the proposed methodology were satisfactory, showing that the use of the hyperbolic tangent function added to the adopted heuristics yielded an effective decision strategy.

The Garver system, IEEE 24 bus system, real equivalent system in southern Brazil 46 bus and real Colombian system 93 bus were analyzed. The results obtained by the proposed method were satisfactory with excellent quality.

KEYWORDS: Transmission Network Expansion, Constructive Heuristics, bioinspired optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1- ATUALIZAÇÃO DA POSIÇÃO DA PARTÍCULA.....	30
FIGURA 3-2- PROCESSO DE BUSCA - PSO.....	32
FIGURA 3-3-REPRESENTAÇÃO DA PARTÍCULA.....	33
FIGURA 4-1-FUNÇÃO DEGRAU.....	42
FIGURA 4-2-FUNÇÃO TANGENTE HIPERBÓLICA.....	43
FIGURA 4-3-REGIÃO DE OPERAÇÃO DO PARÂMETRO DE EXPANSÃO.....	43
FIGURA 4-4-FUNÇÃO TANGENTE HIPERBÓLICA MODIFICADA - EXEMPLO ILUSTRATIVO.....	44
FIGURA 4-5- FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	48
FIGURA 4-6- FLUXOGRAMA DO ALGORITMO HEURÍSTICO PROPOSTO- AHCP.....	49
FIGURA 4-7- SISTEMA TESTE.....	51
FIGURA 4-8- SOLUÇÃO DO 1ª ITERAÇÃO DO 1º PLANO.....	54
FIGURA 4-9- SOLUÇÃO DA 2ª ITERAÇÃO DO 1ª PLANO.....	55
FIGURA 4-10- SOLUÇÃO DO 3ª ITERAÇÃO DO 1º PLANO.....	57
FIGURA 4-11- SOLUÇÃO DO 1ª ITERAÇÃO DO 2º PLANO.....	59
FIGURA 4-12- SOLUÇÃO DO 2ª ITERAÇÃO DO 2º PLANO.....	60
FIGURA 4-13- SOLUÇÃO DO 3ª ITERAÇÃO DO 2º PLANO.....	62
FIGURA 4-14- SOLUÇÃO DO 4ª ITERAÇÃO DO 2º PLANO.....	63
FIGURA 4-15- PLANOS GERADOS.....	64
FIGURA 4-16- EVOLUÇÃO DO PSO- SISTEMA TESTE.....	65
FIGURA 5-1- CONFIGURAÇÃO FINAL PARA O SISTEMA GARVER COM REDESPACHO.....	69
FIGURA 5-2- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS- SISTEMA GARVER COM REDESPACHO.....	70
FIGURA 5-3- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS- SISTEMA GARVER COM REDESPACHO.....	73
FIGURA 5-4- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS- SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO.....	75
FIGURA 5-5- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO.....	77
FIGURA 5-6 - SISTEMA IEEE 24 BARRAS.....	78
FIGURA 5-7- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G0.....	82
FIGURA 5-8- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G1.....	83
FIGURA 5-9 - EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G2.....	85
FIGURA 5-10- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G3.....	86
FIGURA 5-11- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G4.....	87
FIGURA 5-12- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G0.....	88
FIGURA 5-13- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G1.....	89
FIGURA 5-14- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G2.....	90
FIGURA 5-15- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G3.....	92
FIGURA 5-16- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G4.....	93

FIGURA 5-17- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA SUL EQUIVALENTE COM REDESPACHO.	96
FIGURA 5-18- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA SUL EQUIVALENTE COM REDESPACHO.	98
FIGURA 5-19- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA SUL EQUIVALENTE SEM REDESPACHO.	100
FIGURA 5-20- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA SUL EQUIVALENTE SEM REDESPACHO.	102
FIGURA 5-21- SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL.	103
FIGURA 5-22- SISTEMA COLOMBIANO 93 BARRAS.	104
FIGURA 5-23- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA COLOMBIANO - P1.	108
FIGURA 5-24- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA COLOMBIANO - P2.	109
FIGURA 5-25- EVOLUÇÃO DO PSO- TODAS AS ROTAS CANDIDATAS - SISTEMA COLOMBIANO - P3.	111
FIGURA 5-26- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA COLOMBIANO - P1.	112
FIGURA 5-27- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA COLOMBIANO - P2.	114
FIGURA 5-28- EVOLUÇÃO DO PSO- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS - SISTEMA COLOMBIANO - P3.	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 4-1- DADOS DE BARRA: SISTEMA TESTE	51
TABELA 4-2- DADOS DAS LINHAS EXISTENTES: SISTEMA TESTE.....	51
TABELA 4-3- DADOS DA LINHA FICTÍCIA: SISTEMA TESTE.....	52
TABELA 4-4- DADOS DAS LINHAS CANDIDATAS: SISTEMA TESTE	52
TABELA 4-5- VALORES DO ÍNDICES	53
TABELA 4-6- RESULTADO DA PRIMEIRA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	53
TABELA 4-7- VALORES DO ÍNDICES	54
TABELA 4-8- RESULTADO DA SEGUNDA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	55
TABELA 4-9- VALORES DO ÍNDICES	56
TABELA 4-10- RESULTADO DA TERCEIRA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	56
TABELA 4-11- VALORES DO ÍNDICES	58
TABELA 4-12- RESULTADO DA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	58
TABELA 4-13- VALORES DO ÍNDICES	59
TABELA 4-14- RESULTADO DA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	60
TABELA 4-15- VALORES DO ÍNDICES	61
TABELA 4-16- RESULTADO DA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	61
TABELA 4-17- VALORES DO ÍNDICES	62
TABELA 4-18- RESULTADO DA ETAPA DISCRETA - <i>PE</i>	63
TABELA 4-19- CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS - SIMULAÇÕES DO AHCP.	64
TABELA 5-1- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE – GARVER COM REDESPACHO	68
TABELA 5-2- PET - SISTEMA GARVER COM REDESPACHO - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	69
TABELA 5-3- ROTAS SELECIONADAS - GARVER COM REDESPACHO – ÍNDICE IS^P	71
TABELA 5-4- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	72
TABELA 5-5- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE – GARVER SEM REDESPACHO	74
TABELA 5-6- PET - SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	74
TABELA 5-7- ROTAS SELECIONADAS - GARVER SEM REDESPACHO – ÍNDICE IS^P	75
TABELA 5-8- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	76
TABELA 5-9- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - IEEE 24 -G0	79
TABELA 5-10- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - IEEE 24 -G1.....	79
TABELA 5-11- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - IEEE 24 -G2.....	80
TABELA 5-12- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - IEEE 24 -G3.....	80
TABELA 5-13- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - IEEE 24 -G4.....	81
TABELA 5-14- PET - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G0 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	82
TABELA 5-15- PET - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G1 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	83

TABELA 5-16- PET - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G2 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	84
TABELA 5-17- PET - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G3 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	85
TABELA 5-18- PET - SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G4 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	86
TABELA 5-19- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	87
TABELA 5-20- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	88
TABELA 5-21- PET -SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G1- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	89
TABELA 5-22- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	90
TABELA 5-23- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	91
TABELA 5-24- PET -SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G3- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	91
TABELA 5-25- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	92
TABELA 5-26- PET -SISTEMA IEEE 24 BARRAS - G4- ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	93
TABELA 5-27- RESUMO RESULTADOS AHCP (IS^P)+ PSO - IEEE 24 BARRAS - G0, G1, G2, G3 E G4	94
TABELA 5-28- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE- SUL COM REDESPACHO.....	95
TABELA 5-29 PET -SISTEMA SUL EQUIVALENTE COM REDESPACHO - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	96
TABELA 5-30- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	97
TABELA 5-31- PET -SISTEMA SUL EQUIVALENTE COM REDESPACHO - ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	97
TABELA 5-32- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE- SUL SEM REDESPACHO	99
TABELA 5-33- PET - SISTEMA SUL EQUIVALENTE SEM REDESPACHO - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS	99
TABELA 5-34- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	101
TABELA 5-35- PET -SISTEMA SUL EQUIVALENTE SEM REDESPACHO - ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	101
TABELA 5-36- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - COLOMBIANO -P1.....	105
TABELA 5-37- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - COLOMBIANO -P2.....	105
TABELA 5-38- RESULTADO ÍNDICES AHCP: REDUÇÃO X QUALIDADE - COLOMBIANO -P3.....	106
TABELA 5-39- PET - SISTEMA COLOMBIANO P1 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	107
TABELA 5-40- PET - SISTEMA COLOMBIANO P2 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	108
TABELA 5-41- PET - SISTEMA COLOMBIANO P3 - TODAS AS ROTAS CANDIDATAS.....	110
TABELA 5-42- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	111
TABELA 5-43- PET -SISTEMA COLOMBIANO P1 - ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	112
TABELA 5-44- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	113
TABELA 5-45- PET -SISTEMA COLOMBIANO P2 - ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	113
TABELA 5-46- ROTAS PROPOSTAS PELO AHCP – ÍNDICE IS^P	114
TABELA 5-47- PET -SISTEMA COLOMBIANO P3 - ROTAS CANDIDATAS REDUZIDAS	115
TABELA 5-48- RESULTADO AHCP+ PSO : TODOS OS ÍNDICES: MELHORES RESULTADOS OBTIDOS – ROTAS REDUZIDAS.....	117
TABELA 5-49- PERCENTUAL DE REDUÇÃO DE ROTAS – TODOS OS ÍNDICES – AHCP.....	118
TABELA 5-50- RESULTADO DOS ÍNDICE PROPOSTOS - IS^{me2} E IS^P	118

LISTA DE SIGLAS

- AHC - Algoritmo Heurístico Construtivo
- AHCP - Algoritmo Heurístico Construtivo Proposto
- AMPL - *A Mathematical Programming Language*
- CA - Corrente Alternada
- CC - Corrente Contínua
- CPLEX - Ferramenta para Resolver Problemas de Otimização Linear
- EP - Enxame de Partículas
- FOB - Função Objetivo
- FPO - Fluxo de Potência Ótimo
- GRASP-CP - *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure Construction Phase*
- HS - Harmônica Recursiva
- IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
- IS - Índice de Sensibilidade
- MPI - Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores
- NEPC - Número Máximo de Expansões por Rotas Candidatas à Expansão
- PE - Parâmetro de Expansão
- PET - Problema de Expansão da Transmissão
- PL - Programação Linear
- PLIM - Problema de Programação Linear Inteira Mista
- PNLIM - Problema de Programação Não Linear Inteira Mista
- PSO - *Particle Swarm Optimization*
- SEP - Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SIMBOLOS

- c_{ij} é o componente de custo da construção do circuito candidato $i-j$;
- n_{ij} é o número de circuitos candidatos selecionados à expansão entre as barras $i-j$;
- S é a matriz de incidência nodal;
- f é o vetor de fluxos de potência ativa;
- g é o vetor de geração de potência ativa;
- d é o vetor de demanda do sistema elétrico;
- n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes na topologia base entre as barras $i-j$;
- \bar{g} é o limite máximo de geração de potência ativa;
- \bar{f}_{ij} é o limite máximo de fluxo de potência ativa entre as barras $i-j$;
- n é o número de geradores artificiais que representam o corte de carga;
- B é a matriz de susceptância nodal;
- θ é o vetor referente aos ângulos de potência;
- r é o vetor referente aos geradores artificiais de potência ativa;
- \bar{r} é o limite máximo do corte de carga.
- γ_{ij} é a susceptância do circuito entre as barras $i-j$;
- θ_{ij} é a diferença angular entre as barras $i-j$.
- f_{ij} é o fluxo de potência ativa no circuito $i-j$;
- $\bar{\theta}_{ij}$ é a diferença angular máxima permitida entre as barras $i-j$;
- ϕ_{ij} é a diferença angular permitida ao circuito fictício $i-j$;
- λ_{ij} é a diferença entre os multiplicadores de Lagrange referentes as equações de balanço de potência das barras $i-j$.
- Ω_1 é o conjunto de circuitos existentes na topologia corrente (modelo CC);
- Ω_2 é o conjunto de circuitos fictícios (modelo de Transporte).
- W_c é o valor do corte de carga obtido com a topologia corrente;
- W_k é o valor do corte de carga produzido simulando a proposta de cada um dos quatro AHC,
- $k=1,2,3,4$;
- δ_k é o custo de investimento da proposta de expansão em análise.

PE_{ij} é o parâmetro de expansão do circuito candidato entre as barras i - j ;

C é o conjunto de circuitos candidatos à expansão.

$V_{i,k}$ é a velocidade da partícula i na iteração k ;

$V_{i,k-1}$ é a velocidade da partícula i na iteração $k-1$;

w é o peso de inércia;

c_1 e c_2 são constantes positivas que correspondem aos parâmetros cognitivos e sociais das partículas;

$rand$ é a função de números aleatórios no intervalo $[0,1]$;

$pbest_{i,k-1}$ é a melhor posição da partícula i até a iteração $k-1$;

$gbest_{k-1}$ é a melhor posição do enxame até a iteração $k-1$;

$X_{i,k}$ é a posição da partícula i , na iteração k ;

$X_{i,k-1}$ é a posição da partícula i , na iteração $k-1$.

w_{max} é o peso de Inércia Máximo;

w_{min} é o peso de Inércia Mínimo;

$iter$ é a iteração atual;

$iter_{max}$ é o número máximo de iterações.

nr é o número de geradores fictícios;

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

c_l é o custo da construção da linha candidata l (US\$/ano);

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

\bar{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);

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

Ω_i é o conjunto de barras conectadas à barra i ;

Ω_C é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;

Ω_E é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;

Ω_F é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;

PE_l é o parâmetro de expansão da linha candidata l ;

λ_l é o multiplicado de Lagrange da linha candidata l ;

f_l é o fluxo de potência ativa da linha l (MW);

\bar{f}_l é o limite de fluxo de potência ativa da linha l (MW);

γ_l é a susceptância da linha l ;

d_i é a demanda na barra i (MW);

φ_l é a diferença angular entre as barras da linha fictícia l ;

θ_l é a diferença angular entre as barras da linha l ;

$\gamma_{l_{FIC}}$ é a susceptância da linha fictícia l .

IS_{ij}^{me} é o índice de sensibilidade do algoritmo mínimo esforço

IS_{ij}^{mcc} é o índice de sensibilidade do algoritmo mínimo corte de carga

IS_k^{ai} é o índice de sensibilidade do algoritmo integrado

IS_l^{ga1} é o índice de sensibilidade baseado em Garver 1

IS_l^{ga2} é o índice de sensibilidade baseado em Garver 2

IS_l^{me1} é o índice de sensibilidade baseado em mínimo esforço 1

IS_l^{me2} é o índice de sensibilidade baseado em mínimo esforço 2

IS_l^{mcc1} é o índice de sensibilidade baseado em mínimo corte de carga 1

IS_l^{mcc2} é o índice de sensibilidade baseado em mínimo corte de carga 2

IS_l^P é o índice de sensibilidade baseado em portfólio

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SIGLAS.....	xii
LISTA DE SIMBOLOS	xiii
1 INTRODUÇÃO Equation Chapter (Next) Section 1	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.3 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DA PRESENTE PROPOSTA.....	8
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
1.5 PUBLICAÇÕES	9
2 HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS APLICADAS AO PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA Equation Chapter 2 Section 1	11
2.1 INTRODUÇÃO	11
2.2 INDICADOR DE SENSIBILIDADE	12
2.3 MODELAGENS UTILIZADAS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	13
2.3.1 Modelo de Transporte	13
2.3.2 Modelo CC.....	14
2.3.3 Modelo Híbrido.....	14
2.4 HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS	15

2.4.1	Algoritmo de Garver	15
2.4.2	Algoritmo de Mínimo Esforço	17
2.4.3	Algoritmo de Mínimo Corte de Carga	19
2.4.4	Algoritmo de Villanasa-Garver	22
2.4.5	Algoritmo Integrado	24
2.4.6	Algoritmo Heurística Sigmoide	25
2.5	CONCLUSÕES	26
3	OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA Equation Chapter 3 Section 1	28
3.1	INTRODUÇÃO	28
3.2	PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO VIA PSO	29
3.3	OTIMIZAÇÃO VIA PSO PARA A RESOLUÇÃO DA EXPANSÃO ESTÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	32
3.3.1	Representação da Partícula	33
3.3.2	Inicialização do Enxame	33
3.3.3	Avaliação da Partícula	34
3.3.4	Deslocamento e Velocidade	34
3.3.5	Critério de Convergência	35
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	36
4	ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO PARA REDUÇÃO DAS ROTAS CANDIDATAS À EXPANSÃO EM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA Equation Chapter 4 Section 1	37
4.1	ALGORITMO HEURÍSTICO UTILIZADO	37
4.2	FORMULAÇÃO ADOTADA	37
4.2.1	Função Objetivo (FOB)	39
4.2.2	Restrições de Balanço de Potência Ativa	40
4.2.3	Restrições de Canalização de Fluxo de Potência Ativa	40
4.2.4	Restrições de Canalização de Geração de Potência Ativa	40
4.2.5	Restrições de Fluxo Potência Ativa	41

4.2.6 Restrições de Conectividade	41
4.2.7 Restrições do Parâmetro de Expansão (<i>PE</i>).....	41
4.3 HEURÍSTICA PROPOSTA.....	44
4.3.1 Sensibilidade Baseada em Garver	45
4.3.2 Sensibilidade Baseada no Mínimo Esforço.....	46
4.3.3 Sensibilidade Baseada no Mínimo Corte de Carga.....	46
4.3.4 Sensibilidade baseada em Portfólio	47
4.4 SISTEMA TUTORIAL.....	50
4.5 CONCLUSÕES PARCIAIS	65
5 ESTUDO DE CASOS Equation Chapter (Next) Section 1	67
5.1 INTRODUÇÃO	67
5.2 SISTEMA GARVER	67
5.3 SISTEMA IEEE 24 BARRAS	77
5.4 SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL	94
5.5 SISTEMA COLOMBIANO.....	103
5.6 ASPECTOS COMPUTACIONAIS	121
5.7 CONCLUSÕES PARCIAIS	121
6 CONCLUSÃO	122
6.1 CONCLUSÕES FINAIS.....	122
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	122
APÊNDICE A.....	124
BIBLIOGRAFIA	146

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema elétrico brasileiro apresenta características peculiares, dentre as quais destaca-se a geração de energia elétrica, basicamente, hidroelétrica. Tal peculiaridade é devida ao grande potencial das bacias hidráulicas com ciclos hidrológicos diferentes, enquanto que a geração da grande maioria dos países tem como base a geração termoelétrica. Além disso, a grande dimensão territorial e a elevada distância existente entre as usinas hidroelétricas e os centros consumidores, exige o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias. Logo, estas características 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 ao menor custo possível. Desta forma, os agentes devem decidir individualmente quando (visão dinâmica) e onde (visão estática) investir de maneira ótima os recursos financeiros disponíveis, garantindo o funcionamento confiável e adequado do sistema elétrico de potência (SEP). Estas decisões estão associadas à seleção de unidades geradoras e das melhores rotas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Por conseguinte, estratégias devem ser desenvolvidas de modo a garantir que as decisões adotadas durante o processo de planejamento sejam ótimas. Dentro deste contexto, o planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica dá origem a um problema de otimização de alto grau de complexidade e de grande porte [1].

Significativos avanços foram obtidos nas últimas décadas no marco legal e regulatório do setor elétrico brasileiro, mas ainda existem desafios, dentre os quais se destaca o planejamento da expansão dos sistemas de transmissão de energia. O planejamento da transmissão é de longo prazo 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 (linhas de transmissão e/ou transformadores), aqueles que devem ser construídos de forma a minimizar os custos de investimento no sistema elétrico, suprimindo a demanda prevista para um horizonte de planejamento [2]. Este problema de otimização apresenta algumas particularidades:

- (i) Região de solução não convexa: Existência de vários ótimos locais, o que leva grande parte dos algoritmos a convergirem em direção de uma solução subótima;
- (ii) A natureza combinatória do processo de planejamento: Fenômeno que conduz a explosão combinatória referente às alternativas de investimento e conseqüentemente, em um tempo computacional elevado ou até proibitivo na obtenção da solução ótima global;
- (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 referente a expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Na literatura podem-se distinguir, basicamente, três grandes grupos de algoritmos empregados na resolução do problema aqui abordado:

- Algoritmos Heurísticos Construtivos (AHC): Utilizam técnicas de otimização contínua. São robustos e encontram, geralmente, soluções de qualidade com pouco esforço computacional. Entretanto, a otimalidade global é raramente obtida, principalmente em relação a sistemas reais e/ou de grande porte. Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] e [10].
- 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 possivelmente podem apresentar problemas de esforço computacional e, em alguns casos, de convergência [11], [12], [13], [14] e [15].
- Metaheurísticas: Métodos que coordenam procedimentos de busca local com estratégias de mais alto nível (busca global). Esses métodos tem o objetivo de criar um processo de busca capaz de escapar de mínimos e máximos locais e realizar uma varredura robusta no espaço de soluções. Normalmente, utilizam do conhecimento histórico dos resultados para se guiarem e realizar suas buscas em vizinhanças, o que atenua paradas prematuras em ótimos locais. Encontram soluções ótimas ou subótimas, mesmo de sistemas de maior porte, mas através de um grande número de simulações computacionais [8], [16], [17] [18], [19], [20], [21], [22], [23] e [24].

Inúmeras características, propriedades e resultados de heurísticas construtivas apresentam grande utilidade no desenvolvimento de algoritmos mais complexos. Sendo assim, o presente trabalho propõe, através de uma nova heurística construtiva, a diminuição do número de rotas candidatas a expansão, ou seja, a formação de conjunto reduzido de rotas relevantes à expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Esse conjunto reduzido, se bem constituído, tende a facilitar a obtenção de soluções ótimas de boa qualidade por quaisquer métodos que venham a ser utilizados.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir dos anos 70, houve uma notória ampliação da rede de transmissão de energia elétrica e uma maior disponibilidade de recursos computacionais. Estes fatores contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento de programas baseados em técnicas de otimização com tendência para o planejamento automático [3], [25] e [26].

O primeiro trabalho validado e publicado para o planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica data de 1970. Garver [3] formulou o problema com um fluxo de potência utilizando um algoritmo de programação linear para encontrar as rotas de expansão e representou a rede elétrica através do modelo de transportes. A grande vantagem do modelo de transportes é que modelo é linear inteiro misto.

Em [4] foi sugerido por Monticelli et al, o uso de ferramentas interativas para o planejamento da transmissão. Os caminhos candidatos à expansão eram ordenados através de um índice de “Mínimo Esforço”, que consistia em uma análise de sensibilidade em relação as susceptâncias dos circuitos.

Posteriormente foi apresentada por Villanasa et al [5] 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 CC calcula o fluxo de potência nos circuitos existentes, o modelo de transportes é aplicado 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.

Ainda em 1985, Pereira e Pinto [6] apresentaram uma nova proposta de algoritmo heurístico construtivo que considerava o índice de capacidade de atendimento de carga no

processo de síntese de redes de transmissão. Este índice de capacidade, denominado de índice de “Mínimo Corte de Carga”, permitia localizar o circuito que uma vez adicionado ao sistema produziria uma minimização do corte de carga. Assim, o grupo de alternativas de expansão era formado através da análise de sensibilidades sobre o modelo CC.

Gomes e Saraiva [9] descrevem uma ferramenta híbrida para executar planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica: (i) Em um primeiro momento faz-se uso de um AHC baseado no algoritmo de Garver e Mínimo Esforço para reduzir o espaço de busca; (ii) Posteriormente, com o espaço de busca reduzido, fez-se uso da metaheurística PSO para determinar o planejamento final da expansão.

Outro trabalho que fez uso da programação linear inteira mista é Bahiense et al [11]. Neste trabalho foi utilizada uma técnica heurística de forma a obter os limites superiores, a serem utilizados no modelo inteiro, diminuindo desta forma a árvore de busca.

Oliveira et al [10] apresenta uma nova proposta de algoritmo heurístico construtivo para a solução do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão. O algoritmo heurístico proposto utiliza como técnica de solução a metodologia primal-dual de pontos interiores (MPI) e as decisões de expansão (0-1) são representadas através da função tangente hiperbólica. A heurística adotada foi a mesma empregada por Garver com o objetivo de simplificar a resolução do problema de planejamento, evitando desta forma a explosão combinatorial referente às alternativas de investimento. Os planos de expansão obtidos pela metodologia proposta foram de excelente qualidade.

A necessidade de se obter soluções de boa qualidade para sistemas cada vez mais complexos, de maior porte, e sobrecarregados fez com que a utilização de métodos de busca mais elaborados, denominados metaheurísticas, se intensificasse. Esta necessidade advinda da facilidade de se trabalhar com problemas não convexos e tratar incertezas contribuíram para o emprego de metaheurísticas na resolução do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Desse modo, teve início o uso das técnicas metaheurísticas, com o trabalho de Romero, Gallego e Monticelli [22], que propuseram uma aproximação para o planejamento da expansão da transmissão baseado na técnica de Recozimento. O método mostrou-se eficiente em sistemas de pequeno porte e promissor em sistemas de grande porte, obtendo soluções interessantes com custos inferiores às soluções divulgadas na literatura até então. Posteriormente, a técnica de recozimento simulado foi paralelizada [23]. Esta estratégia influenciou nas propriedades de convergência do recozimento simulado sequencial e permitiu a obtenção de soluções em um tempo computacional consideravelmente menor.

Em [8] foram abordadas duas metodologias para resolver o problema referente ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. A primeira fez uso da metaheurística PSO e dos modelos de transporte e modelo CC para o sistema de transmissão. Na segunda abordagem, considerou-se múltiplos cenários de geração usando o modelo linear disjuntivo. Este modelo foi implementado via AMPL e resolvido usando o solver comercial CPLEX. Os resultados mostraram a eficiência de ambas abordagens.

Já em [16] aborda-se uma revisão das principais ferramentas e métodos de solução do problema de planejamento da expansão da transmissão: (i) Métodos Matemáticos de Otimização: Programação linear, Otimização dinâmica discreta, Programação linear inteira mista, *Branch and bound* e Decomposição de Benders; (ii) Métodos heurísticos e Metaheurísticas: Algoritmo heurístico construtivo, Busca tabu, Expert system, Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas e Enxame de Partículas

Em [17] propõe-se a paralelização da metaheurística, PSO, para resolver o planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica usando o modelo CC. O objetivo foi de reduzir o tempo de processamento. Os resultados mostram que com o processamento paralelo, o problema pode ser resolvido de forma rápida e mais robusta.

Rathore et al [18] apresenta a aplicação de um algoritmo de otimização baseado no comportamento dos mosquitos a fim de resolver o problema do planejamento estático da expansão de sistema de transmissão de energia elétrica. O modelo CC foi utilizado, o algoritmo encontrou o custo mínimo de investimento para o sistema IEEE 24 barras e IEEE 25 barras.

Com base no modelo CC, o algoritmo de busca *Artificial Bee Colony* [19] foi usado para resolver o problema estático da expansão de redes de transmissão de energia elétrica. A eficiência do método foi testada através dos sistemas Garver, IEEE 24 e IEEE 25 barras e os resultados alcançados foram os mesmos divulgados na literatura especializada.

Em [20], o algoritmo de busca harmônica recursiva (HS) é utilizado para a resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão em ambiente desregulamentado, considerando restrições de segurança. A modificação do método HS recursivo em comparação com o algoritmo HS tradicional inclui: (i) a introdução de uma largura de banda variável na consideração de memória e as fases de ajuste no passo de improvisação do algoritmo e (ii) a possibilidade de reiniciar o algoritmo após o número máximo de improvisações ser alcançado, mantendo as melhores soluções do algoritmo da execução anterior. Desta forma, a probabilidade de encontrar a melhor solução para o problema é superior sem sobrecarregar o tempo de computação do algoritmo.

Já em [21], apresenta-se um comparação entre algoritmos metaheurísticos. Neste contexto, os três algoritmos metaheurísticos: *firefly*, *bat* e *cuckoo search* foram utilizados. *Firefly* é inspirado pelo comportamento dos vaga-lumes, *Bat algorithm* baseia-se no comportamento de ecolocalização dos morcegos, enquanto em *Cuckoo search*, é baseado em um padrão que corresponde a um ninho. Uma série de experimentos computacionais utilizando cada algoritmo foi realizada. Os resultados experimentais foram analisados e observou-se que o algoritmo vaga-lumes teve um desempenho superior.

É apresentada em [24] uma comparação de desempenho entre metaheurísticas afim de solucionar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão multi-estágios. O desempenho entre as metaheurísticas foi avaliado através de um índice que mede a qualidade das melhores sequências encontradas. Estudos de caso sobre um sistema de pequeno porte e uma rede de sub-transmissão real foram apresentados e discutidos.

Em [27] foi apresentada uma revisão abrangente do planejamento da expansão da geração e planejamento da expansão da transmissão sob diferentes aspectos e pontos de vista, tais como modelagem, métodos de solução, confiabilidade, geração distribuída, mercado de energia, incertezas, congestionamentos de linha, entre outros.

Em função da necessidade adicional imposta pela inserção de fontes renováveis no planejamento de redes elétricas, em [28] fez-se uso de novos modelos e procedimentos para a obtenção de redes elétricas mais robustas. Na metodologia, um novo conjunto de indicadores de desempenho são apresentados com base no conceito de fluxo de potência cronológico.

Em Aghaei et al.[29], um novo modelo probabilístico é proposto para o problema do planejamento de expansão da geração e transmissão, considerando critérios de confiabilidade. Os critérios de confiabilidade foram representados por geradores ou paralisações aleatórias de linhas. O modelo considera os custos de instalação e operação, bem como o custo de energia não fornecida para determinar, de forma ideal, a localização e o número de novas unidades geradoras e circuitos na rede. Além disso, formulações lineares eficientes foram introduzidas de modo a contornar a natureza não-linear do problema. Para validar a metodologia foram testados os sistemas 6 barras, IEEE 24 e 118 barras.

Uma nova abordagem dinâmica no problema de planejamento da expansão em sistemas de potência é apresentada em [30]. A coordenação entre a expansão do sistema de geração e transmissão foi formulada como sendo um problema de programação linear inteira mista. A decomposição Benders foi empregada para converter a formulação não linear em uma programação linear inteira mista (PLIM) no problema mestre, e uma programação linear

(PL) no sub-problema. Além disso, diferentes tempos de construção foram considerados para diferentes instalações de transmissão e geração.

Sousa et al. [31] apresenta uma proposta para o planejamento estático da transmissão que tem por objetivo obter planos que garantam uma operação flexível ao sistema. Para isto o modelo leva em conta diferentes cenários de despacho das unidades geradoras. O algoritmo evolutivo utilizado garante um conjunto de soluções que servirão de referência para o planejador.

Torres e Castro [32] resolveram o problema de expansão da transmissão (PET) utilizando o modelo da rede de corrente alternada (CA), sendo poucas as pesquisas na literatura que fazem uso da modelagem CA para este problema. Desta forma, uma aplicação especializada da Evolução Diferencial melhorada foi usada para resolver o problema na sua forma estática, utilizando compensação de energia reativa. O objetivo principal foi de viabilizar o uso da rede modelo CA para o problema da expansão de sistemas de transmissão. Algumas comparações entre a metodologia utilizada e a otimização por enxame de partículas foram realizadas a fim de demonstrar os bons resultados obtidos.

Em [33] foi utilizada uma estratégia com o objetivo de reduzir o número de variáveis através da determinação do número ótimo de expansões por linha candidata por meio do conceito de sistema numérico binário e GRASP_CP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure Construction Phase*), utilizando o modelo disjuntivo para resolver o problema. A fim de averiguar a eficiência da metodologia proposta utilizou-se um sistema de teste e dois sistemas reais, obtendo-se excelentes resultados.

Diferente da metodologia proposta nesta tese que reduz-se o número de rotas relevantes sem alterar o número de variável e o número de reforços por caminho candidato.

O planejamento do sistema de transmissão é realizado de forma a evitar a falta de energia elétrica. O grande desafio do setor é encontrar um equilíbrio entre o menor custo de investimento e confiabilidade do mesmo. Porém, altos investimentos resultam em custos finais elevados e estes custos são repassados ao consumidor final gerando assim altas tarifas.

A fim de resolver o problema, o presente trabalho propõe um método de solução para o planejamento estático da expansão da transmissão, buscando um equilíbrio entre a economia e a confiabilidade nos investimentos.

1.3 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DA PRESENTE PROPOSTA

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica é um problema de programação não-linear inteira mista de difícil solução, especialmente para sistemas elétricos de grande porte, devido ao grande número de alternativas de expansão. Por isso, frequentemente, heurísticas construtivas têm sido empregadas, pois permitem a obtenção de soluções factíveis em um tempo computacional aceitável. Desta forma a presente pesquisa tem como motivação a elaboração de uma estratégia heurística com a finalidade de reduzir o número de rotas de expansão e a obtenção de soluções factíveis para qualquer processo de otimização multimodal a fim de que seja feito o planejamento final da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

A obtenção deste conjunto reduzido de rotas é importante e pertinente, pois independente da técnica de otimização multimodal a ser utilizada, permite um aumento da eficiência na resolução do problema, sendo esta a principal contribuição desta tese.

Diante do quadro descrito acima, é proposta uma metodologia visando 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 etapa faz-se uso de um algoritmo heurístico construtivo, em que a variável decisão de expansão é representada por uma função tangente hiperbólica, sendo esta introduzida ao modelo de fluxo de carga. Esta primeira etapa inovadora tem como objetivo, através da variação da inclinação da função tangente hiperbólica e de um índice de sensibilidade, determinar um conjunto reduzido de rotas candidatas à expansão e assim, diminuir de maneira eficiente o espaço de busca. Já na segunda etapa, um processo de otimização multimodal, bioinspirado no comportamento de enxames de partículas, PSO, faz uso do conjunto de rotas selecionadas na primeira etapa do algoritmo heurístico construtivo de modo a melhorar a eficiência do processo de busca.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo apresentou uma visão geral do problema de planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica, bem como motivação e justificativas para o estudo do

tema, e os objetivos deste trabalho. Além deste capítulo, este trabalho contém mais cinco capítulos e um apêndice.

O capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais algoritmos heurísticos construtivos encontrados na literatura e a descrição das modelagens de fluxo de carga utilizadas.

No capítulo 3 apresentam-se os principais conceitos referentes à técnica de otimização bioinspirada adotada: otimização via PSO.

O capítulo 4 apresenta a formulação do problema e os principais conceitos referentes aos índices de sensibilidades utilizados, trazendo assim a contribuição do trabalho.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia em sistemas utilizados na literatura. Para tanto, será utilizado o Sistema Garver, IEEE 24 barras e dois sistemas reais equivalentes: Sistema Sul Brasileiro e o Sistema Colombiano. 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 6 são apresentadas as principais conclusões referentes à metodologia proposta, bem como sugestões de trabalhos futuros.

O apêndice A exhibe os dados dos sistemas elétricos simulados nesta proposta.

1.5 PUBLICAÇÕES

Em decorrência da presente pesquisa foram produzidos os seguintes trabalhos:

- Periódicos:

MENDONÇA, I. M.; JUNIOR, I. C. S. ; DIAS, B. H.; MARCATO, A. L.M. Identification of Relevant Routes for Static Expansion Planning of Electric Power Transmission Systems. Electric Power Systems Research, 2016.

MENDONÇA, I. M.; JUNIOR, I. C. S. ; MARCATO, A. L.M. Static planning of the expansion of electrical energy transmission systems using particle swarm optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 60, p. 234-244, 2014.

- **Conferências:**

MENDONÇA, I. M. ; SILVA JUNIOR, I. C. ; DIAS, B. H. ; MARCATO, A. L. M. .
Determinação De Rotas De Expansão Para Sistemas De Transmissão De Energia
Elétrica Via Heurística Construtiva. In: Power Tech, 2013, Grenoble. 2013.

MENDONÇA, I. M. ; POUBEL, R. ; SILVA JUNIOR, I. C. ; OLIVEIRA, E. J. ;
OLIVEIRA, L. W. ; MARCATO, A. L. M. . **Static Transmission Network Expansion**
Planning of Electric Power Systems using the Firefly Optimization. In: Power Tech, 2013.
(correlato)

AREDES, C. ; SILVA JUNIOR, I. C. ; MENDONÇA, I. M. ; DIAS, B. H. ;
OLIVEIRA, L. W. . **Planejamento Estático Da Expansão De Sistemas De Transmissão De**
Energia Elétrica Via Ecolocalização. In: CBA-Congresso Brasileiro De Automática, 2014,
Belo Horizonte. (correlato)

OLIVEIRA, L. E. ; SILVA JUNIOR, I. C. ; MENDONÇA, I. M. ;. **Planejamento**
Dinâmico da Expansão de Transmissão de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o
Algoritmo de Otimização Harmony Search. In: CBA-Congresso Brasileiro De Automática,
2014, Belo Horizonte. (correlato)

ZANGIROLAMI, M., ; SUTANA, A. ; MENDONÇA, I. M. ; DIAS, B. H. ; SILVA
JUNIOR, I. C. ;. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia**
Elétrica Utilizando Otimização por Enxame de Partículas. In: XVI SBPO Simpósio
Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2015, Porto de Galinhas, PE. (correlato)

2 HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS APLICADAS AO PROBLEMA DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Os Algoritmos Heurísticos Construtivos (AHC) são métodos de resolução alternativos para determinação de soluções de boa qualidade de problemas reais, tais como o do planejamento da expansão de sistemas de transmissão. No entanto, o fazem sem garantia de encontrar o ótimo global, e lembrando que nem sempre os problemas podem ser resolvidos por técnicas mais precisas. Geralmente, devido à sua natureza complexa, eles consomem grande memória e tempo computacional, tornando-se intratáveis. Em geral, os AHC dificilmente encontram a solução ótima, mas são robustos, fáceis de implementar e rápidos computacionalmente. Uma heurística construtiva, para o problema aqui em análise, tem por objetivo propor a construção de uma única linha de transmissão passo a passo, sendo o processo interrompido quando as expansões realizadas forem suficientes para atender a demanda elétrica do sistema. A decisão de qual linha de transmissão deve ser construída, nestes algoritmos, varia de acordo com o índice de sensibilidade adotado.

Assim, o processo heurístico de otimização é iniciado com uma topologia base e com uma previsão da demanda e geração futura do sistema elétrico em análise. Em cada etapa de resolução é adicionado um circuito, escolhido por um determinado índice de sensibilidade, e a topologia base é atualizada tornando-se a topologia corrente. O processo é tido como encerrado quando o sistema elétrico, com a topologia base corrente, passa a operar adequadamente, isto é, as unidades geradoras conseguem atender a demanda prevista para o horizonte de planejamento.

Estes algoritmos encontram geralmente soluções de boa qualidade para sistemas pequenos e apenas soluções razoáveis para sistemas elétricos de médio e grande porte. Entretanto, são importantes pelos seguintes motivos: (i) são robustos e de fácil entendimento; (ii) apresentam baixo esforço computacional; (iii) algumas características, propriedades e resultados, destes algoritmos, podem ser empregados no desenvolvimento de algoritmos mais complexos.

A palavra heurística é derivada do grego “heuriskein”, que significa descobrir ou encontrar. Entretanto o significado da palavra, em otimização, vai um pouco além de sua raiz etimológica. Heurística refere-se à um método de busca de soluções em que não existe qualquer garantia de sucesso. Assim, pode-se definir heurística como uma técnica de solução com baixo esforço computacional que é capaz de garantir a viabilidade ou a otimalidade das soluções encontradas ou até mesmo ambas, especialmente nas ocasiões em que se parte de soluções viáveis próximas do ponto ótimo.

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão é um problema de programação não linear inteira mista de difícil solução, especialmente para sistemas elétricos de grande porte, devido ao grande número de alternativas de expansão. Em vista disso, constantemente heurísticas tem sido empregadas, pois possibilita obter boas soluções em um tempo computacional aceitável. Porém, não provam a otimalidade global das soluções encontradas.

2.2 INDICADOR DE SENSIBILIDADE

O indicador de sensibilidade é um parâmetro que está relacionado direta ou indiretamente com a variação da função objetivo devido às alterações de algum outro parâmetro do sistema, considerando-se como sistema a topologia corrente (topologia base atualizada). Um indicador de sensibilidade, para o problema em análise, deve ser capaz de identificar as rotas mais atrativas para a realização das expansões do sistema de transmissão. Entretanto, são índices de caráter local, não sendo capazes de identificar a melhor estratégia global para a topologia base. Desta forma, fica evidente a dificuldade encontrada pelos algoritmos heurísticos construtivos na obtenção da solução(conjunto de expansões) ótima global.

2.3 MODELAGENS UTILIZADAS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

A modelagem matemática que reproduz de forma completa o problema de planejamento do sistema de transmissão seria a representação das relações matemáticas através do fluxo de carga não linear ou CA [32] e [34]. Porém, este problema apresenta algumas particularidades que fazem com que a modelagem pelo fluxo de carga CA seja pouco utilizada

Desta forma, foram propostos vários modelos matemáticos para a representação do problema da expansão de sistemas de transmissão. Porém, entre os algoritmos heurísticos construtivos, três destes modelos [35] são amplamente utilizados: (i) modelo de transporte; (ii) modelo CC; (iii) modelo híbrido. Com a utilização destes modelos, o problema de planejamento passa a ser um problema que engloba linearidades e/ou não linearidades e com variáveis discretas e/ou contínuas, resultando assim em um problema de programação não linear inteira mista.

2.3.1 Modelo de Transporte

Primeira proposta de modelagem matemática para o problema de planejamento da transmissão. Sugerida por Garver, foi um marco para a utilização de modelos diferentes para os problemas de operação e de planejamento [3].

A ideia proposta por Garver foi a de utilizar um modelo de rede mais relaxada, satisfazendo as duas leis de Kirchhoff, devido aos problemas pertinentes a utilização da modelagem CA, permitindo assim a obtenção de soluções aproximadas. A vantagem desta modelagem reside no fato de que todos os circuitos existentes na rede elétrica obedecem apenas à primeira lei de Kirchhoff, não existindo assim, diferença entre resolver problemas com sistemas elétricos conexos ou não conexos. Porém, como esta modelagem é uma representação relaxada do fluxo de carga, as soluções encontradas, podem, em alguns casos, se tornar inviáveis para modelos menos relaxados.

2.3.2 Modelo CC

Considera-se o fluxo de carga CC [34] como sendo a melhor alternativa para a modelagem do problema de planejamento da transmissão. Os principais motivos para este consenso são: (i) existem várias técnicas de solução que resolvem de maneira eficiente os problemas de otimização que utilizam o fluxo de carga CC; (ii) os problemas com redes elétricas não conexas podem ser contornados através da utilização de circuitos fictícios; (iii) os planos de expansão obtidos através da utilização do fluxo de carga CC são geralmente de melhor qualidade quando comparado com os demais modelos (Transporte e Híbrido relaxados) [36].

Nesta modelagem, o sistema elétrico completo, isto é, os circuitos existentes, fictícios e candidatos à expansão satisfazem as duas leis de Kirchhoff (lei das malhas e lei dos nós).

2.3.3 Modelo Híbrido

A modelagem matemática utilizada pelo modelo híbrido [5] consiste em considerar que uma parte do sistema elétrico correspondente aos circuitos existentes deve satisfazer as duas leis de Kirchhoff e a outra parte referente aos circuitos candidatos à expansão deve satisfazer somente a primeira lei de Kirchhoff.

Este modelo tem como objetivo contornar algumas deficiências apresentadas nos outros dois modelos (Transporte e CC). Para o modelo de transporte é indiferente trabalhar com redes elétricas conexas ou não, porém pode apresentar soluções bastante afastadas do modelo CC. Por outro lado, a modelagem CC apresenta problemas com redes não conexas. Assim, o modelo híbrido permite encontrar soluções mais próximas do modelo CC e com a vantagem de trabalhar eficientemente com sistemas não conexas.

Deve-se ter em mente que as modelagens de fluxo de carga mencionadas até aqui, são modelagens relaxadas e que os planos de expansão obtidos através destas, posteriormente, deverão ser testados utilizando o modelo completo de operação de sistemas elétricos de potência, isto é, o modelo de fluxo de carga CA.

2.4 HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS

A seguir será apresentado um resumo dos principais algoritmos heurísticos construtivos empregados na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, tendo como base a referência [36].

2.4.1 Algoritmo de Garver

O algoritmo heurístico construtivo proposto por Garver [3], no início da década de 70, foi o primeiro a ser utilizado na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. O algoritmo de Garver iniciou a fase dos heurísticos construtivos com o objetivo de encontrar soluções de boa qualidade e não necessariamente a solução ótima global. Sendo assim, Garver propôs a utilização de uma modelagem de fluxo de carga relaxada, atualmente conhecida como modelo de transporte, como a maneira mais apropriada para a resolução de problemas de planejamento, ao invés do uso de modelos mais exatos. Assim, o problema de otimização proposto por Garver pode ser formulado como:

$$\text{Min} \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \quad (2.1)$$

s.a

$$S.f + g = d \quad (2.2)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \cdot \bar{f}_{ij} \quad (2.3)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (2.4)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (2.5)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro}$$

onde:

c_{ij} é o componente de custo da construção do circuito candidato $i-j$;
 n_{ij} é o número de circuitos candidatos selecionados à expansão entre as barras $i-j$;
 S é a matriz de incidência nodal;
 f é o vetor de fluxos de potência ativa;
 g é o vetor de geração de potência ativa;
 d é o vetor de demanda do sistema elétrico;
 n_{ij}^0 é o número de circuitos existentes na topologia base entre as barras $i-j$;
 \bar{g} é o limite máximo de geração de potência ativa;
 \bar{f}_{ij} é o limite máximo de fluxo de potência ativa entre as barras $i-j$;
 \bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos candidatos entre as barras $i-j$.

O problema descrito acima é classificado como um problema de programação linear inteira mista (PLIM). Garver propôs o relaxamento das variáveis inteiras aceitando valores contínuos para n_{ij} e com isso, transformou um problema originalmente de PLIM, de difícil solução, em um problema simples de programação linear. É evidente que uma solução que indique valores contínuos de expansão é inaceitável como proposta de planejamento, porém pode ser uma boa ideia como estratégia de encontrar boas soluções para variáveis inteiras.

A proposta de Garver, então, consiste em resolver o problema de otimização relaxado, encontrando uma solução ótima contínua para a topologia base (n_{ij}^0). Com os valores de n_{ij} conhecidos, Garver sugeriu que o circuito candidato à expansão que transportar o maior fluxo de potência ativa ($f_{ij} = n_{ij} \bar{f}_{ij}$) seja inserido à topologia base. Este procedimento é repetido adicionando-se em cada passo do processo de resolução o circuito mais atrativo. Sendo assim, o processo é encerrado quando a solução correspondente a topologia corrente apresentar todos os valores de n_{ij} nulos, significando que foi encontrada uma topologia factível, representando a proposta de planejamento do algoritmo de Garver.

O algoritmo de Garver pode ser resumido nas seguintes etapas:

- I. Adotar a topologia base como topologia corrente;
- II. Resolver o problema de programação linear para a topologia corrente. Se a solução indicar valores nulos para todos os circuitos candidatos (n_{ij}) foi encontrada uma topologia factível e o processo termina. Caso contrário seguir para a próxima etapa;

III. Calcular os valores dos fluxos em todos os circuitos candidatos ($n_{ij} \neq 0$). Identificar o circuito candidato mais atrativo e adicioná-lo a topologia corrente. Voltar à etapa II.

2.4.2 Algoritmo de Mínimo Esforço

Diante dos resultados obtidos por Garver, apareceram trabalhos propondo a utilização da modelagem CC no desenvolvimento de algoritmos heurísticos construtivos. O modelo CC em comparação com o modelo de transporte é uma representação mais adequada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, uma vez que na modelagem CC todos os circuitos do sistema elétrico devem obedecer as duas leis de Kirchhoff. Assim, foi proposto em 1982 o algoritmo de mínimo esforço [4]. Este algoritmo heurístico construtivo utiliza a modelagem de fluxo de carga CC e faz uso de índice de sensibilidade na indicação dos caminhos de investimento na transmissão. Assim, como no algoritmo de Garver, é adicionado um único circuito em cada passo do processo de resolução. A formulação do problema de otimização, a ser resolvido pelo algoritmo de mínimo esforço, é mostrada abaixo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2.6)$$

s.a

$$B\theta + g + r = d \quad (2.7)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (2.8)$$

$$0 \leq r \leq \bar{r} \quad (2.9)$$

θ irrestrito

onde:

n é o número de geradores artificiais que representam o corte de carga;

B é a matriz de susceptância nodal;

θ é o vetor referente aos ângulos de potência;

g é o vetor referente a geração de potência ativa;

r é o vetor referente aos geradores artificiais de potência ativa;

d é o vetor de demanda do sistema elétrico;

\bar{g} é o limite máximo de geração de potência ativa;

\bar{r} é o limite máximo do corte de carga.

A função objetivo (2.6) corresponde a minimização dos cortes de carga no sistema elétrico. Os possíveis cortes de carga realizados no sistema elétrico são representados no problema de otimização através de unidades geradoras artificiais tornando o problema de otimização sempre viável.

A restrição de igualdade (2.7) é referente a equação de balanço de potência linearizada e as inequações (2.8) e (2.9) correspondem aos limites superiores e inferiores das unidades geradoras e do corte de carga, respectivamente.

Como solução do problema de otimização tem-se todos os ângulos de potência do sistema elétrico e a partir daí pode-se determinar os fluxos de potência (f_{ij}) através de todos os circuitos da rede pela seguinte expressão:

$$f_{ij} = -\gamma_{ij}\theta_{ij} \quad (2.10)$$

onde:

γ_{ij} é a susceptância do circuito entre as barras i - j ;

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

Assim, se existirem circuitos sobrecarregados ou cortes de carga no sistema deve-se adicionar a topologia corrente, o circuito candidato à expansão que apresentar o melhor desempenho determinado por um índice de sensibilidade (IS_{ij}^{me}), dado pela seguinte expressão:

$$IS_{ij}^{me} = -\frac{1}{2}\gamma_{ij}\theta_{ij}^2 \quad (2.11)$$

Sendo assim, o caminho que apresentar o maior valor de IS_{ij}^{me} é o caminho mais atrativo e então onde deve ser construído o respectivo circuito candidato. Este indicador de sensibilidade permite localizar o circuito candidato à expansão que uma vez adicionado a topologia corrente produz a maior variação de fluxos de potência ativa e, conseqüentemente,

uma redução da sobrecarga total no sistema elétrico. Nos passos intermediários do algoritmo de mínimo esforço sempre existem circuitos sobrecarregados, uma vez que os ângulos de potência, exceto o da barra de referência, são irrestritos. Desse maneira, o processo termina quando os circuitos candidatos adicionados à topologia base permitem uma operação adequada do sistema elétrico, isto é, sem circuitos sobrecarregados e sem cortes de carga.

Um aspecto complicador é o fato de que podem existir barras e/ou regiões isoladas da parte conexa do sistema elétrico. Com isso, têm-se os seguintes problemas: (i) para sistemas elétricos não conexos a modelagem CC geralmente não apresenta solução; (ii) é necessário ter todos os valores dos ângulos de potência para o cálculo dos índices de sensibilidade (IS_{ij}^{me}). Estes problemas foram solucionados através da utilização de uma rede fictícia superposta a rede elétrica já existente, onde os circuitos pertencentes a esta rede fictícia têm como característica valores baixíssimos de susceptâncias (γ_{ijFIC}) quando comparados com susceptâncias de circuitos candidatos à expansão, isto é, $\gamma_{ijFIC} \ll \gamma_{ij}$. Esta rede fictícia tem como objetivo apenas tornar o sistema elétrico conexo.

O algoritmo de mínimo esforço pode ser resumido nas seguintes etapas:

- I. Adotar a topologia base como topologia corrente;
- II. Resolver o problema de programação linear para a topologia corrente. Se a solução não indicar sobrecargas nos circuitos e cortes de carga no sistema foi encontrada uma topologia factível, então passe para a etapa IV. Caso contrário seguir para a próxima etapa;
- III. Calcular os índices de sensibilidade, equação (2.11), para todos os caminhos possíveis de expansão e adicionar a topologia corrente o circuito candidato cujo caminho apresenta o maior valor absoluto de IS_{ij}^{me} e voltar a etapa II;
- IV. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custo e eliminar definitivamente do plano de expansão aqueles, que uma vez simulada a saída, não produzam cortes de carga e/ou sobrecarga no sistema elétrico em análise.

2.4.3 Algoritmo de Mínimo Corte de Carga

O algoritmo de mínimo corte de carga foi proposto em 1985 [6]. Este algoritmo é muito parecido com o algoritmo de mínimo esforço, pois utiliza o modelo de fluxo de carga CC e

índice de sensibilidade como indicador das rotas de expansão a serem construídas. Entretanto, no algoritmo de mínimo esforço os problemas de operação foram contornados permitindo que os circuitos sejam sobrecarregados e no algoritmo de mínimo corte de carga estas sobrecargas não são permitidas, uma vez que os circuitos devem permanecer dentro de limites de capacidade. Assim, tem-se a seguinte formulação:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2.12)$$

s.a

$$B\theta + g + r = d \quad (2.13)$$

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} \quad (2.14)$$

$$|\phi_{ij}| \leq 10 \cdot \bar{\theta}_{ij} \quad (2.15)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (2.16)$$

$$0 \leq r \leq \bar{r} \quad (2.17)$$

$$\bar{\theta}_{ij} = \frac{\bar{f}_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad (2.18)$$

θ irrestrito

onde:

n é o número de geradores artificiais que representam o corte de carga;

B é a matriz de susceptância nodal;

θ é o vetor referente aos ângulos de potência;

g é o vetor referente a geração de potência ativa;

r é o vetor referente aos geradores artificiais de potência ativa;

d é o vetor de demanda do sistema elétrico;

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

$\bar{\theta}_{ij}$ é a diferença angular máxima permitida entre as barras $i-j$;

\bar{f}_{ij} é o limite de capacidade do circuito $i-j$;

ϕ_{ij} é a diferença angular permitida ao circuito fictício $i-j$;

\bar{g} é o limite máximo de geração de potência ativa;

\bar{r} é o limite máximo do corte de carga.

As restrições funcionais (2.14) e (2.15) correspondem respectivamente, às de fluxo de potência ativa dos circuitos correntes e as restrições angulares referentes aos circuitos fictícios. O valor do fluxo de potência ativa é dado pela equação (2.10).

Para cada restrição do problema de otimização (2.12) está associada um multiplicador de Lagrange (λ). Assim, o indicador de sensibilidade do algoritmo de mínimo corte de carga (IS_{ij}^{mcc}) é dado pela seguinte expressão:

$$IS_{ij}^{mcc} = -(\theta_{ij}).(\lambda_{ij}) \quad (2.19)$$

onde:

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

λ_{ij} é a diferença entre os multiplicadores de Lagrange referentes as equações de balanço de potência (2.13) das barras $i-j$.

Este indicador de sensibilidade permite localizar o circuito candidato que uma vez adicionado à topologia base ou corrente produz uma diminuição mais expressiva do corte de carga no sistema elétrico. Assim, o circuito candidato mais atrativo é aquele que apresentar o maior valor absoluto de IS_{ij}^{mcc} .

Devido à modelagem utilizada aparecem os mesmos problemas relacionados com a existência de sistema elétricos não conexos. Entretanto, com as restrições de violação de fluxo inseridas ao problema de otimização, uma nova condição deve ser imposta na representação dos circuitos fictícios. Esta condição garante que as diferenças angulares entre os laços artificiais não modifiquem as aberturas angulares dos circuitos existentes na topologia corrente. O algoritmo de mínimo corte de carga pode ser resumido nas seguintes etapas:

I. Adotar a topologia base como topologia corrente;

II. Resolver o problema de programação linear para a topologia corrente. Se a solução não indicar cortes de carga no sistema foi encontrada uma topologia factível, então passe para a etapa IV. Caso contrário seguir para a próxima etapa;

III. Calcular os índices de sensibilidade (IS_{ij}^{mcc}), equação (2.19), para todos os caminhos possíveis de expansão e adicionar a topologia corrente o circuito cujo caminho apresenta o maior valor absoluto de IS_{ij}^{mcc} . Voltar à etapa anterior;

IV. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custo e eliminar definitivamente do plano de expansão aqueles, que uma vez simulada a saída, não produzam cortes de carga no sistema elétrico.

2.4.4 Algoritmo de Villanasa-Garver

O algoritmo de Villanasa-Garver [5] foi proposto em 1985 e utilizou duas redes elétricas superpostas com a finalidade de resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Uma rede elétrica representa os circuitos existentes na topologia corrente e a outra corresponde aos circuitos fictícios existentes em todos os caminhos possíveis à expansão. O funcionamento do algoritmo consiste no fato de que o sistema elétrico deve ser capaz de operar adequadamente fazendo uso somente dos circuitos existentes na topologia corrente, isto é, sem o uso dos circuitos fictícios. Os circuitos fictícios só devem ser utilizados quando a topologia corrente for insuficiente para resolver os problemas de operação do sistema elétrico.

Os circuitos presentes na topologia corrente devem satisfazer as duas leis de Kirchhoff e as restrições de fluxo de potência ativa. Já os circuitos pertencentes à rede fictícia devem satisfazer apenas a primeira lei de Kirchhoff. Esta modelagem foi denominada de híbrida, pois uma parte de rede elétrica é representada pela modelagem CC e a outra pelo modelo de transporte. O algoritmo de Villanasa-Garver resolve, a cada passo, o seguinte problema de otimização.

$$\text{Min} \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} \quad (2.20)$$

s.a

$$Sf + B\theta + g = d \quad (2.21)$$

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_1 \quad (2.22)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_2 \quad (2.23)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (2.24)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (2.25)$$

onde:

c_{ij} é o custo de investimento na transmissão entre as barras i - j ;

n_{ij} é o número de circuitos fictícios adicionados entre as barras i - j ;

S é a matriz de incidência nodal referente aos circuitos fictícios;

f é o vetor referente ao fluxo de potência ativa nos circuitos fictícios;

B é a matriz de susceptância nodal;

θ é o vetor referente aos ângulos de potência;

g é o vetor referente a geração de potência ativa;

d é o vetor de demanda do sistema elétrico;

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

\bar{f}_{ij} é o limite de capacidade do circuito i - j ;

\bar{g} é o limite máximo de geração de potência ativa;

\bar{n}_{ij} é o número máximo de circuitos fictícios entre as barras i - j ;

Ω_1 é o conjunto de circuitos existentes na topologia corrente (modelo CC);

Ω_2 é o conjunto de circuitos fictícios (modelo de Transporte).

As restrições funcionais (2.22) e (2.23) são referentes as violações de fluxo pertinentes aos circuitos correntes e fictícios respectivamente. Assim, se a topologia corrente não consegue atender o sistema elétrico, então devem aparecer fluxos de potência ativa percorrendo os circuitos fictícios de modo a contornar o problema de operação. Neste caso é adicionada a topologia corrente um circuito no caminho identificado pelo circuito fictício que transporta o maior fluxo de potência ativa. O processo de expansão termina quando o valor da função objetivo (2.20) for nulo, indicando que as expansões realizadas permitem ao sistema elétrico operar de maneira adequada, sem a necessidade da utilização dos circuitos fictícios.

Existem dois detalhes importantes do algoritmo de Villanasa-Garver: (i) é o fato de que em cada passo do processo de resolução é necessário atualizar a estrutura da matriz susceptância nodal incorporando o efeito do circuitos fictícios adicionados a topologia corrente; (ii) o circuito fictício adicionado a topologia corrente passa a ter a restrição (2.22) como restrição de violação de fluxo de potência ativa, ao invés da restrição (2.23). Obviamente, os problemas peculiares dos sistemas não conexos são contornados pela rede fictícia.

O algoritmo de Villanasa-Garver pode ser resumido nas seguintes etapas:

- I. Adotar a topologia base como topologia corrente;
- II. Resolver o problema de programação linear para a topologia corrente. Se a solução indicar um valor nulo para a função objetivo, então foi encontrada uma topologia factível passar para a etapa IV. Caso contrário seguir para a próxima etapa;
- III. Adicionar a topologia corrente um circuito no caminho do circuito fictício que transporta o maior fluxo de potência e então, volte à etapa II;
- IV. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custo e eliminar definitivamente do plano de expansão aqueles, que uma vez simulada a saída, não produzam cortes de carga no sistema elétrico.

2.4.5 Algoritmo Integrado

Este algoritmo foi proposto por Romero e Rocha [37] e utiliza os índices de sensibilidade dos quatro algoritmos heurísticos construtivos mencionados anteriormente (Garver, Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga e Villanasa-Garver) e a estratégia do algoritmo de mínimo corte de carga. O algoritmo integrado determina a melhor proposta de expansão de cada um dos quatro algoritmos heurísticos e verifica a diminuição do corte de carga para cada uma das propostas. O circuito mais atrativo é o que apresenta uma maior relação (IS_k^{ai}) (2.26) entre o corte de carga e o custo do investimento, dada pela seguinte expressão:

$$IS_k^{ai} = \frac{W_c - W_k}{\delta_k} \quad (2.26)$$

onde:

W_c é o valor do corte de carga obtido com a topologia corrente;

W_k é o valor do corte de carga produzido simulando a proposta de cada um dos quatro AHC, $k=1,2,3,4$;

δ_k é o custo de investimento da proposta de expansão em análise.

O algoritmo Integrado pode ser resumido nas seguintes etapas:

- I. Adotar a topologia base como topologia corrente;
- II. Para a topologia corrente resolver os problemas de programação linear referente aos quatro algoritmos e identificar a proposta de cada um destes algoritmos através dos respectivos indicadores;
- III. Para cada proposta encontrada, simular a entrada do circuito proposto e calcular o valor do corte de carga (W_k) pela equação (2.12). Se alguma das quatro propostas não apresentar corte de carga, então se deve adicionar esta proposta à topologia corrente e passar para a etapa IV. Caso contrário, calcular o índice de sensibilidade IS_k^{ai} pela equação (2.26). Adicionar a topologia base a proposta que apresentar o maior valor de IS_k^{ai} e voltar a etapa II.
- IV. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custo e eliminar definitivamente do plano de expansão aqueles, que uma vez simulada a saída, não produzam cortes de carga no sistema elétrico.

2.4.6 Algoritmo Heurística Sigmoide

Este algoritmo foi proposto, em 2003, por Silva Junior [7] e [10]. O algoritmo heurístico utiliza como técnica de resolução a metodologia primal-dual de pontos interiores (MPI) e as decisões de expansão (0-1) são representadas através de uma função contínua PE , dada pela equação (2.27).

A rede de transmissão é representada por um modelo CC de fluxo de carga modificado, onde as decisões de expansão são incorporadas ao problema de otimização através das equações originais do modelo CC (2.28) e o critério de seleção da expansão é decidido através

de heurística baseada na ideia proposta por Garver [3], de modo a evitar a explosão combinatorial referente às alternativas de expansão.

$$PE_{ij} = \frac{e^x - 1}{e^x + 1} \quad (2.27)$$

$$f_{ij} = -PE_{ij} \gamma_{ij} \theta_{ij} \quad (2.28)$$

onde:

PE_{ij} é o parâmetro de expansão do circuito candidato entre as barras $i-j$;

C é o conjunto de circuitos candidatos à expansão.

O algoritmo Heurística Sigmoide pode ser resumido nas seguintes etapas:

- I. Adotar a topologia base como topologia corrente;
- II. Se a topologia não apresentar corte de carga, passar para a etapa IV. Caso contrário, ir para etapa III.
- III. Para a topologia corrente resolver os problemas de programação linear de posse do valores de PE de todos os circuitos candidatos (2.27) e dos fluxos (2.28). Definir entre os circuitos candidatos à expansão, aquele que transposta o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa e voltar na etapa II;
- IV. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custo e eliminar definitivamente do plano de expansão aqueles, que uma vez simulada a saída, não produzam cortes de carga no sistema elétrico.

2.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado um resumo dos principais algoritmos heurísticos construtivos existentes na literatura e as principais modelagens de fluxo de carga utilizadas. Apesar de geralmente não encontrarem soluções ótimas globais, os algoritmos heurísticos construtivos são importantes pela facilidade de compreensão, implementação e baixo esforço

computacional e em muitos casos são empregados como geradores de topologias para a inicialização de algoritmos multimodais, uma vez que a eficiência da busca no espaço de soluções é função das soluções iniciais factíveis.

3 OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA

3.1 INTRODUÇÃO

A técnica de otimização bioinspirada “*Particle Swarm Optimization (PSO)*”, conhecida como Enxame de Partículas (EP), foi proposta pelo engenheiro eletricitista Russel Eberhart e pelo psicólogo James Kennedy no ano de 1995 [38], sendo inspirada no comportamento social de determinadas espécies, tais como, aves e peixes. Esta metodologia foi baseada no estudo feito pelo biólogo Frank Heppner [39], 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.

No algoritmo PSO, os indivíduos (pássaros) são referenciados como partículas, que se movem estocasticamente dentro do espaço de busca. Cada partícula é representada por um vetor cuja dimensão é igual à dimensão do espaço de busca e a sua inicialização – posição e velocidade – se dá de maneira aleatória. A melhor posição já alcançada por qualquer indivíduo do bando, também chamada de experiência própria (cognitiva), é guardada na memória e, em seguida, é comunicada à população, influenciando o movimento do bando em direção à região mais promissora detectada até o momento. A melhor posição alcançada pelo bando também é guardada na memória [8].

O PSO é versátil e de fácil implementação, já que suas características de não necessitar de informações, tais como, a existência de limites, ou de derivadas (gradiente) da função objetivo, ou funções de restrições, sendo suficiente a existência de uma função adaptação dos indivíduos para sua aplicação [40] e [41]. Além disso, podem tratar variáveis contínuas e discretas com certa facilidade. Devido a estas características optou-se por utilizá-lo.

Este comportamento é baseado na inteligência coletiva ou social sendo a base do processo de otimização descrito a seguir.

3.2 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO VIA PSO

No processo de otimização via PSO, 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 (enxame). Ao longo do tempo, o enxame obtém sucesso.

O deslocamento de cada partícula é realizado sob a ação de três vetores que se somam, que são: a inércia, a memória e a cooperação. A inércia impele a partícula na direção que ela vinha seguindo. A memória atrai a partícula para a melhor posição já alcançada pela própria partícula desde o início do processo. A cooperação atrai a partícula para a melhor posição já alcançada dentre todas as posições visitadas pelo enxame. A maneira encontrada pelo algoritmo para fazer as comparações entre posições é por meio de uma função adaptação.

Cada partícula guarda as informações de suas coordenadas no hiperespaço de busca, associadas a sua melhor posição já alcançada até o momento, chamado de “*pbest*”, e do valor adaptação associado a ela. Outro melhor valor também é armazenado, ou seja, o melhor valor adaptação global, associado a melhor posição no hiperespaço de busca já alcançada dentre todas até então, chamado de “*gbest*” [8].

A aceleração da busca é ponderada por um termo gerado de forma aleatória (*rand*), vinculados a estes as 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;
- Etapa 2: Para cada partícula, determinar o valor da função adaptação (função objetivo do problema em estudo);
- Etapa 3: Avaliar o valor atual da função adaptação 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 adaptação 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 (3.1) e (3.2), respectivamente. Representado na Figura 3-1;
- Etapa 6: Volta-se a etapa 2, até que um determinado critério de parada, pré-estabelecido, seja alcançado, isto é, o número máximo de iterações.

$$V_{i,k} = w.V_{i,k-1} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{i,k-1} - X_{i,k-1}) + c_2 \cdot rand() \cdot (gbest_{k-1} - X_{i,k-1}) \quad (3.1)$$

$$X_{i,k} = (X_{i,k-1} + V_{i,k}) \quad (3.2)$$

onde:

$V_{i,k}$ = Velocidade da partícula i na iteração k ;

$V_{i,k-1}$ = Velocidade da partícula i na iteração $k-1$;

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 $[0,1]$;

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

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

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

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

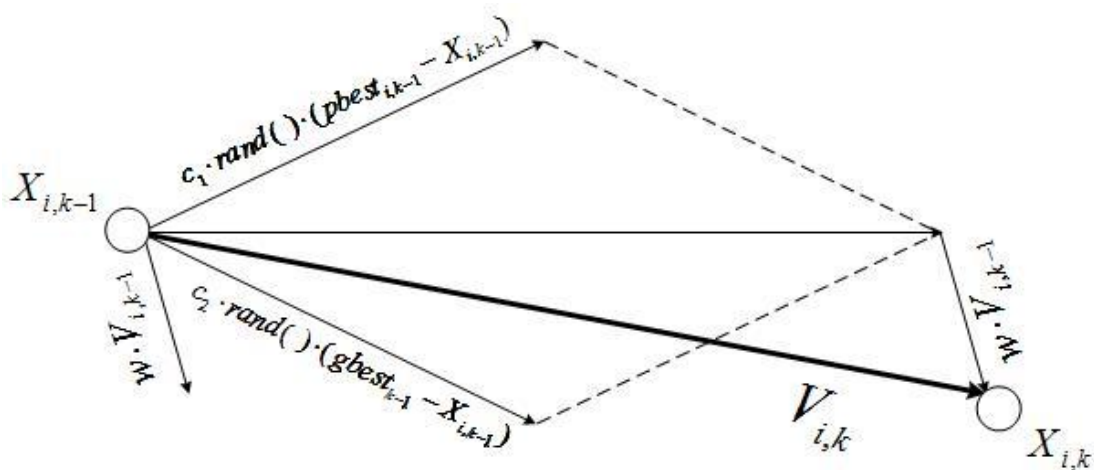


Figura 3-1- Atualização da Posição da Partícula.

A primeira parcela, da equação referente à atualização da velocidade de cada partícula, equação (3.1), corresponde ao momento de inércia da partícula, sendo a ponderação de inércia w . 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 à nova solução. Estes parâmetros são, usualmente, ajustados por tentativa no intervalo contínuo entre 0 e 2 [38].

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, [42] e [43], 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 (3.3). As alterações das velocidades modificam as posições das partículas, fazendo-as moverem-se através da região de solução.

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (3.3)$$

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 3-2 ilustra o processo de deslocamento da otimização via PSO, 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. Com o

passar das iterações, as mesmas acabam convergindo para a solução desejada através do processo bioinspirado anteriormente descrito. Isso é visivelmente observado com a aproximação das partículas em uma mesma direção.

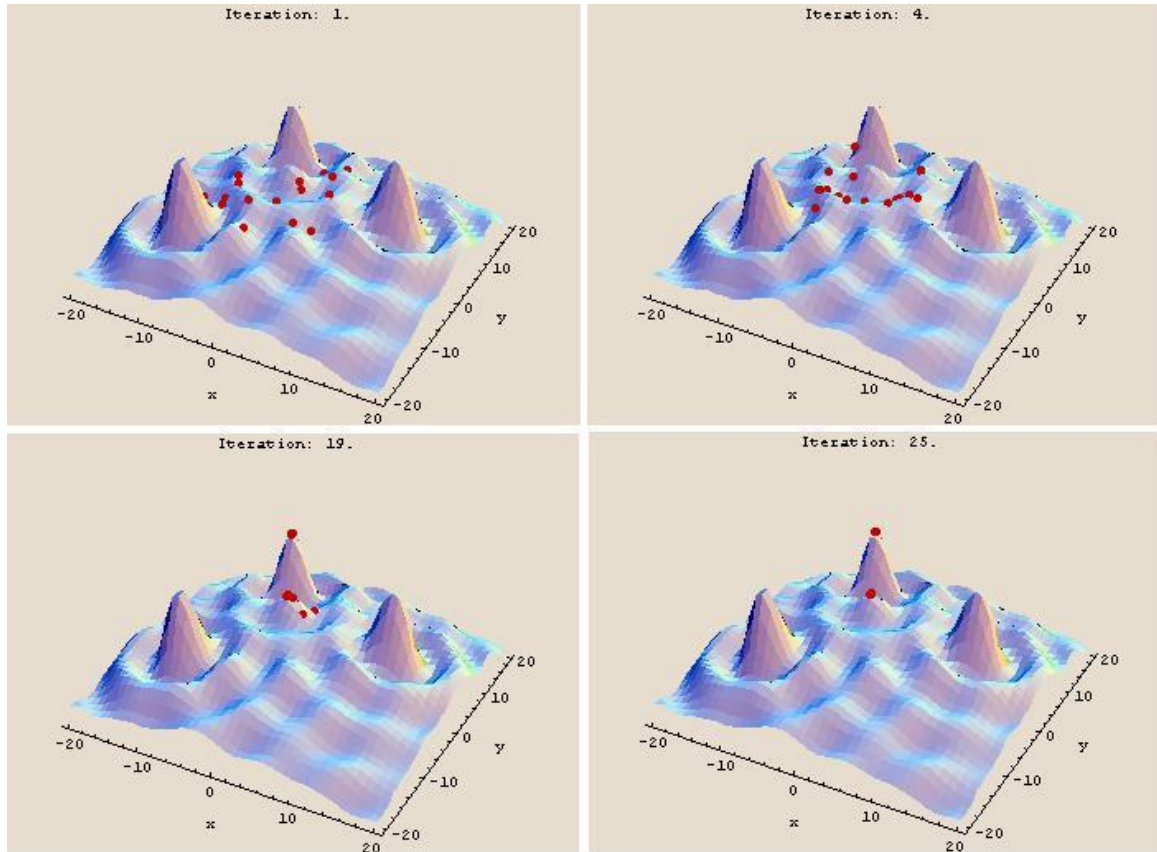


Figura 3-2- Processo de Busca - PSO.

Fonte: <http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~khemka/ps0/model.html>

3.3 OTIMIZAÇÃO VIA PSO 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, isto é, ótimos locais. 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 via PSO tem se mostrado eficiente

para resolução de problemas com as características acima mencionadas.

Na modelagem do problema de planejamento da expansão da transmissão no AHCP as expansões (*PE*) são modeladas como circuitos candidato, representação binária (cada circuito candidato), já no PSO como ramos candidato, representação inteira (quantos reforços contém cada ramo candidato).

Desde seu surgimento, o PSO tem despertado interesse na comunidade científica. Vários trabalhos na literatura especializada aplicam a técnica na forma original ou atrelada à outras técnicas, denominadas híbridas ou melhoradas na resolução do planejamento estático da expansão da transmissão [44], [45] e [46], por este motivo foi escolhido para aplicação nesta tese.

Assim, a modelagem, os parâmetros e os critérios utilizados para adaptar o algoritmo de otimização bioinspirado ao problema em estudo, serão apresentados.

3.3.1 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 à expansão. A Figura 3-3 apresenta a representação de uma partícula, 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 3-3-Representação da Partícula.

3.3.2 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 a formação inicial do enxame é gerada 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 à expansão. Como a codificação da partícula é inteira, arredonda-se o número sorteado para o inteiro mais próximo.

3.3.3 Avaliação da Partícula

A atualização da velocidade de cada partícula existente no enxame é dada através da equação (3.1), sendo esta em 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 adaptação) 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.

3.3.4 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]. Neste trabalho, adotou-se $c_1 = c_2 = 2$ [40]. Já o valor do peso inercial w é determinado através de (3.3), onde o mesmo varia ao longo do processo iterativo. 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-se atualizar o deslocamento e a velocidade do enxame.

Como o deslocamento deve ser discreto, pois as soluções referem-se às construções ou não de linhas de transmissão, e estas são por natureza decisões discretas, optou-se por resolver esta questão, simplesmente, arredondando o deslocamento final atualizado, equação (3.4). Destaca-se que na literatura existem outras formas para o tratamento de variáveis discretas via PSO [47] e [48].

$$X_{i,k} = \text{round}(X_{i,k-1} + V_{i,k}) \quad (3.4)$$

Após a atualização final, equação (3.4), deve-se verificar se há alguma violação referente ao número máximo e/ou mínimo de expansões por rota candidata. Assim, devem-se verificar as situações descritas pela equação (3.5):

$$\begin{cases} X_{i,k} > NEPC \rightarrow X_{i,i} = NEPC \\ X_{i,k} < 0 \rightarrow X_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

3.3.5 Critério de Convergência

Como critério de convergência do processo de otimização bioinspirado foi adotado um número máximo de iterações, devido aos bons resultados das inúmeras simulações computacionais realizadas, compatibilizando qualidade e tempo computacional.

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Foram apresentadas as informações básicas do processo de otimização bioinspirado via PSO, 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 [16], [24], [44], [49], [50], [51], [52] e [53] mostram a capacidade do algoritmo na resolução do problema aqui em estudo.

4 ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO PARA REDUÇÃO DAS ROTAS CANDIDATAS À EXPANSÃO EM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 ALGORITMO HEURÍSTICO UTILIZADO

O algoritmo heurístico construtivo proposto utilizado tem como base os trabalhos [7] e [10]. As alterações propostas têm como objetivo proporcionar a obtenção de um conjunto reduzido de rotas de expansão, visando aumentar a eficiência do processo de busca multimodal, bioinspirado. Para tanto, deve-se mencionar que:

(i) O algoritmo heurístico utiliza como técnica de solução a metodologia primal-dual de pontos interiores [54], a qual permite a inclusão das não linearidades inerentes ao problema de planejamento;

(ii) A decisão da expansão do sistema de transmissão é definida através da variação do parâmetro de expansão (PE) e a inclinação da função tangente hiperbólica é incorporada ao problema de otimização através do modelo CC de fluxo de carga [7];

(iii) A metodologia proposta faz uso de sete índices de sensibilidade, com o objetivo de selecionar um conjunto de rotas relevantes à expansão.

4.2 FORMULAÇÃO ADOTADA

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 todas as linhas candidatas à expansão, as linhas 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 das linhas existentes na topologia base de um sistema, C o conjunto das linhas candidatas à expansão e por F o conjunto das linhas fictícias, o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão é formulado como:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{nr} c_i \cdot r_i + \sum_{l \in \Omega C} c_l \cdot PE_l \quad (4.1)$$

$$g_i + r_i - \sum_{l \in \Omega i} f_l = d_i \quad (4.2)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (4.3)$$

$$0 \leq r_i \leq \bar{r}_i \quad (4.4)$$

$$0 \leq PE_l \leq 1 \quad \forall (l) \in \Omega C \quad (4.5)$$

$$f_l = -\gamma_l \theta_l \quad \forall (l) \in \Omega E \quad (4.6)$$

$$f_l = -\gamma_{IFIC} \varphi_l \quad \forall (l) \in \Omega F \quad (4.7)$$

$$f_l = -PE_l \gamma_l \theta_l \quad \forall (l) \in \Omega C \quad (4.8)$$

$$|f_l| \leq \bar{f}_l \quad \forall (l) \in \Omega E \cup \Omega C \quad (4.9)$$

$$\varphi_l \gg \frac{\bar{f}_l}{\gamma_l} \quad \forall (l) \in \Omega F \quad (4.10)$$

$$\gamma_{IFIC} \ll \quad \forall (l) \in \Omega F \quad (4.11)$$

Onde:

nr é o número de geradores fictícios;

c_i é o custo do déficit de energia (US\$/MW-ano);
 c_l é o custo da construção da linha candidata l (US\$/ano);
 g_i é a geração da unidade geradora na barra i (MW);
 \bar{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);
 \bar{r}_i é o limite máximo da geração fictícia na barra i (MW);
 Ω_i é o conjunto de barras conectadas à barra i ;
 Ω_C é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;
 Ω_E é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;
 Ω_F é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;
 PE_l é o parâmetro de expansão da linha candidata l ;
 f_l é o fluxo de potência ativa da linha l (MW);
 \bar{f}_l é o limite de fluxo de potência ativa da linha l (MW);
 γ_l é a susceptância da linha l ;
 d_i é a demanda na barra i (MW);
 φ_l é a diferença angular entre as barras da linha fictícia l ;
 θ_l é a diferença angular entre as barras da linha l ;
 $\gamma_{l_{fic}}$ é a susceptância da linha fictícia l .

4.2.1 Função Objetivo (FOB)

A função objetivo, equação (4.1) 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 novas linhas, 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 modelo torna-se sempre viável.

4.2.2 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 ativa é dada na equação (4.2), também podendo ser chamada de equação de atendimento a demanda.

4.2.3 Restrições de Canalização de Fluxo de Potência Ativa

A restrição (4.9) corresponde aos limites de fluxo de potência ativa nas linhas existentes e candidatas, representando assim a capacidade de transporte de fluxo das linhas de transmissão e transformadores.

4.2.4 Restrições de Canalização de Geração de Potência Ativa

As restrições (4.3) e (4.4) representam restrições de canalização, ou seja, limites inferiores e superiores, dos geradores existentes e de déficit, sendo estes últimos referentes aos eventuais cortes de carga existentes no sistema.

4.2.5 Restrições de Fluxo Potência Ativa

A formulação proposta em [7] é composta por três tipos de linhas: (i) linhas existentes na topologia base; (ii) das fictícias que permitem deixar os sistemas conexos; (iii) das candidatas à expansão; dados pelas equações (4.6), (4.7) e (4.8), respectivamente, que representam a segunda Lei de Kirchhoff. Pode-se notar que quando uma linha candidata é adicionada à topologia existente, isto é, $PE_l = 1$, a equação (4.8) fica idêntica à equação (4.6) e, assim, a linha candidata passa a fazer parte da topologia existente.

4.2.6 Restrições de Conectividade

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 [34]. De modo a contornar este problema, recorreu-se à utilização de linhas fictícias [4] e [7]. Assim, as linhas fictícias devem obedecer às seguintes condições: (i) possuir valores muito pequenos de susceptância em relação as linhas candidatas; (ii) devem ter uma capacidade de transmissão muito maior que a capacidade permitida as linhas candidatas, isto é, as linhas fictícias devem ter aberturas angulares maiores que as máximas permitidas [6]. Esta condição garante que as diferenças angulares entre os laços fictícios não modifiquem as aberturas angulares das linhas existentes e candidatas. Assim, para cada linha fictícia existente têm-se as restrições (4.10) e (4.11) .

4.2.7 Restrições do Parâmetro de Expansão (PE)

O problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão consiste em decidir entre um conjunto de linhas candidatas à expansão quais devem ser construídas de modo a otimizar os recursos financeiros disponíveis. Esta decisão de construir ou não determinadas

linhas é representada pelo parâmetro de expansão, onde o valor nulo deste parâmetro significa a não construção da determinada linha 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 [7] e [10] a mesma heurística proposta inicialmente por Garver [3], 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.

A modelagem ideal para representar o parâmetro de expansão, do ponto de vista operacional, seria a função degrau, Figura 4-1, uma vez que esta função assume apenas dois valores distintos, que poderiam ser traduzidos como não construir ($PE=0$) ou construir ($PE=1$) determinada linha candidata. Entretanto sua utilização é inviável pelo fato desta função ser descontínua, isto é, não possuir valor de derivada em todo seu domínio.

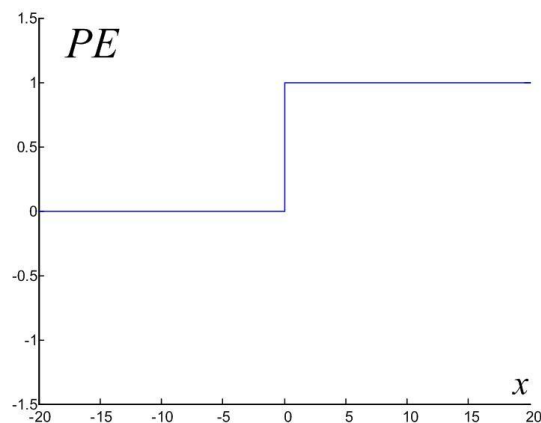


Figura 4-1-Função Degrau.

Em [7] e [10] adotou-se a função tangente hiperbólica, (4.12), para a representação do Parâmetro de Expansão, PE .

$$\text{Tanh} = \frac{e^x - 1}{e^x + 1} \quad (4.12)$$

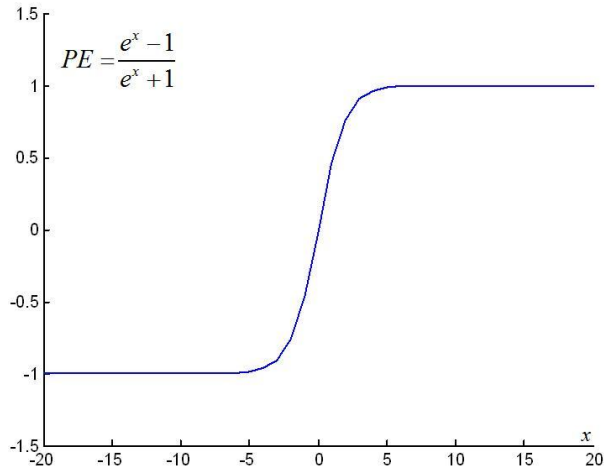


Figura 4-2-Função Tangente Hiperbólica.

A função tangente hiperbólica, Figura 4-2 foi escolhida pelas seguintes características: (i) é uma função contínua e diferenciável; (ii) tem comportamento muito parecido com a curva característica da função degrau, apresentando boa sensibilidade na representação dos dois estados de decisão pertinentes ao problema de planejamento; (iii) as propostas de expansão encontradas utilizando a função tangente hiperbólica, como parâmetro de expansão, apresentaram resultados mais satisfatórios quando comparadas com a utilização de outras funções [7].

Como é permitido pela heurística adotada que o parâmetro de expansão assuma qualquer valor contínuo dentro do intervalo de decisão [0,1], os valores negativos assumidos pela função tangente hiperbólica não fazem parte da região de solução, vide Figura 4-3 .

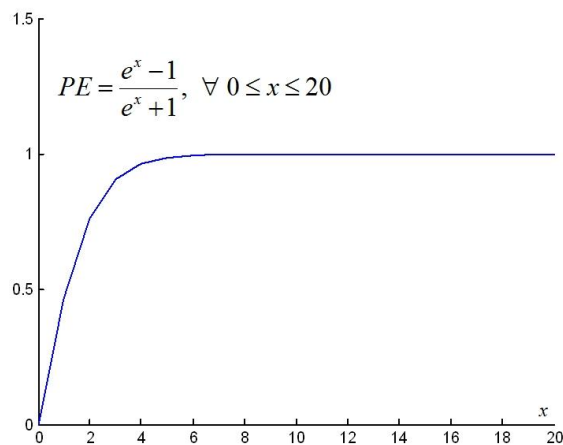


Figura 4-3-Região de Operação do Parâmetro de Expansão.

A partir do comportamento da curva, ilustrada pela Figura 4-3, adota-se os seguintes critérios: (i) para linhas candidatas à expansão tem-se $0 \leq PE \leq 1$. Isto permite ao parâmetro de

expansão assumir qualquer valor contínuo entre o intervalo [0,1]; (ii) para as linhas candidatas selecionadas à expansão, faz-se $PE=1$ durante todo o processo, representando a construção da linha; (iii) para as linhas candidatas não selecionados à expansão faz-se $PE=0$, representando a não construção da linha.

4.3 HEURÍSTICA PROPOSTA

No algoritmo heurístico construtivo proposto AHCP, baseado nos trabalhos [7] e [10], utilizou-se a função tangente hiperbólica modificada (4.13) para representação do PE , onde a constante A inserida varia dentro de um intervalo e com passo previamente definido, vide Figura 4-4, o valor de x varia de 0 a 20 [55].

$$PE = \frac{e^{x/A} - 1}{e^{x/A} + 1}, \quad \forall 0 \leq x \leq 20 \quad (4.13)$$

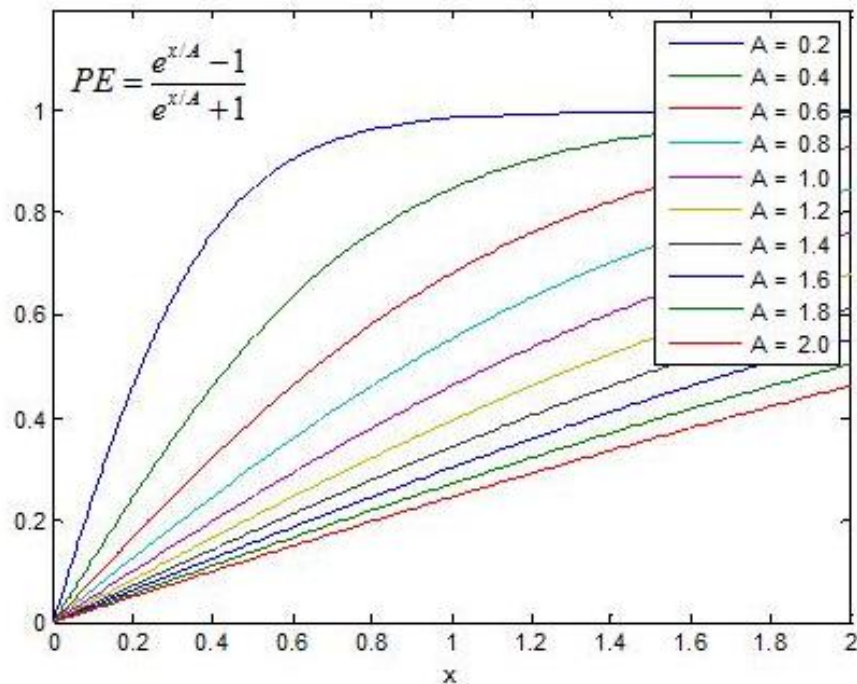


Figura 4-4-Função Tangente Hiperbólica Modificada - Exemplo Ilustrativo.

A medida que o valor de A cresce, a inclinação da curva é alterada. Através deste comportamento é possível executar o algoritmo heurístico construtivo para diferentes

sensibilidades do PE . Ou seja, variando-se os valores de A é possível obter um conjunto de soluções, o qual tem o objetivo de direcionar a busca do processo de otimização multimodal para regiões que possibilitem a obtenção de soluções de boa qualidade.

O algoritmo heurístico construtivo proposto é dividido 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), para cada valor de A adotado, de todas as linhas candidatas a expansão. Com estes valores obtidos, o próximo passo consiste em definir entre as linhas candidatas à expansão, quais devem ser construídas (etapa discreta). Para fazer esta definição, a metodologia proposta faz uso de índices de sensibilidade, sendo utilizados como base os principais índices existentes na literatura, porém ponderados pelos parâmetros de expansão (PE). A seguir são apresentados, de forma sucinta, os índices de sensibilidades propostos.

4.3.1 Sensibilidade Baseada em Garver

O índice proposto por Garver [3], na década de 70, é baseado na linha candidata à expansão que transportar o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa, equação (4.8). Desta forma, a linha que transportar o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa será a linha a ser construída ou adicionada à topologia corrente. Neste trabalho, essa sensibilidade é ponderada pelo parâmetro de expansão PE , equação (4.14), IS_l^{ga1} . A observação experimental de que o valor do fluxo de potência ativa é um bom critério de decisão é puramente empírica, não havendo justificativa matemática.

$$IS_l^{ga1} = -PE_l \gamma_l \theta_l \quad \forall (l) \in C \quad (4.14)$$

Uma outra sensibilidade, também inspirada na heurística de decisão de Garver, consiste na divisão do IS_l^{ga1} de cada linha candidata pelo seu respectivo custo de construção, vide equação (4.15), IS_l^{ga2} . Desta forma, pretende-se incorporar informações econômicas ao índice de sensibilidade, privilegiando, a priori, linhas de menor custo de construção.

$$IS_l^{ga2} = \frac{-PE_l \gamma_l \theta_l}{c_l} \quad \forall (l) \in C \quad (4.15)$$

4.3.2 Sensibilidade Baseada no Mínimo Esforço

A terceira sensibilidade investigada faz uso do índice proposto pelo algoritmo heurístico construtivo de mínimo esforço [4], porém ponderado pelo parâmetro de expansão PE , equação (4.16), IS_l^{me1} .

$$IS_l^{me1} = PE_l \frac{1}{2} \gamma_l \theta_l^2 \quad \forall (l) \in C \quad (4.16)$$

O caminho que apresentar o maior valor absoluto de IS_l^{me} será o caminho mais atrativo e então, adicionado a topologia corrente.

Outra variação da sensibilidade baseada no índice de mínimo esforço é apresentada pela equação (4.17), IS_l^{me2} . Assim como na equação (4.15), o objetivo é incorporar informações econômicas ao índice de sensibilidade.

$$IS_l^{me2} = \frac{PE_l \frac{1}{2} \gamma_l \theta_l^2}{c_l} \quad \forall (l) \in C \quad (4.17)$$

4.3.3 Sensibilidade Baseada no Mínimo Corte de Carga

O quinto índice de sensibilidade, porém ponderado pelo parâmetro de expansão, é baseado no trabalho [6]. Este indicador de sensibilidade permite localizar a linha candidata que uma vez adicionada a topologia base ou corrente produz uma maior diminuição do corte de carga no sistema elétrico. Desta forma, a linha candidata mais atrativa será a que apresentar maior valor de IS_l^{mcc1} , equação (4.18).

$$IS_l^{mcc1} = PE_l(\theta_l)(\lambda_l) \quad \forall(l) \in C \quad (4.18)$$

O IS_l^{mcc1} é o indicador de sensibilidade da função objetivo (4.1) com respeito à susceptância da linha l , os λ são os multiplicadores de Lagrange das restrições (4.2) e os θ_l são os ângulos de tensão das barras do sistema obtidas ao resolver (4.1).

Novamente, de modo a incorporar informações econômicas ao índice de sensibilidade fundamentado no trabalho [6], optou-se em dividir o IS_l^{mcc1} de cada linha candidata pelo seu respectivo custo de construção. Desta forma, a linha candidata com maior valor de IS_l^{mcc2} , equação (4.19), será inserida na topologia corrente.

$$IS_l^{mcc2} = \frac{PE_l(\theta_l)(\lambda_l)}{c_l} \quad \forall(l) \in C \quad (4.19)$$

4.3.4 Sensibilidade baseada em Portfólio

A sensibilidade aqui proposta faz uso dos seis índices de sensibilidades apresentados, IS_l^{ga1} , IS_l^{ga2} , IS_l^{me1} , IS_l^{me2} , IS_l^{mcc1} e IS_l^{mcc2} , de modo a definir a linha candidata que deve ser construída. Para tanto, a linha candidata que obtiver a maior média dada pela equação (4.20), é a linha que deve ser inserida/construída na topologia corrente, $PE=1$, onde $x_{\max}=20$.

$$IS_l^P = \left(\frac{\sum_{i=1}^6 x_{\max} \cdot \frac{|IS_l^i|}{IS_{\max}^i}}{6} \right) \quad \forall(l) \in C \quad (4.20)$$

$i_1=IS_l^{ga1}, i_2=IS_l^{ga2}, i_3=IS_l^{me1}, i_4=IS_l^{me2}, i_5=IS_l^{mcc1}$ e $i_6=IS_l^{mcc2}$

A Figura 4-5 apresenta o fluxograma da metodologia proposta, o qual é dividido em três blocos:

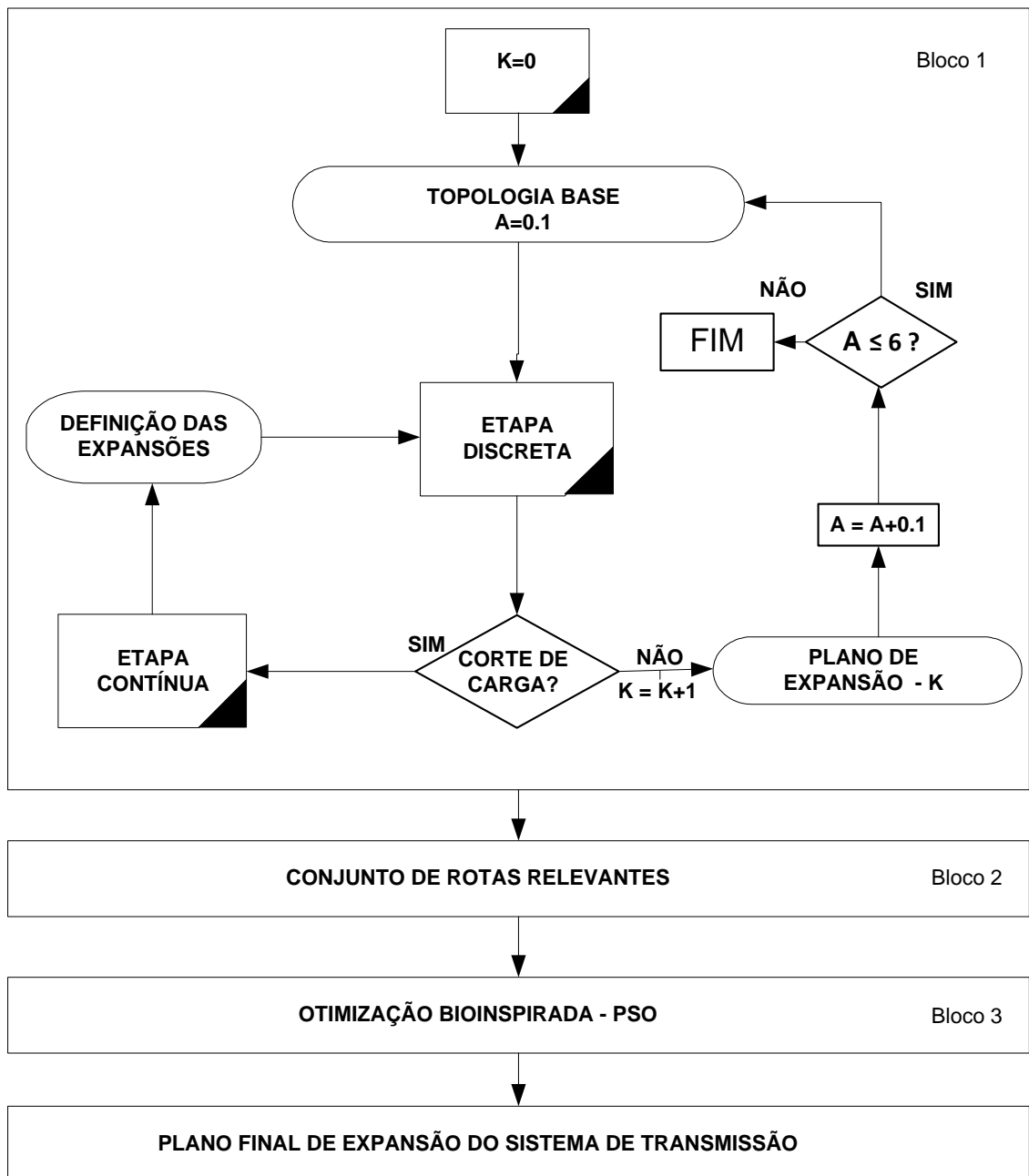


Figura 4-5- Fluxograma da Metodologia Proposta.

(i) Bloco 1: representa o processo heurístico proposto para identificação das rotas de expansão relevantes através das soluções heurísticas encontradas;

(ii) Bloco 2: a formação de um conjunto reduzido de opções de expansão. Esse conjunto reduzido é concebido através da união de todas as rotas de expansão identificadas nas simulações heurísticas realizadas;

(iii) Bloco 3: a obtenção da solução final, via PSO, com base nos procedimentos heurísticos adotados (conjunto reduzido de opções de investimento).

Destaca-se que 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, e os resultados obtidos são utilizados para inicializar o problema de planejamento (etapa contínua).

Como já mencionado, a metodologia proposta utiliza uma estratégia heurística com o objetivo de identificar um conjunto de rotas relevantes de expansão e assim, diminuir de maneira eficiente o espaço de busca para o processo de otimização bioinspirado, Figura 4-6.

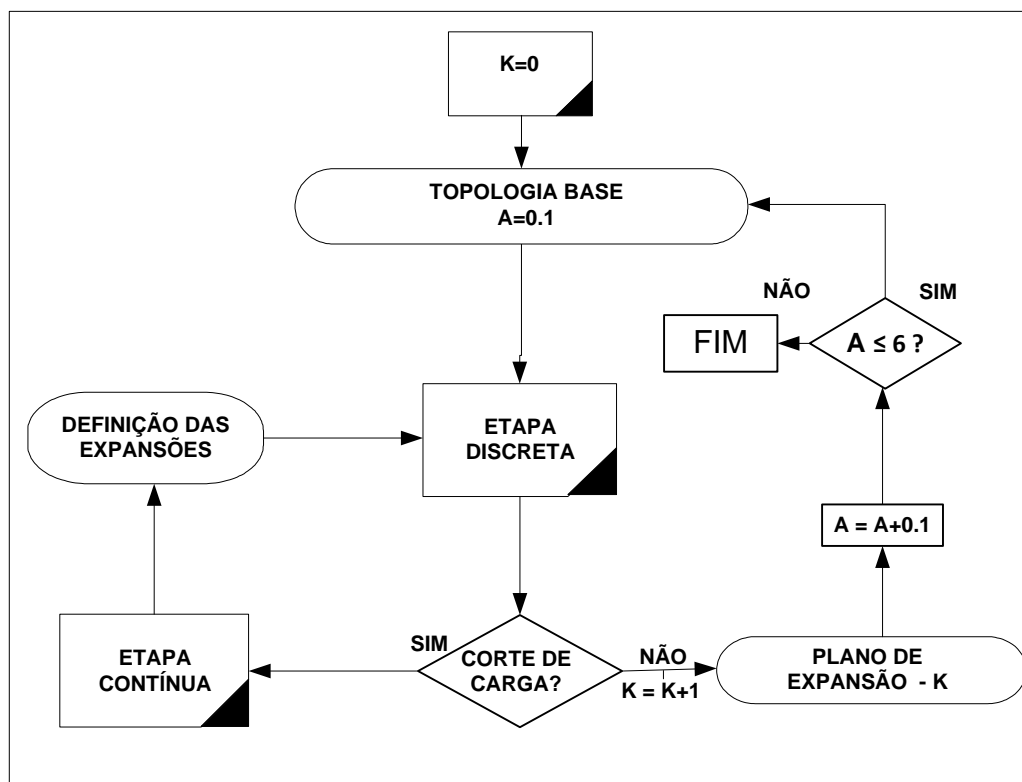


Figura 4-6- Fluxograma do Algoritmo Heurístico Proposto- AHCP.

Na etapa discreta é imposto ao parâmetro de expansão da linha selecionada à construção, pela etapa contínua, o valor unitário, $PE=1$, e aos demais parâmetros das linhas candidatas não selecionados, valores nulos, $PE=0$. Assim, com os valores discretos dos parâmetros de expansão definidos é verificado se o sistema elétrico, com as expansões realizadas, está operando adequadamente. Desta maneira, se o sistema estiver operando com o valor de corte de carga menor que uma tolerância (ε), adotou-se 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 a procura da próxima linha candidata a ser adicionada à topologia corrente.

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 (linhas construídas) vai ser obtida e na qualidade (custo de investimento) desta solução. Sendo assim, a metodologia proposta faz uso da heurística construtiva Figura 4-6,

partindo de diferentes inclinações da função PE , ou seja, de diversos pontos de partidas para que seja possível a formação de um conjunto reduzido de opções de investimento.

A obtenção de um conjunto reduzido de opções de investimento é bastante importante e pertinente, pois independente da técnica de otimização a ser utilizada, permite um aumento da eficiência na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia.

Com o conjunto reduzido e relevante das opções de investimento, este é passado ao processo de otimização multimodal, bioinspirado. Diante das considerações apresentadas, o plano final de expansão é obtido pela técnica de otimização bioinspirada PSO [8] e [55].

4.4 SISTEMA TUTORIAL

Como forma didática de exemplificar a metodologia proposta, utilizou-se um sistema teste de quatro barras conforme Figura 4-7. 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 $\gamma_{ij_{FC}} = \gamma_{ij} \cdot 10^{-3}$, entre as barras 1-4, de maneira a tornar o sistema elétrico conexo.

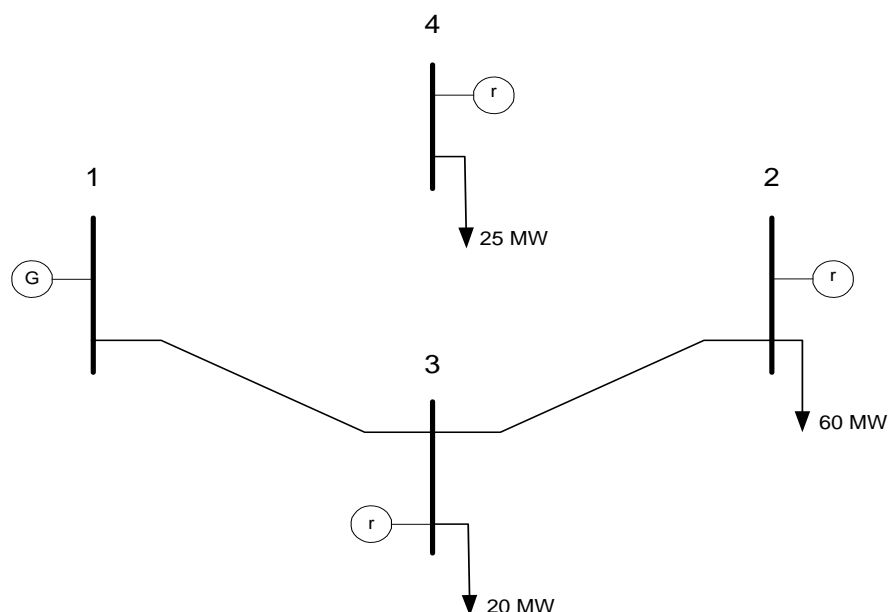


Figura 4-7- Sistema Teste.

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 4-1, Tabela 4-2, Tabela 4-3 e Tabela 4-4.

Tabela 4-1- Dados de barra: 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 4-2- Dados das linhas existentes: Sistema teste

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

Tabela 4-3- Dados da linha fictícia: Sistema teste

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

Tabela 4-4- Dados das linhas candidatas: Sistema teste

Linhas Candidatas	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

O termo A varia de 0.1 a 6 com o passo de 0.1, ou seja, têm-se 60 variações (inclinações) diferentes para a função que modela o parâmetro de expansão, isto é, a metodologia proposta varre uma vasta região passando por diferentes pontos de partida e consequentemente aumentando as chances de sucesso. Para o sistema tutorial, aqui em estudo, serão gerados apenas dois planos de expansão pelo AHCP, o primeiro usando o termo $A = 0.5$ e o segundo $A = 2.5$ a fim de exemplificar de forma detalhada a metodologia proposta. A partir destas variações 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 de energia elétrica. A seguir serão apresentados os passos desta simulação.

1ª PLANO DE EXPANSÃO - TERMO $A = 0.5$ - BLOCO 1

1º Iteração

Etapa Contínua: Nesta etapa o objetivo é a determinação dos valores contínuos referentes aos índices de sensibilidade expostos na Tabela 4-5, com o objetivo de identificar as rotas relevantes de expansão. Diante destes valores, é possível definir pela heurística adotada quais linhas candidatas à expansão devem ser construídas. Esta definição é feita, para cada linha candidata, com base na equação (4.20), índice portfólio IS^P . Sendo assim, na primeira iteração do algoritmo heurístico proposto, a linha que apresenta maior média é a linha candidata localizada entre as barras 1-3. Desta forma, com a expansão definida, etapa contínua, parte-se para etapa discreta.

Tabela 4-5- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
1-3	1.0000	20.0000	20.0000	3.9231	8.7180	20.0000	20.0000	15.4401
2-3	0.4991	4.9617	4.9617	1.9423	4.3161	10.1742	10.1742	6.0883
1-4	0.0735	0.8994	0.4047	20.0000	20.0000	2.9748	1.3387	7.6029
1-2	0.0309	0.0254	0.0076	0.3217	0.2145	2.4937	0.7481	0.6351
2-4	0.0021	0.0006	0.0003	0.3309	0.3309	0.4742	0.2134	0.2250

Etapa Discreta: Nesta etapa, o objetivo é verificar como o sistema está operando com a construção (adição) das linhas na topologia base, definidas na etapa contínua, via fluxo de potência ótimo (FPO) [7]. 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 construtivo proposto parte para uma nova etapa contínua. Na primeira iteração foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros de expansão, ou seja, foram definidas as construções das linhas, conforme apresentado na Tabela 4-6.

Tabela 4-6- Resultado da primeira etapa discreta - PE

LINHA	PE_l
1-3	1
2-3	0
1-4	0
1-2	0
2-4	0

O sistema contendo as expansões da primeira iteração da Figura 4-7, é representado na Figura 4-8.

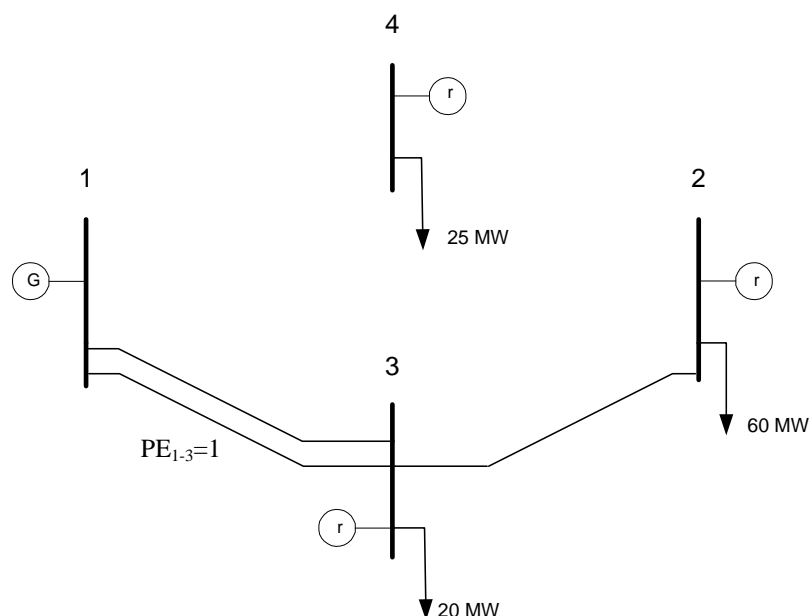


Figura 4-8- Solução do 1ª Iteração do 1º Plano.

A topologia corrente, com a construção da linha candidata entre as barras 1-3, não atende a demanda prevista pelo horizonte de planejamento, apresenta corte de carga de 45 MW, indicando uma operação inadequada. Desta forma, tem-se um nova iteração, retorna-se à etapa contínua.

2º Iteração

Etapa Contínua: O procedimento é análogo ao descrito anteriormente, sendo os valores contínuos referentes aos índices de sensibilidade apresentados na Tabela 4-7. Diante destes valores, é possível definir pela heurística adotada qual linha candidata à expansão deve ser construída. Esta definição é feita, para cada linha candidata, com base na equação (4.20), índice portfólio IS^P . Nesta segunda iteração, a linha selecionada a expansão corresponde a linha localizada entre as barras 2-3, vide Tabela 4-7. Assim, com a expansão definida nesta nova etapa contínua, parte-se para uma nova etapa discreta.

Tabela 4-7- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
2-3	0.4770	4.5807	4.5807	9.6662	9.6662	5.8332	8.6247	7.1586
1-4	0.0137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3501	0.2329	0.0971
1-2	0.0397	0.0421	0.0126	2.1307	0.6392	2.0447	0.9070	0.9627
2-4	0.0004	0.0000	0.0000	0.0008	0.0004	20.0000	13.3070	5.5513

Etapa Discreta: Foram obtidos os seguintes valores para o parâmetro de expansões, ou seja, foram definidas as construções das linhas, conforme exposto na Tabela 4-8 ao final da segunda iteração.

Tabela 4-8- Resultado da segunda etapa discreta - PE

LINHA	PE_l
1-3	1
2-3	1
1-4	0
1-2	0
2-4	0

O sistema elétrico contendo a nova expansão, segunda iteração, é representado na Figura 4-9.

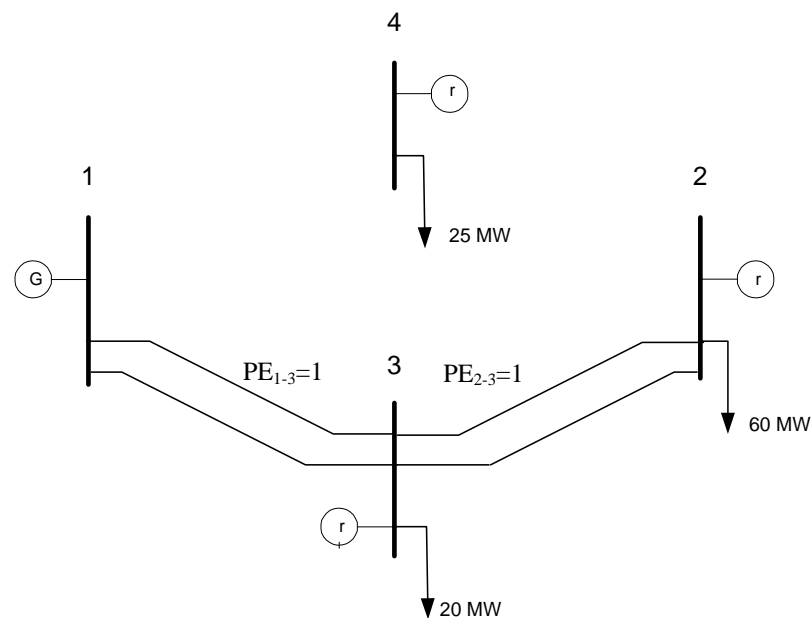


Figura 4-9- Solução da 2ª Iteração do 1ª Plano.

A topologia corrente, com a construção das linhas candidatas entre as barras 1-3 e 2-3 ainda não satisfaz a demanda prevista para o horizonte de planejamento, possui corte de carga de 25MW. Por isso é necessário a realização de uma nova iteração do algoritmo heurístico.

3º Iteração

Na Tabela 4-9 tem-se os valores contínuos referentes aos índices de sensibilidade. Nesta terceira iteração, a linha selecionada a expansão corresponde a linha localizado entre as barras 1-4. Assim, com a nova expansão definida na etapa contínua, parte-se para uma nova etapa discreta.

Tabela 4-9- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
1-4	0.0737	0.9025	0.4061	20.0000	20.0000	1.2760	0.5742	7.1931
1-2	0.0310	0.0224	0.0067	0.2482	0.1655	1.0726	0.3218	0.3062
2-4	0.0018	0.0004	0.0002	0.3070	0.3070	0.2106	0.0948	0.1533

Etapa Discreta: Ao final da terceira iteração foram obtidos os seguintes valores para o parâmetro de expansões, ou seja, foram definidas as construções das linhas, na Tabela 4-10.

Tabela 4-10- Resultado da terceira etapa discreta - PE

LINHA	PE_l
1-3	1
2-3	1
1-4	1
1-2	0
2-4	0

O sistema contendo as expansões, para a terceira iteração, bloco 1 da Figura 4-7 é representado na Figura 4-10.

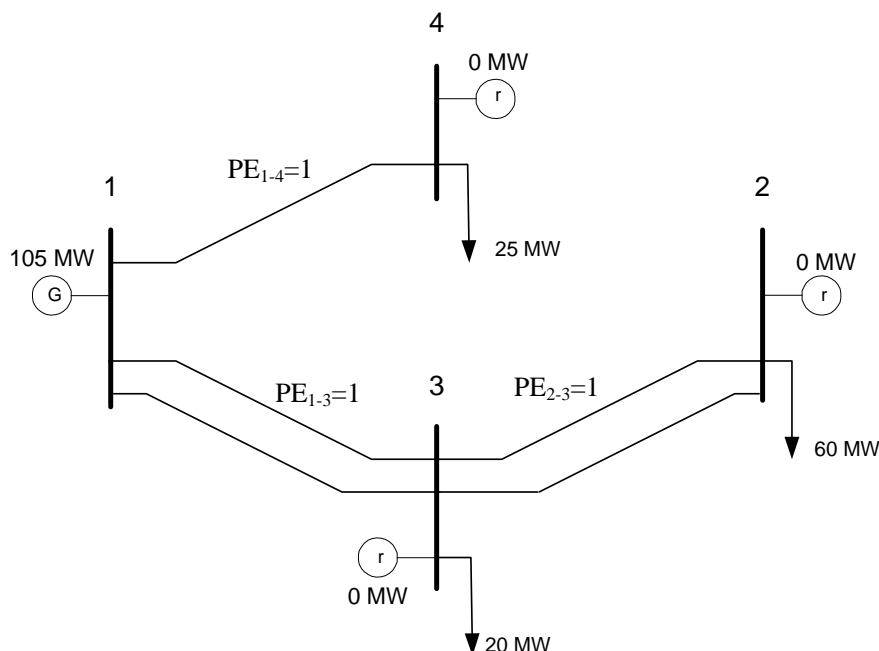


Figura 4-10- Solução do 3ª Iteração do 1º Plano.

Na topologia corrente, com a construção das linhas candidatas entre as barras 1-3, 2-3 e 1-4, o sistema elétrico atende a demanda prevista para o horizonte de planejamento sem que exista a necessidade de cortes de carga no sistema elétrico. Com isso, tem-se uma topologia final factível para o sistema teste, com um custo de investimento no sistema de transmissão de US\$3800,00.

2ª PLANO DE EXPANSÃO - TERMO A =2.5 - BLOCO 1

1º Iteração

Etapa Contínua: Tem a finalidade de determinar os valores dos índices de sensibilidade adotados pela metodologia proposta, Tabela 4-11, e assim, identificar as principais rotas de expansão. Nesta primeira iteração do algoritmo proposto, a linha selecionada a expansão corresponde a linha, localizada entre as barras 1-3. Assim, com a expansão definida na etapa contínua, parte-se para a resolução da etapa discreta.

Tabela 4-11- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
1-3	0.9465	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
2-3	0.4467	4.4357	4.4357	9.3585	9.3585	9.1479	9.1479	7.6473
1-4	0.9983	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5159	0.2322	0.1246
1-2	0.0582	0.1006	0.0302	3.2647	0.9794	4.8421	1.4526	1.7782
2-4	0.0003	0.0000	0.0000	0.0002	0.0001	6.6459	2.9907	1.6061

Etapa Discreta: Nesta etapa, o objetivo é verificar como o sistema está operando com a construção da linha definida na etapa contínua. Assim, para a primeira etapa discreta, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros de expansão, vide Tabela 4-12.

Tabela 4-12- Resultado da etapa discreta - PE

LINHA	PE_l
1-3	1
2-3	0
1-4	0
1-2	0
2-4	0

O sistema elétrico corrente, contendo a expansão realizada na primeira iteração do processo heurístico, é apresentado Figura 4-11.

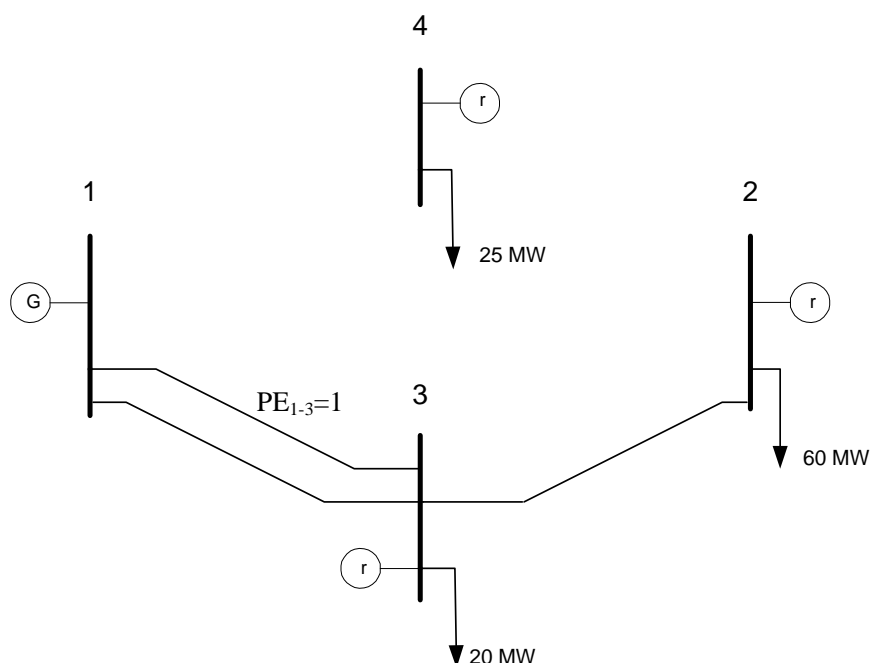


Figura 4-11- Solução do 1ª Iteração do 2º Plano.

A topologia corrente, com a construção da linha candidata entre as barras 1-3, não atende de forma satisfatória a demanda solicitada pelo sistema, há corte de carga de 45MW. Logo, faz-se necessário novas expansões e, conseqüentemente, uma nova iteração do processo heurístico construtivo.

2º Iteração

Etapa Contínua: O procedimento é análogo ao descrito anteriormente, sendo os valores dos índices de sensibilidade apresentados na Tabela 4-13. Nesta segunda iteração do algoritmo proposto, a linha selecionada a expansão corresponde a linha localizada entre as barras 1-2. Assim, com a nova expansão definida na etapa contínua, parte-se para a resolução da etapa discreta.

Tabela 4-13- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
2-3	0.5500	3.9750	4.7369	0.5183	1.1518	2.6964	8.9881	3.6777
1-4	0.0729	1.1913	0.6388	20.0000	20.0000	0.7080	1.0620	7.2666
1-2	0.9989	20.0000	7.1501	3.2842	2.1894	20.0000	20.0000	12.1039
2-4	0.0009	0.0002	0.0001	0.1954	0.1954	0.1148	0.1723	0.1130

Etapa Discreta: Na segunda iteração discreta são adotados os valores para os parâmetros de expansão, vide Tabela 4-14.

Tabela 4-14- Resultado da etapa discreta - PE

LINHA	PE_i
1-3	1
2-3	0
1-4	0
1-2	1
2-4	0

O sistema elétrico corrente, contendo a expansão realizada na segunda iteração do processo heurístico, é apresentado Figura 4-12.

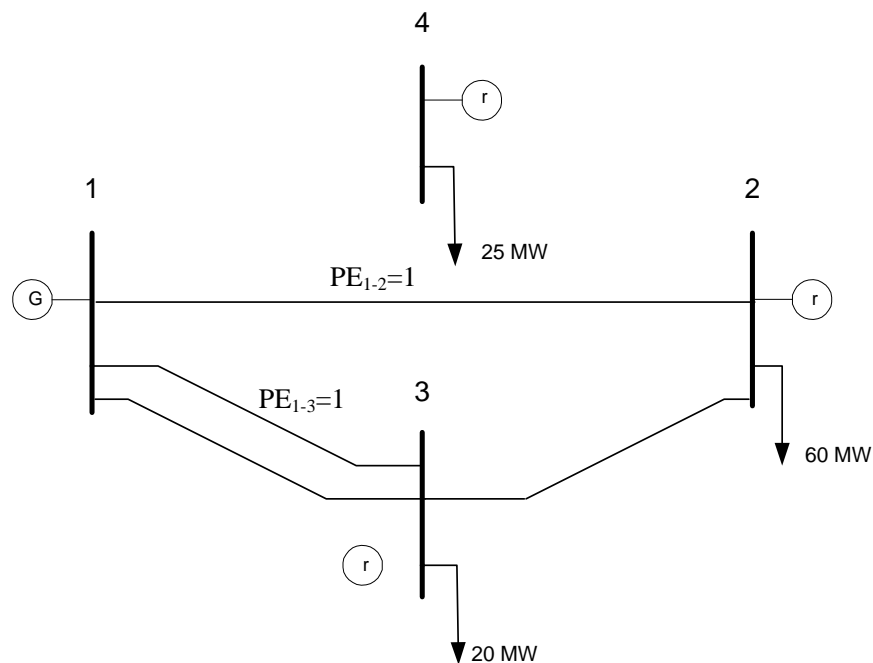


Figura 4-12- Solução do 2ª Iteração do 2º Plano.

A topologia base, com a construção das linhas candidatas entre as barras 1-3 e 1-2, apresenta cortes de carga de 31MW no sistema elétrico, sendo necessária a expansão de no mínimo mais uma linha de transmissão, nova etapa contínua.

3º Iteração

Etapa Contínua: Na Tabela 4-15 tem-se os valores referentes aos índices de sensibilidade. Nesta terceira iteração, a linha selecionada a expansão corresponde a linha localizada entre as barras 2-3. Assim, com a nova expansão definida na etapa contínua, parte-se para uma nova etapa discreta.

Tabela 4-15- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
2-3	0.9993	12.3211	12.8703	1.5347	3.4104	4.0101	12.8703	7.8361
1-4	0.0007	0.0000	0.0000	0.0015	0.0015	0.0004	0.0005	0.0006
2-4	0.0339	0.2781	0.1307	20.0000	20.0000	0.0000	0.0000	6.7348

Etapa Discreta: Nesta etapa, o objetivo é verificar como o sistema está operando com a construção da linha definida na última etapa contínua. Sendo Assim, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros de expansão, vide Tabela 4-16.

Tabela 4-16- Resultado da etapa discreta - PE

LINHA	PE_l
1-3	1
2-3	1
1-4	0
1-2	1
2-4	0

O sistema elétrico corrente, contendo a expansão realizada na terceira iteração do processo heurístico, é apresentado Figura 4-13.

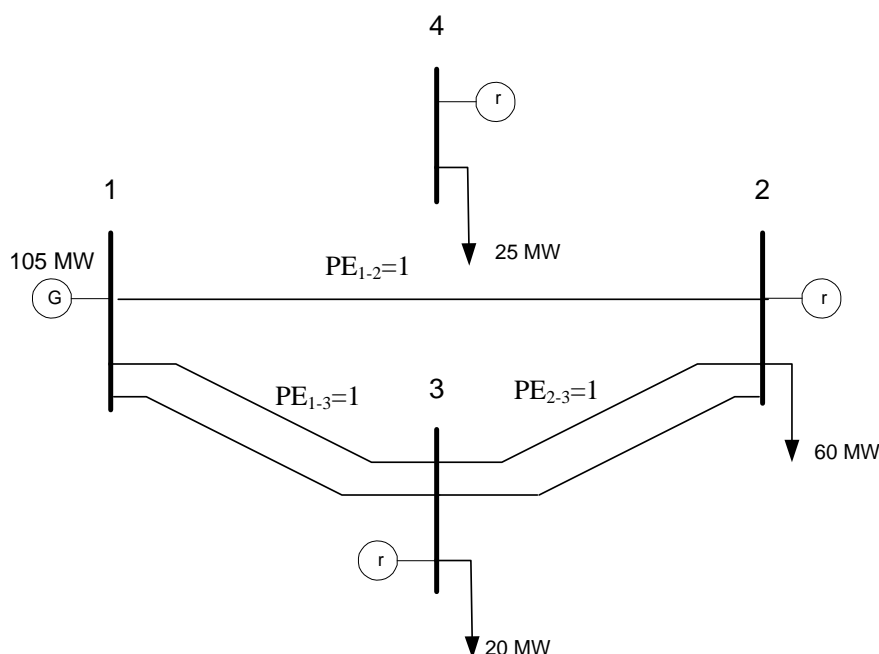


Figura 4-13- Solução do 3ª Iteração do 2º Plano.

A topologia base, com a construção das linhas candidatas entre as barras 1-3, 1-2 e 2-3, o sistema elétrico continua apresentando corte de carga de 25MW. Assim sendo, são necessários novas expansões e, conseqüentemente, uma nova rodada da heurística construtiva proposta.

4º Iteração

Etapa Contínua: Os valores dos índices de sensibilidade são apresentados Tabela 4-17. Nesta quarta iteração, a linha selecionada a expansão corresponde a linha localizada entre as barras 1-4. Assim, com a expansão definida na etapa contínua, parte-se para etapa discreta.

Tabela 4-17- Valores do Índices

LINHA	PE_l	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccm}	MÉDIA- IS^P
1-4	0.0679	1.0606	0.5068	20.0000	20.0000	6.3313	9.1764	9.5125
2-4	0.0090	0.0162	0.0077	1.9873	1.9873	0.4503	0.6526	0.8502

Etapa Discreta: Nesta etapa, o objetivo é verificar como o sistema está operando com a construção da linha definida na última etapa contínua. Sendo Assim, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros de expansão, vide Tabela 4-18

Tabela 4-18- Resultado da etapa discreta - PE

LINHA	PE_i
1-3	1
2-3	1
1-4	1
1-2	1
2-4	0

O sistema elétrico corrente, contendo a expansão realizada na quarta iteração do processo heurístico, é apresentado Figura 4-14.

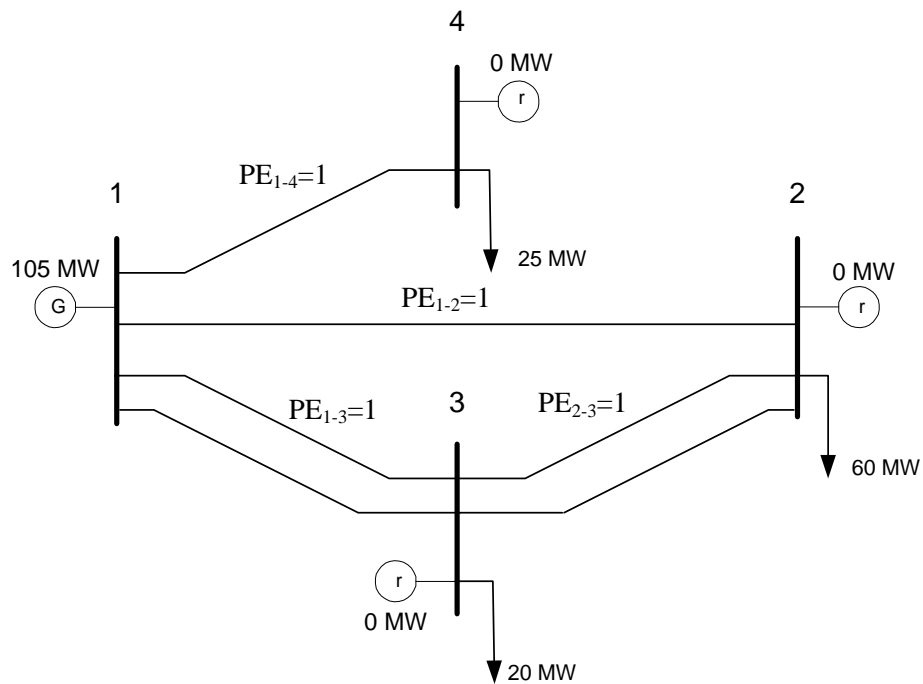


Figura 4-14- Solução do 4ª Iteração do 2º Plano.

A topologia corrente, com a construção das linhas candidatas entre as barras 1-3, 1-2, 2-3 e 1-4 atende a demanda prevista para o horizonte de planejamento sem que exista a necessidade de cortes de carga no sistema elétrico. Com isso, tem-se uma topologia final factível para o sistema teste, com um custo de investimento no sistema de transmissão de US\$6800,00.

CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS - SOLUÇÕES INICIAIS - BLOCO 2

Observa-se que ao simular o algoritmo heurístico proposto, para $A = 0.5$ e $A = 2.5$, foram obtidos duas soluções distintas, conjunto de rotas diferentes, Figura 4-15, ou seja, dois planos factíveis de expansão com custos e rotas diferentes. Contudo, estes dois planos distintos atendem o sistema elétrico de forma satisfatória, ou seja, sem necessidade de usar os geradores artificiais, então, sem que haja a necessidade de corte de carga. Conclui-se das análises realizadas que as diferentes inclinações adotadas para os parâmetros de expansão têm influência na solução final a ser obtida.

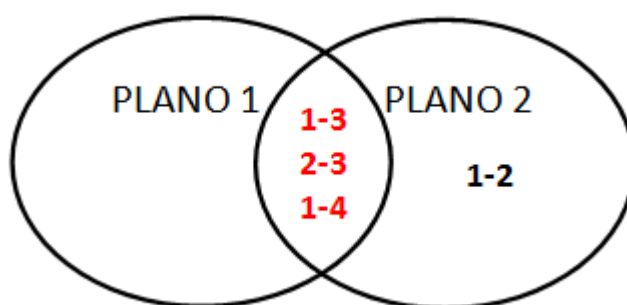


Figura 4-15- Planos Gerados.

Pela metodologia proposta, o conjunto de rotas relevantes à expansão e que será repassado ao algoritmo bioinspirado (multimodal) é formado pela união das rotas de expansão obtidas, vide Figura 4-15, sendo as mesmas apresentadas pela Tabela 4-19.

Tabela 4-19- Conjunto reduzido de rotas - Simulações do AHCP.

ROTAS	PE_i
1-3	1
2-3	1
1-4	1
1-2	1

OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA - PLANEJAMENTO FINAL – 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.

A técnica bioinspirada (multimodal) PSO obteve o planejamento final da expansão da transmissão, conforme Figura 4-10 e Tabela 4-10, a um custo de investimento de US\$3800,00 no sistema de transmissão de energia elétrica, o qual representa o planejamento ótimo final.

A Figura 4-16 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.

Pelo fato de se tratar de um sistema de pequeno porte, houve redução de apenas uma única rota candidata a expansão, porém percentualmente corresponde a uma redução de 20%. Para sistemas de maior porte, com um conjunto maior de rotas candidatas à expansão, esta redução via AHCP torna-se muito importante e oportuna para o processo de otimização multimodal.

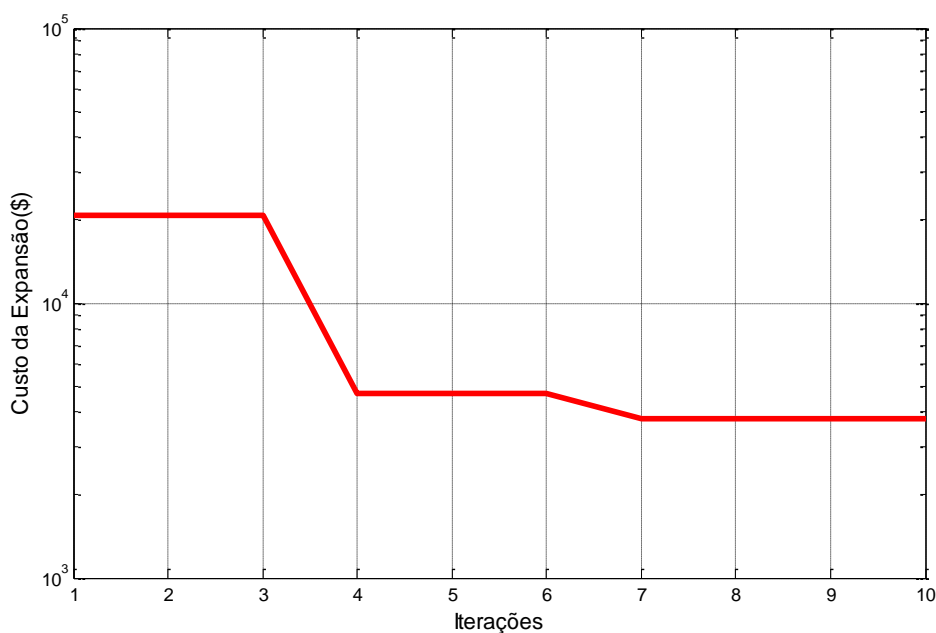


Figura 4-16- Evolução do PSO- Sistema Teste.

4.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados detalhes da formulação e da modelagem proposta utilizada na resolução do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, com destaque para identificação das rotas relevantes, sendo esta identificação importante para qualquer método que venha ser utilizado na resolução do problema.

As decisões de expansão (0-1) modeladas pela variação da inclinação da função tangente hiperbólica foram incorporadas ao problema de otimização através das equações originais do modelo CC de fluxo de carga.

A heurística adotada e os sete índices de sensibilidade foram apresentados com o objetivo de reduzir o número de rotas candidatas à expansão e desta forma aumentar a eficiência do processo de busca na obtenção do planejamento final da expansão da rede de transmissão de energia elétrica.

Destaca-se que para o levantamento do conjunto relevante de rotas de expansão todos os índices de sensibilidade propostos foram avaliados (IS_l^{ga1} , IS_l^{ga2} , IS_l^{me1} , IS_l^{me2} , IS_l^{mcc1} , IS_l^{mcc2} e IS_l^P) individualmente. Entretanto, será apresentado de forma mais detalhada, no próximo capítulo, a sensibilidade baseada no índice portfólio IS_l^P , pois trata-se de uma sensibilidade inexistente na literatura.

5 ESTUDO DE CASOS

5.1 INTRODUÇÃO

O objetivo na resolução do PET é encontrar um conjunto de circuitos candidatos à expansão, a um custo mínimo, e de forma que as restrições de adequação da rede sejam satisfeitas, para que o sistema opere adequadamente dentro de um horizonte de planejamento específico.

A natureza discreta das decisões de investimento, as incertezas nas taxas de crescimento da demanda e os futuros locais de geração além da não conectividade da rede inicial, fazem do PET um problema combinatório difícil, de grande porte e com modelagem matemática não linear, além de apresentar uma estrutura multimodal com um número elevado de ótimos locais, o que leva a maioria dos métodos aproximados a fornecerem uma solução ótima local, às vezes de pobre qualidade. Essa natureza combinatória da resolução do PET, constitui uma das principais dificuldades do processo de planejamento, pois leva a um grande número de possibilidades de investimento no sistema de transmissão de energia elétrica.

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: sistema acadêmico proposto por Garver, IEEE-24 barras, Sul brasileiro de 46 barras e Colombiano de 93 barras. 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.

5.2 SISTEMA GARVER

Este sistema, proposto inicialmente por Garver [3], 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 760 MW.

Para ilustrar os resultados obtidos pela metodologia proposta serão feitas duas análises em relação ao sistema 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 1 MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 3 expansões por caminho candidato; (iii) enxame composto por 100 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações, como critério de convergência. Assim, serão resolvidos 10.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima.

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 de energia elétrica, pois é um sistema não conexo, Figura 5-1, e apresenta, para este caso, um número total de 4^{15} combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente à explosão combinatória das alternativas de investimento. A seguir estão dispostas as simulações realizadas para o sistema Garver com redespacho.

Ao aplicar a heurística construtiva proposta, analisando cada índice de sensibilidade de forma separada, encontrou-se os seguintes resultados, sendo o custo dado em milhões de dólares conforme Tabela 5-1.

Tabela 5-1- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade – Garver com Redespacho

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	110	15	5	67%	718	SIM
IS^{ga2}	130	15	4	73%	702	NÃO
IS^{me1}	130	15	5	67%	696	NÃO
IS^{me2}	130	15	4	73%	500	NÃO
IS^{mcc1}	130	15	5	67%	748	NÃO
IS^{mcc2}	110	15	5	67%	744	SIM
IS^P	110	15	5	67%	738	SIM

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, vide apêndice A. Nesta simulação não foi utilizado o AHCP a fim de selecionar as rotas relevantes à expansão. A Tabela 5-2 apresenta o plano final de expansão obtido pelo processo de otimização bioinspirado para o sistema Garver com redespacho de geração sem utilizar o AHCP.

Tabela 5-2- PET - Sistema Garver com Redespacho - Todas as Rotas Candidatas.

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
4-6	3
3-5	1

A Figura 5-1 ilustra a configuração final obtida para o sistema Garver com redespacho de geração, onde as linhas tracejadas representam as expansões realizadas, sinalizando a construção de quatro novos circuitos, três circuitos entre as barras 4-6 e um circuito entre as barras 3-5.

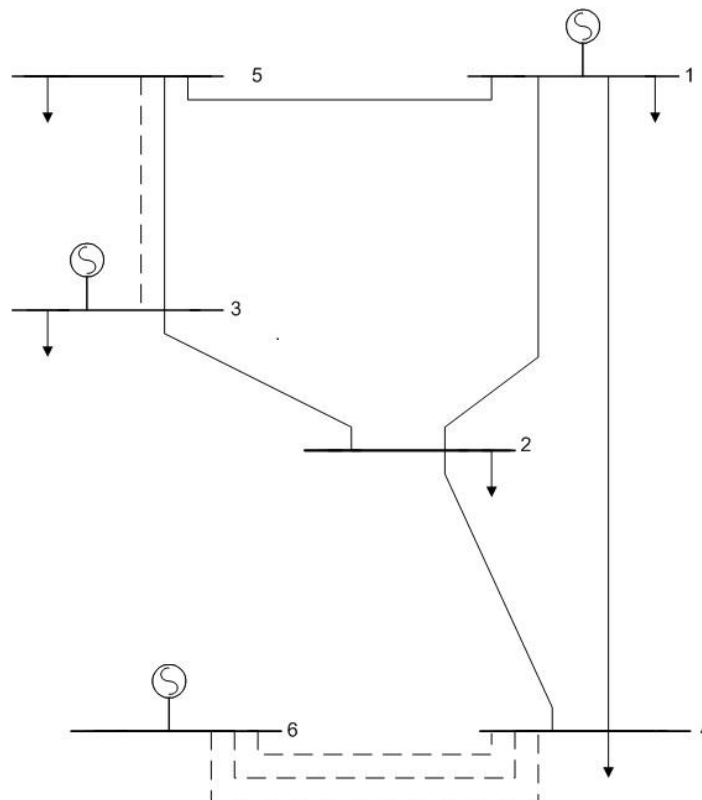


Figura 5-1- Configuração Final para o Sistema Garver com Redespacho.

A solução apresentada, Figura 5-1, tem um custo total de investimento de US\$110.000.000,00. O tempo total de simulação foi de 160 segundos, sendo a solução ótima obtida na décima terceira iteração do processo de busca bioinspirado, vide Figura 5-2.

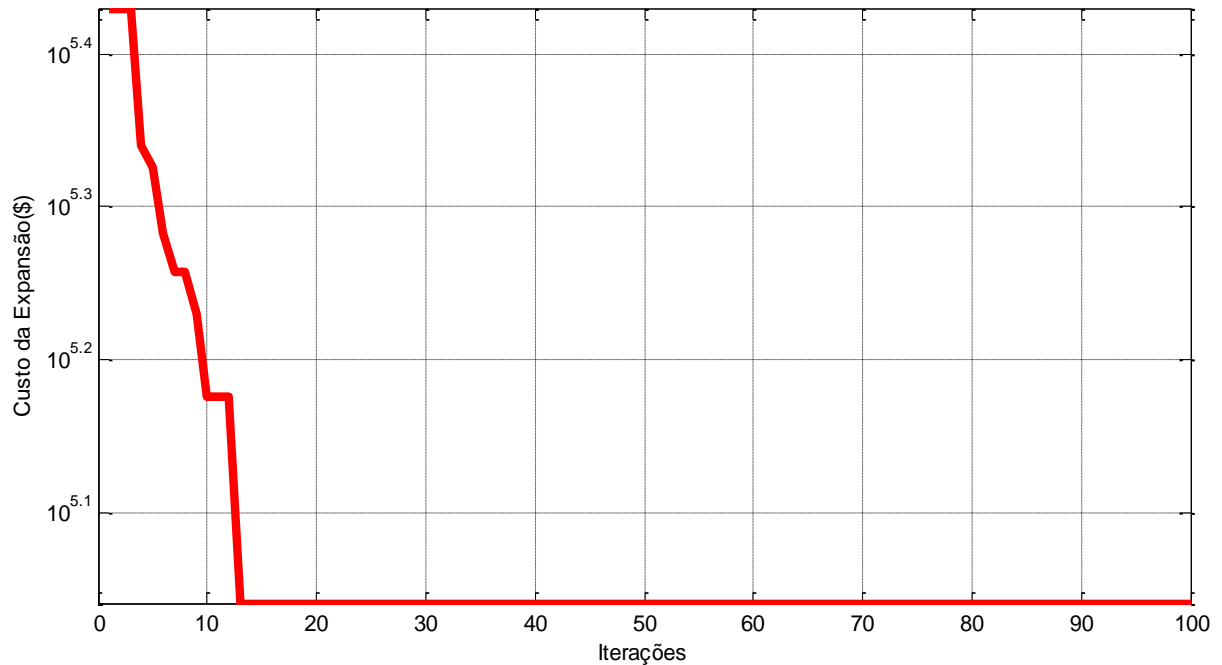


Figura 5-2- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas- Sistema Garver com Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Neste caso fez-se o uso do AHCP para reduzir o espaço de busca do processo bioinspirado e assim, proporcionar maior eficiência ao processo de busca. Para tanto, simulou-se o AHCP e obteve-se um conjunto reduzido de rotas relevantes à expansão. Desta forma, é apresentado na Tabela 5-3 os planos obtidos e o custo em milhões de dólares para cada valor de A considerado pelo processo heurístico proposto.

Tabela 5-3- Rotas Seleccionadas - Garver com Redespacho – Índice IS^P

PLANOS VARIANDO-SE OS VALORES DE A					
A	PLANO FINAL	CUSTO	A	PLANO FINAL	CUSTO
A=0.1	2-6(2), 3-5 e 4-6(2)	140	A=3.1	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.2	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.2	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.3	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.3	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.4	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.4	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.5	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.5	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.6	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.6	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.7	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.7	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.8	3-5 e 4-6(3)	110	A=3.8	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=0.9	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=3.9	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.0	3-5 e 4-6(3)	110	A=4.0	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.1	3-5 e 4-6(3)	110	A=4.1	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.2	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=4.2	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.3	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=4.3	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.4	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=4.4	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.5	2-6, 3-5, 4-6(2) e 5-6	171	A=4.5	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.6	2-6, 3-5, 4-6(2) e 5-6	171	A=4.6	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.7	2-6, 3-5, 4-6(2) e 5-6	171	A=4.7	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.8	2-6, 3-5, 4-6(2) e 5-6	171	A=4.8	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=1.9	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=4.9	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.0	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.0	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.1	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.1	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.2	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.2	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.3	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.3	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.4	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.4	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.5	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.5	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.6	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.6	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.7	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.7	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.8	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.8	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=2.9	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=5.9	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130
A=3.0	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130	A=6.0	2-3, 2-6, 3-5 e 4-6(2)	130

A medida que o valor de A varia é possível executar o algoritmo heurístico construtivo para diferentes sensibilidades do PE e assim, obter um conjunto de soluções, o qual tem o objetivo de direcionar a busca do processo de otimização multimodal para regiões que possibilitem a obtenção de soluções de boa qualidade. Nota-se que com a variação da inclinação do PE através de A é possível a obtenção de planos diferentes de expansão.

Desta forma, foram selecionadas cinco rotas candidatas das quinze possíveis, redução de aproximadamente 67% das alternativas de expansão, vide Tabela 5-4. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-4, estão contidas no conjunto reduzido proposto.

Tabela 5-4- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

<p>ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS</p>
<p>2-3, 2-6, 3-5, 4-6 e 5-6</p>

Inicialmente, com a finalidade de reduzir o número de rotas candidatas a expansão utilizou-se o AHCP.

O plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema Garver com redespacho de geração, considerando as rotas pré-selecionadas pelo AHCP, é o mesmo da análise anterior, vide Tabela 5-2.

A Figura 5-3 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 do conjunto reduzido de rotas obtidas pela heurística proposta. O tempo total de simulação foi de 184 segundos, tempo superior a primeira simulação devido a execução do AHCP.

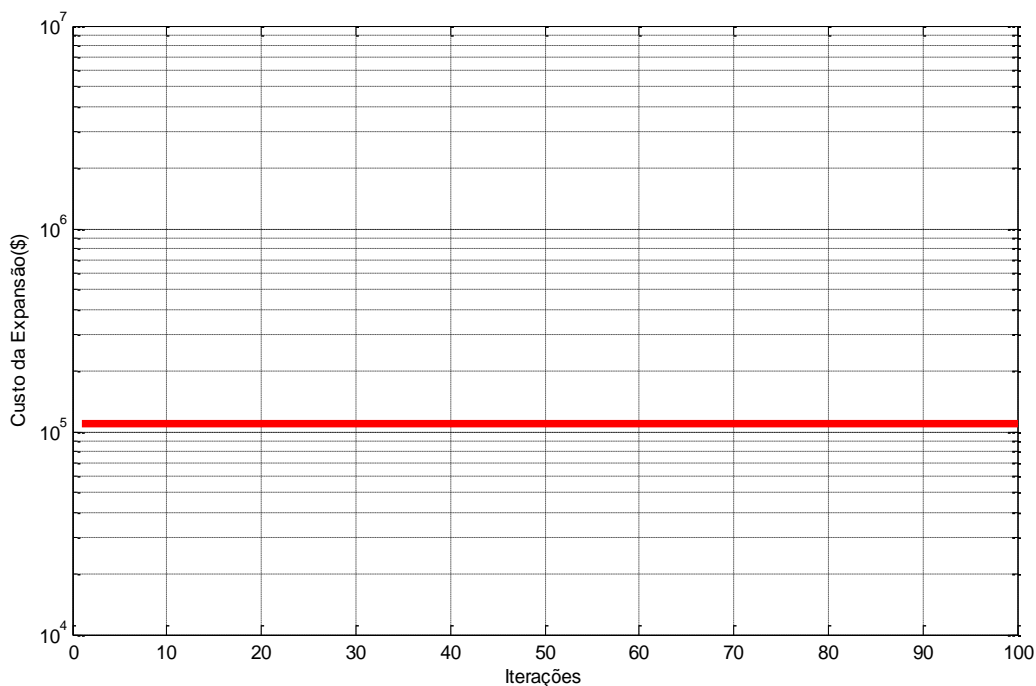


Figura 5-3- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas- Sistema Garver com Redespacho

Analisando as simulações aqui realizadas, 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 US\$110.000.000,00 [15], [17], [19], [56] e [57].

- **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 100 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações, como critério de convergência. Assim, serão resolvidos 10.000 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} . A seguir estão dispostas as simulações realizadas para o sistema Garver sem redespacho.

Ao empregar a heurística construtiva proposta tem-se os seguintes resultados, sendo o custo em milhões de dólares conforme Tabela 5-5.

Tabela 5-5- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade – Garver sem Redespacho

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL 'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	200	15	10	33%	1046	SIM
IS^{ga2}	200	15	11	27%	1110	SIM
IS^{me1}	200	15	10	33%	972	SIM
IS^{me2}	200	15	8	47%	980	SIM
IS^{mcc1}	200	15	9	40%	1128	SIM
IS^{mcc2}	200	15	8	47%	1034	SIM
IS^P	200	15	11	27%	1118	SIM

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

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão no processo de otimização bioinspirado, isto é, sem fazer uso do AHCP. A Tabela 5-6 apresenta o plano final de expansão para o sistema Garver sem redespacho de geração.

Tabela 5-6- PET - Sistema Garver sem Redespacho - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	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 novos circuitos em três rotas selecionadas. A Figura 5-4 ilustra o gráfico de convergência do processo de otimização bioinspirado, sendo gastos 192 segundos de simulação computacional e a solução ótima encontrada na décima oitava iteração.

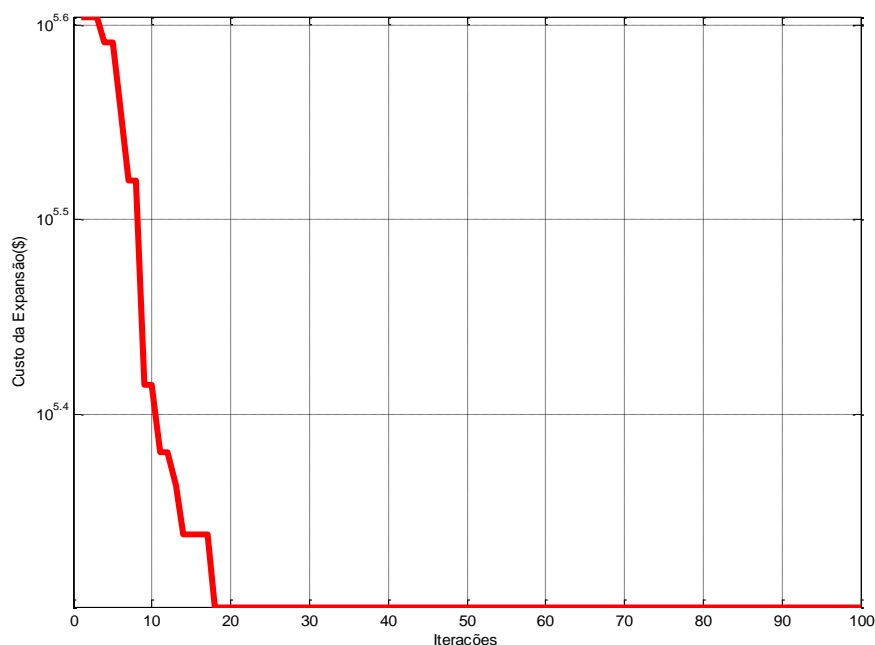


Figura 5-4- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas- Sistema Garver sem Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Nesta simulação, fez-se uso do AHCP e um conjunto reduzido de rotas de expansão foi estruturado. A Tabela 5-7 apresenta os planos obtidos e o custo em milhões de dólares para cada valor de A , inerente à função parâmetro de expansão.

Tabela 5-7- Rotas Seleccionadas - Garver sem Redespacho– Índice IS^P

PLANOS VARIANDO-SE OS VALORES DE A - IS^P					
A	PLANO FINAL	CUSTO	A	PLANO FINAL	CUSTO
A=0.1	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=3.1	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231
A=0.2	2-6(3), 3-4, 3-5 e 4-6(3)	259	A=3.2	2-5, 2-6(3), 4-6(2) e 5-6	242
A=0.3	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=3.3	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=0.4	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=3.4	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=0.5	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=3.5	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=0.6	2-5, 2-6(3), 4-6(2) e 5-6	242	A=3.6	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231
A=0.7	2-6(3), 3-5 e 4-6(4)	230	A=3.7	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=0.8	2-6(3), 3-5 e 4-6(4)	230	A=3.8	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=0.9	2-6(3), 3-5 e 4-6(4)	230	A=3.9	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=1.0	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=4.0	2-6(3), 4-5, 4-6(2) e 5-6	274

A=1.1	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=4.1	2-6(3), 4-6(2) e 5-6(2)	272
A=1.2	2-4, 2-6(3), 3-5 e 4-6(3)	240	A=4.2	2-6(3), 4-6(2) e 5-6(2)	272
A=1.3	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218	A=4.3	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=1.4	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=4.4	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=1.5	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=4.5	2-6(3), 3-5 e 4-6(4)	230
A=1.6	2-6(2), 4-6(2) e 5-6(3)	303	A=4.6	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=1.7	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=4.7	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200
A=1.8	2-6(2), 4-6(2) e 5-6(3)	303	A=4.8	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231
A=1.9	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=4.9	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.0	2-6(2), 4-6(2) e 5-6(3)	303	A=5.0	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.1	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=5.1	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.2	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=5.2	2-6(3), 3-5 e 4-6(4)	230
A=2.3	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=5.3	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.4	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=5.4	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.5	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=5.5	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.6	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=5.6	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.7	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=5.7	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.8	2-6(4), 3-5 e 4-6(2)	200	A=5.8	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=2.9	2-6(3), 3-5, 4-6(2) e 5-6	231	A=5.9	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218
A=3.0	2-6(3), 4-6(2) e 5-6(2)	272	A=6.0	2-6(3), 3-5, 3-6 e 4-6(2)	218

Diante dos resultados, foram selecionadas nove rotas candidatas das quinze possíveis, Tabela 5-8. Uma redução de aproximadamente 40% das alternativas de expansão. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-8, estão contidas no conjunto reduzido proposto.

Tabela 5-8- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

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

O plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema Garver sem redespacho de geração, considerando as rotas pré-selecionadas pelo AHCP, é o mesmo

apresentado através da Tabela 5-6. Esta solução representa um custo total de investimento no sistema de transmissão de energia elétrica de US\$200.000.000,00. A Figura 5-5 ilustra o gráfico de convergência do processo de otimização bioinspirado, sendo gastos 244 segundos de simulação computacional, tempo superior a primeira simulação devido a execução do AHCP. 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 AHCP, o PSO obteve a solução ótima mais rápida, oitava iteração.

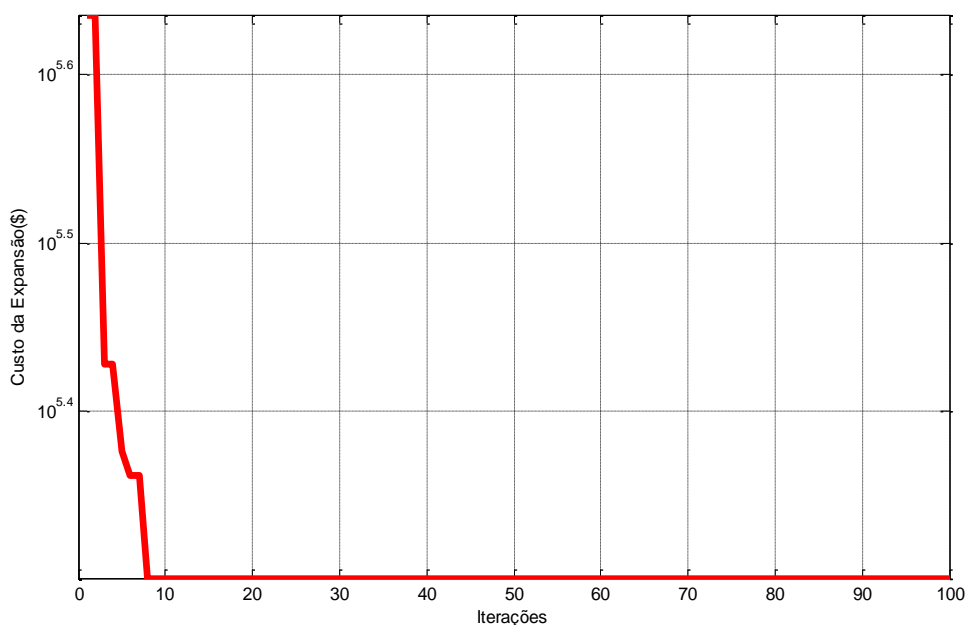


Figura 5-5- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema Garver sem Redespacho.

A solução encontrada pela metodologia proposta, Tabela 5-6, corresponde à solução ótima global conhecida para o sistema Garver sem redespacho de geração, sendo confirmada pelas referências [15], [18], [19], [57] e [58].

5.3 SISTEMA IEEE 24 BARRAS

O sistema IEEE 24 barras [59], apresentado na Figura 5-6, possui 38 circuitos existentes na topologia base, 41 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 8550 MW. Este sistema vem sendo muito utilizado para validar os resultados de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão com cenários G0, G1, G2, G3 e G4 de geração. O cenário G0 apresenta uma geração de 10215 MW com reprogramação de geração,

G1, G2, G3 e G4 apresentam uma geração de 8550 MW sem reprogramação de geração, para os cinco cenários as unidades de geração são localizadas em diferentes barras. Os dados podem ser verificados no apêndice A.

O sistema mostrado na Figura 5-6 é amplamente difundido na comunidade científica, sendo ainda utilizado para pesquisa em trabalhos recentes, a exemplo de [8].

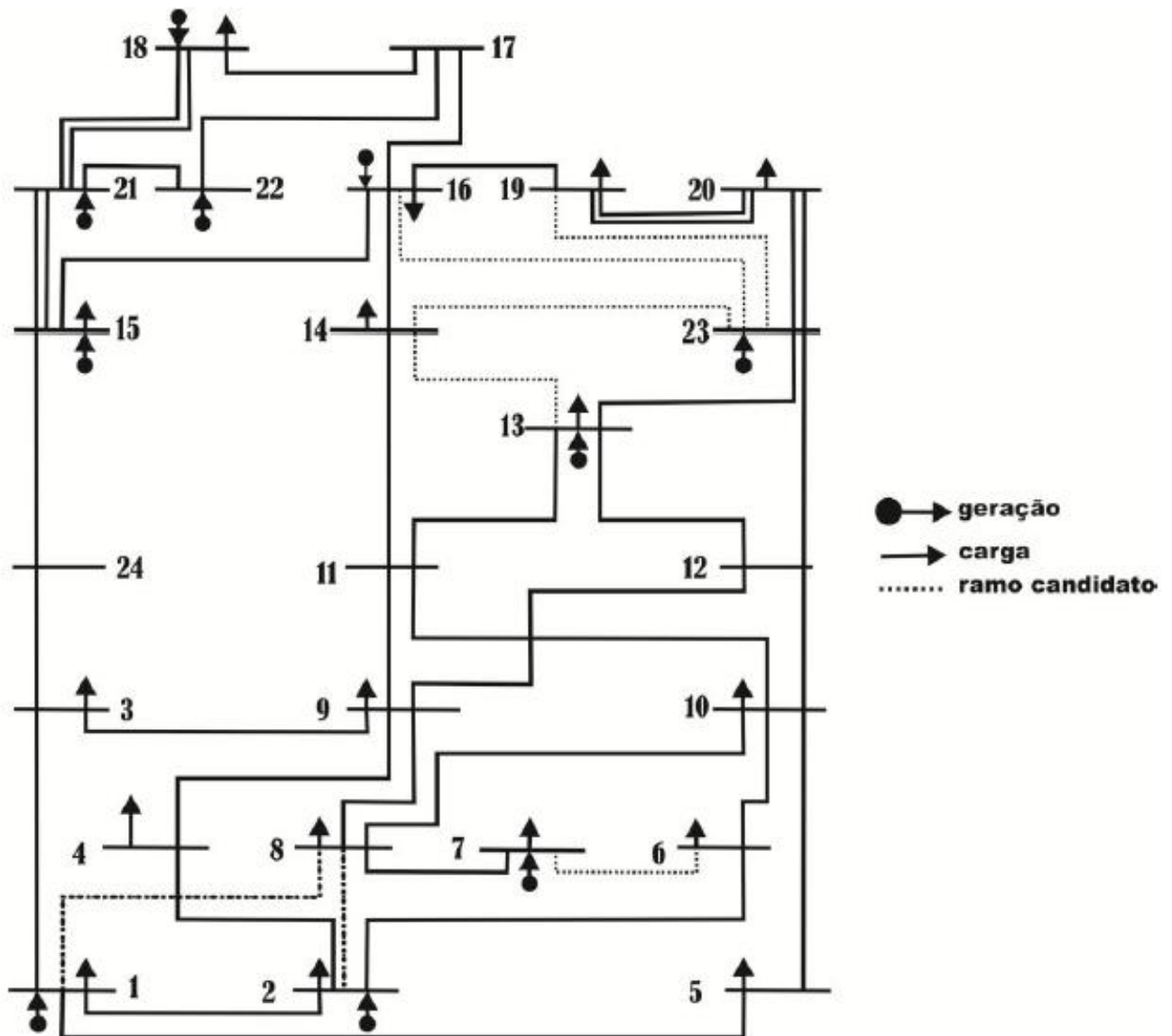


Figura 5-6 - Sistema IEEE 24 barras.

Ao aplicar a heurística construtiva proposta, analisando cada índice de forma separada, para o cenário G0 tem-se os seguintes resultados, sendo o custo em milhões de dólares conforme Tabela 5-9.

Tabela 5-9- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - IEEE 24 -G0

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	152	41	7	83%	702	SIM
IS^{ga2}	152	41	5	88%	702	SIM
IS^{me1}	208	41	8	80%	856	NÃO
IS^{me2}	152	41	7	83%	748	SIM
IS^{mcc1}	152	41	7	83%	848	SIM
IS^{mcc2}	152	41	5	88%	702	SIM
IS^P	152	41	5	88%	712	SIM

A Tabela 5-10 apresenta os resultados obtidos pelo AHCP para o cenário G1 com o custo em milhões de dólares.

Tabela 5-10- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - IEEE 24 -G1

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	390	41	23	44%	1820	NÃO
IS^{ga2}	446	41	14	66%	3144	NÃO
IS^{me1}	420	41	38	7%	4084	NÃO
IS^{me2}	390	41	19	54%	2358	NÃO
IS^{mcc1}	438	41	13	68%	1720	NÃO
IS^{mcc2}	406	41	12	71%	1630	NÃO
IS^P	406	41	16	61%	3798	NÃO

O resultados adquiridos pela heurística proposta para o cenário G2 é apresentado na Tabela 5-11, sendo o custo em milhões de dólares.

Tabela 5-11- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - IEEE 24 -G2

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	440	41	10	76%	1502	NÃO
IS^{ga2}	440	41	10	76%	1502	NÃO
IS^{me1}	440	41	10	76%	1502	NÃO
IS^{me2}	440	41	10	76%	1502	NÃO
IS^{mcc1}	440	41	10	76%	1502	NÃO
IS^{mcc2}	440	41	10	76%	1502	NÃO
IS^P	440	41	10	76%	1502	NÃO

A Tabela 5-12 apresenta os resultado encontrados pelo AHCP para o cenário de geração G3.

Tabela 5-12- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - IEEE 24 -G3

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	218	41	9	78%	1058	SIM
IS^{ga2}	218	41	9	78%	1086	SIM
IS^{me1}	218	41	11	73%	1086	SIM
IS^{me2}	218	41	9	78%	1086	SIM
IS^{mcc1}	218	41	7	83%	1012	SIM
IS^{mcc2}	218	41	11	73%	1086	SIM
IS^P	218	41	11	73%	1086	SIM

Utilizando o algoritmo heurístico construtivo proposto obtém-se os seguintes resultados para cada índice, para o cenário G4, sendo o custo em milhões de dólares conforme Tabela 5-13.

Tabela 5-13- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - IEEE 24 -G4

ÍNDICES	MELHOR CUSTO AHCP	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	376	41	24	41%	1290	NÃO
IS^{ga2}	434	41	14	66%	3378	NÃO
IS^{me1}	376	41	21	49%	3341	NÃO
IS^{me2}	354	41	15	63%	1640	NÃO
IS^{mcc1}	364	41	11	73%	1248	NÃO
IS^{mcc2}	376	41	10	76%	1132	NÃO
IS^P	364	41	11	73%	3068	NÃO

Caso 1: Sistema IEEE 24 barras sem Redespacho de Geração

Para este caso tem-se um número total de 4^{41} combinações possíveis de investimento, demonstrando a dificuldade da obtenção do ponto de mínimo global. Foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância ($\frac{1}{4}$) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de 3 expansões por caminho candidato; (iii) exame composto por 100 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações, como critério de convergência. Em seguida são apresentadas as simulações realizadas para cada cenário do sistema IEEE 24 barras sem redespacho.

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

Nesta primeira simulação foram consideradas todas as 41 rotas candidatas à expansão, ou seja, o plano final foi obtido somente pelo algoritmo bioinspirado, PSO.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G0 - 1º Simulação

Nesta primeira simulação, cenário de geração G0, apresenta-se o plano final de expansão obtido pelo algoritmo bioinspirado através da Tabela 5-14. Destaca-se que foram resolvidos 10.000 problemas de otimização na busca do plano de expansão mais econômico.

Tabela 5-14- PET - Sistema IEEE 24 barras - G0 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
06-10	1
07-08	2
10-12	1
14-16	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$152.000.000,00. A Figura 5-7 apresenta a evolução do processo de otimização bioinspirado com a construção final de cinco novos circuitos de transmissão que atendem à demanda de forma adequada, sendo necessários 280 segundos de simulação computacional. Pode-se verificar, na Figura 5-7, que a solução final foi obtida na trigésima oitava iteração.

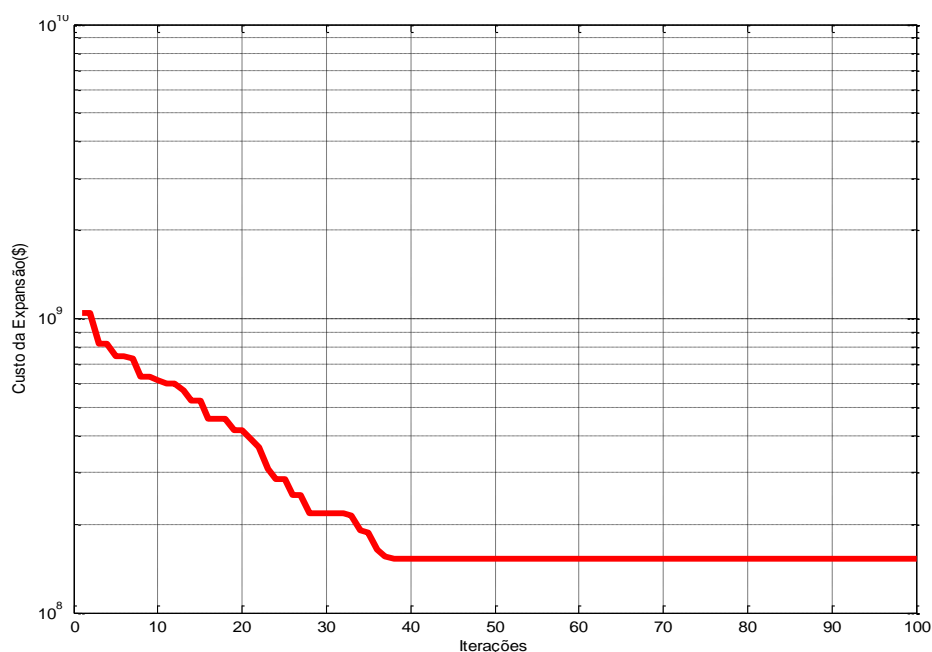


Figura 5-7- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema IEEE 24 barras - G0.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G1 - 1º Simulação

A Tabela 5-15 apresenta o plano final de expansão obtido pelo algoritmo bioinspirado para o cenário de geração G1 do sistema IEEE 24 barras.

Tabela 5-15- PET - Sistema IEEE 24 barras - G1 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
01-05	1
03-24	1
06-10	1
07-08	2
09-11	1
11-14	1
14-16	1
15-16	1
16-17	2
16-19	1
17-18	1

A topologia final apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$444.457.824,00. Com um tempo de simulação total de 622 segundos, de acordo com a Figura 5-8, observa-se que esta solução foi encontrada com quarenta e sete iterações do processo de busca bioinspirado.

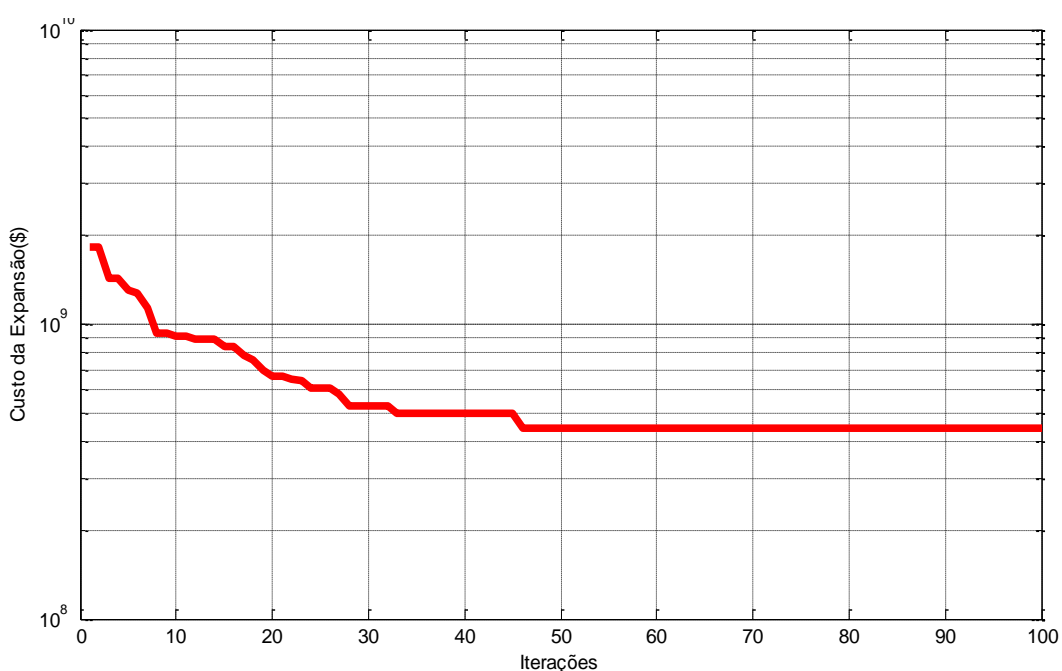


Figura 5-8- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema IEEE 24 barras - G1.

Diante do resultado pode-se verificar que para este caso não foi encontrada a solução ótima [60], que é de US\$370.000.000,00.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G2 - 1º Simulação

Para o cenário de geração G2, o plano final de expansão obtido pelo algoritmo bioinspirado é apresentado na Tabela 5-16.

Tabela 5-16- PET - Sistema IEEE 24 barras - G2 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
01-05	1
03-24	1
06-10	1
07-08	1
10-12	1
14-16	1
15-24	1
16-17	2
17-16	2

A topologia final apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$392.000.000,00. Com um tempo de simulação total de 631 segundos, de acordo com a Figura 5-9, observa-se que este custo foi encontrado com quarenta e seis iterações do processo de busca bioinspirado.

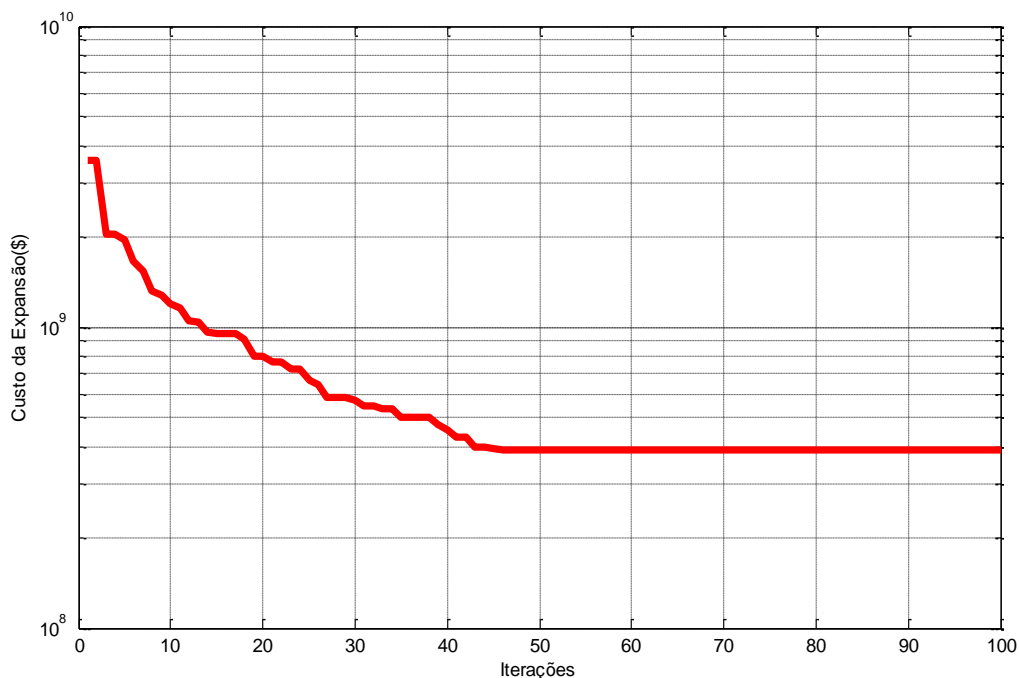


Figura 5-9 - Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema IEEE 24 barras - G2.

De posse do resultado confirma-se que para este caso foi encontrada a solução ótima [8], que é de US\$392.000.000,00.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G3 - 1º Simulação

Análogo ao procedimento anterior, porém utilizando um novo cenário de geração G3, o processo de otimização multimodal foi aplicado, sendo obtido o plano final de expansão apresentado na Tabela 5-17.

Tabela 5-17- PET - Sistema IEEE 24 barras - G3 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
02-06	1
03-24	1
07-08	2
06-07	1
13-14	1
14-23	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$333.000.000,00. A Figura 5-10 apresenta a evolução do processo de otimização bioinspirado com a construção final de sete novos circuitos de transmissão, sendo necessários 684 segundos de simulação computacional. Pode-se verificar analisando a Figura 5-10 que a solução final foi encontrada na trigésima segunda iteração.

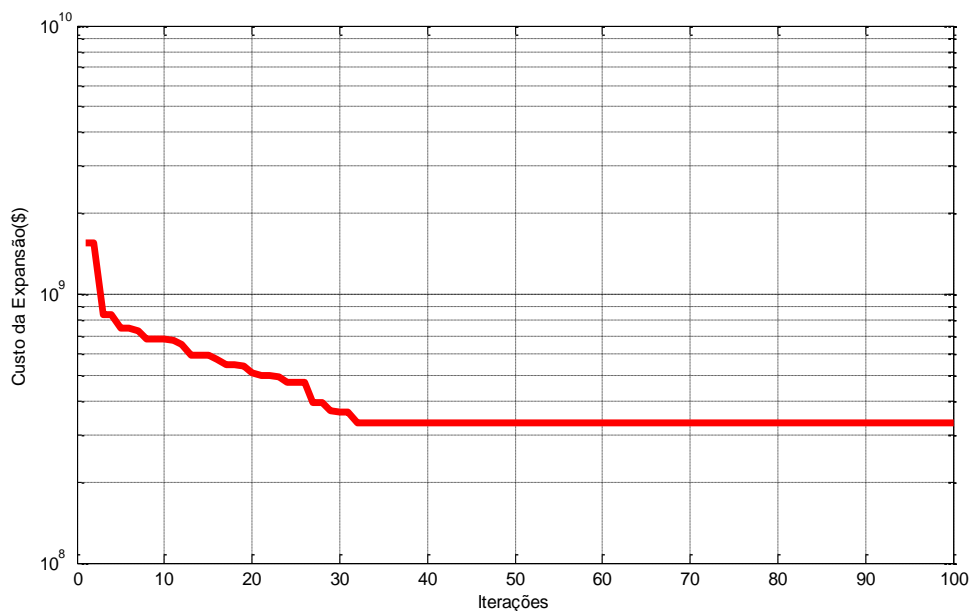


Figura 5-10- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema IEEE 24 barras - G3.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G4 - 1º Simulação

No cenário de geração G4 tem-se o plano final de expansão obtido pelo na Tabela 5-18.

Tabela 5-18- PET - Sistema IEEE 24 barras - G4 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
02-06	1
03-24	1
06-07	2
07-08	1
09-11	1
10-12	2
14-16	1
16-17	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$456.000.000,00. A Figura 5-11 apresenta a evolução do processo de otimização bioinspirado, sendo necessários 234 segundos de simulação computacional. Pode-se verificar, através da Figura 5-11, que a solução final foi encontrada na quinquagésima sexta iteração.

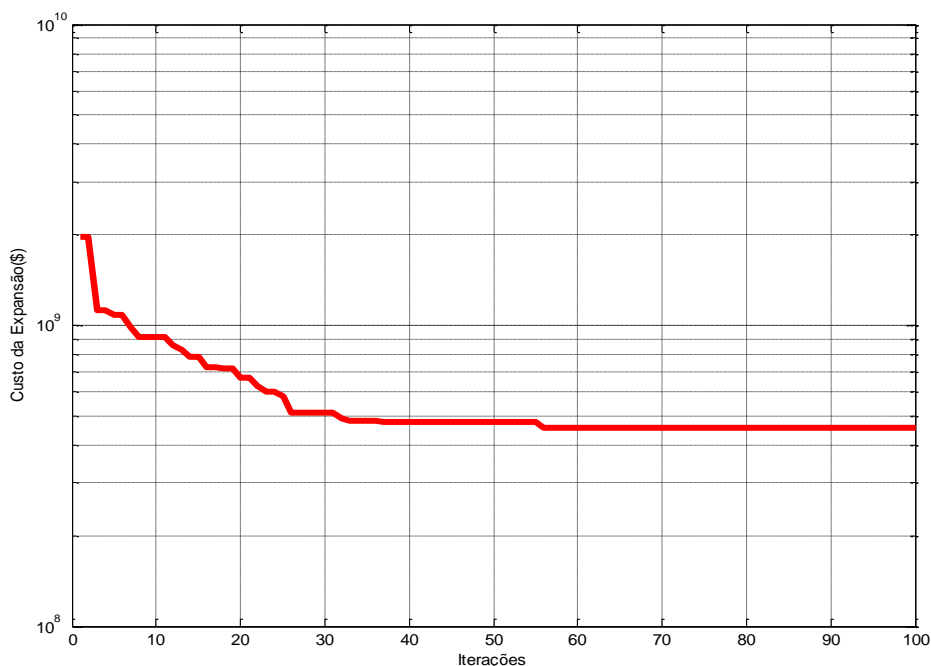


Figura 5-11- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema IEEE 24 barras - G4.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Nesta segunda simulação foram consideradas as rotas candidatas pré-seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G0 - 2º Simulação

Para este caso, foram seleccionadas cinco rotas candidatas das quarenta e uma possíveis, Tabela 5-19.

Redução de aproximadamente 88% das alternativas de expansão. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-19, estão contidas no conjunto reduzido proposto.

Tabela 5-19- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

<p>ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS</p>
<p>3-24, 6-10, 7-8, 10-12 e 14-16</p>

O custo total de investimento no sistema de transmissão foi de US\$152.000.000,00, sendo o mesmo apresentado pela Tabela 5-14. A Figura 5-12, mostra a evolução do processo bioinspirado, sendo a solução ótima obtida na terceira iteração. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 358 segundos.

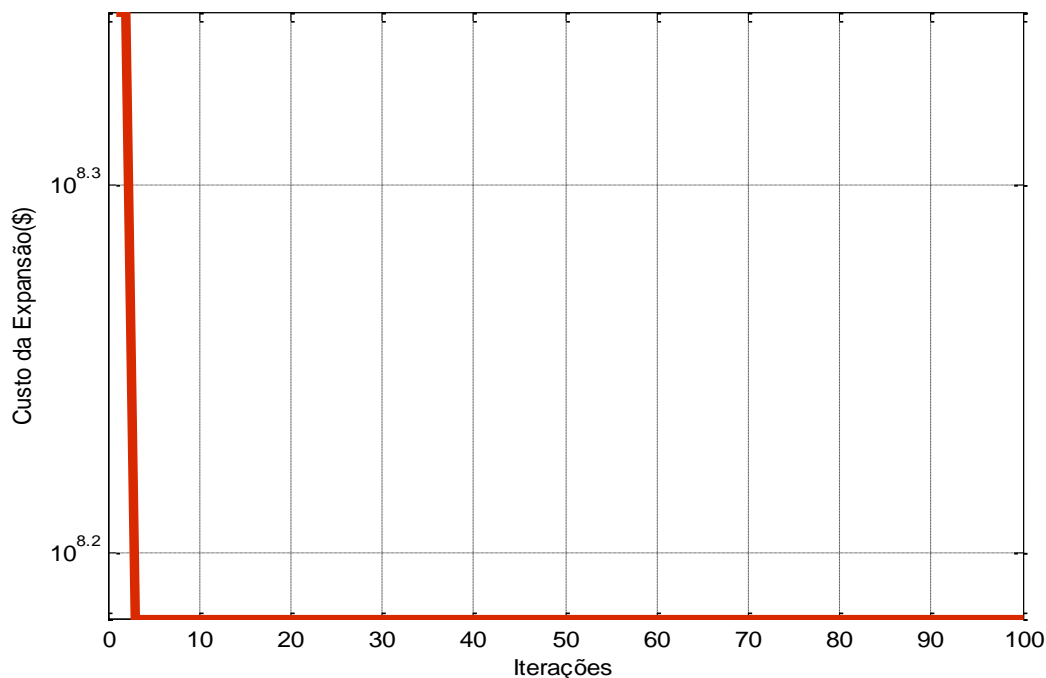


Figura 5-12- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema IEEE 24 barras - G0.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G1 - 2º Simulação

Para o cenário de geração G1 foram selecionadas, pelo AHCP (IS^P), dezesseis rotas candidatas das quarenta e uma possíveis. Uma redução de aproximadamente 61% das alternativas de expansão, vide Tabela 5-20. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-20, estão contidas no conjunto reduzido proposto.

Tabela 5-20- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
1-5 , 2-6, 2-8, 3-24 , 6-7, 6-10 , 7-8 , 10-11, 11-13, 14-16 , 15-21, 15-24 , 16-17 , 16-19 , 17-18 e 17-22

A metodologia proposta tem o plano de expansão apresentado na Tabela 5-21, o qual obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$370.000.000,00 e corresponde a solução ótima difundida na literatura.

Tabela 5-21- PET -Sistema IEEE 24 barras - G1- Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
01-05	1
03-24	1
06-10	1
07-08	2
14-16	1
15-24	1
16-17	2
16-19	1
17-18	1

Através da Figura 5-13, verifica-se a convergência na vigésima oitava iteração, com um tempo total de simulação de 827 segundos. Esta eficiência no processo de convergência se deve à qualidade da redução do espaço de busca e das soluções geradas pelo AHCP (IS^P).

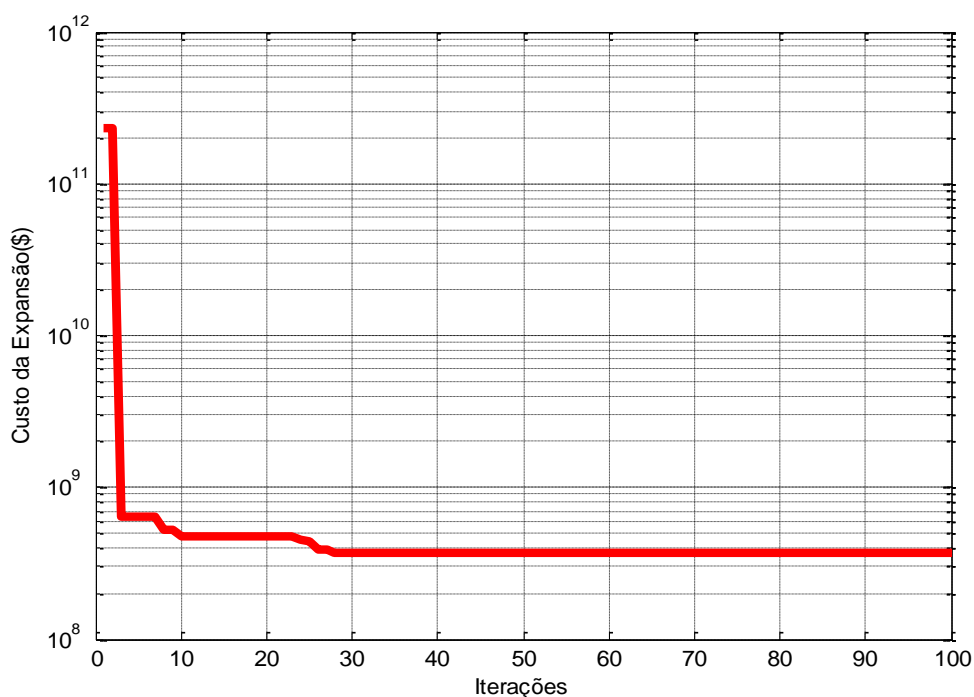


Figura 5-13- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema IEEE 24 barras - G1.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G2 - 2º Simulação

Para o cenário G2 foram selecionadas, pelo AHCP (IS^P), dez rotas candidatas das quarenta e uma possíveis, Tabela 5-22. Uma redução de aproximadamente 76% das alternativas de expansão no sistema de transmissão de energia elétrica. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-22, estão contidas no conjunto reduzido proposto.

Tabela 5-22- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
1-5, 3-24, 6-10, 7-8, 10-12, 14-16, 15-21, 15-24, 16-17 e 17-18

A metodologia proposta obteve o mesmo plano de expansão apresentado na Tabela 5-16, o qual representa um custo total de investimento de US\$392.000.000,00 e corresponde a solução ótima difundida na literatura.

Através da Figura 5-14, verifica-se a obtenção da solução final na oitava iteração, esta eficiência no processo de convergência se deve à qualidade da redução do espaço de busca e das soluções geradas pelo AHCP (IS^P).

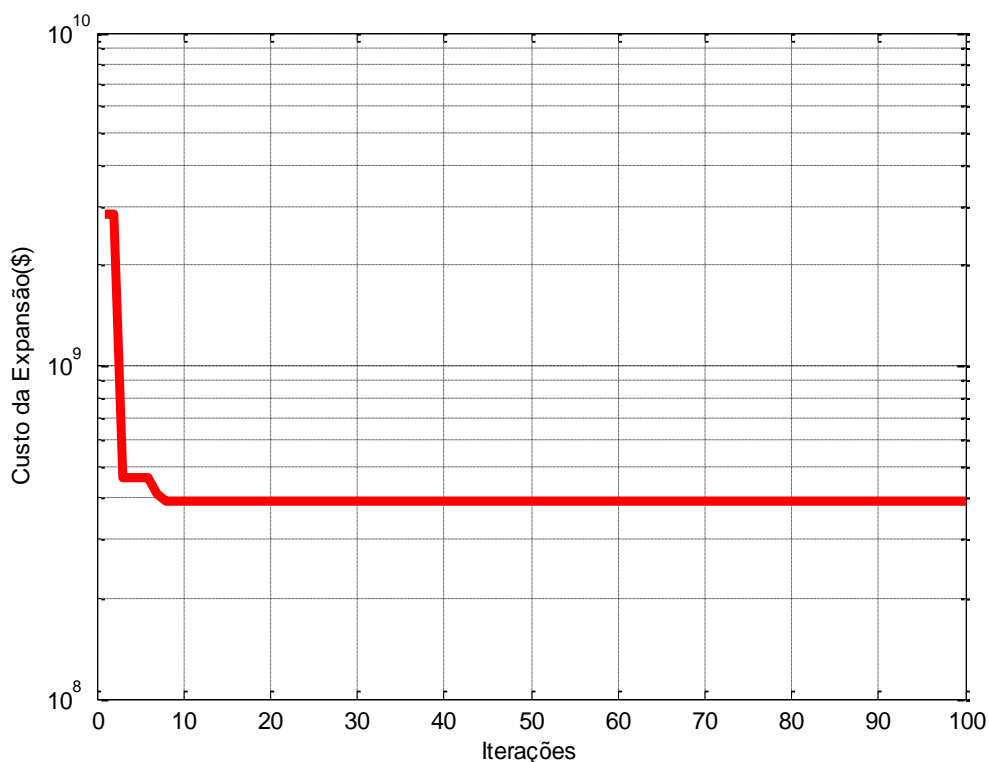


Figura 5-14- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema IEEE 24 barras - G2

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G3 - 2º Simulação

Neste cenário foram selecionadas, pelo AHCP (IS^P), onze rotas candidatas das quarenta e uma possíveis, Tabela 5-23. Uma redução de aproximadamente 73% das alternativas de expansão. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-23, estão contidas no conjunto reduzido proposto.

Tabela 5-23- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
1-5, 6-10 , 7-8 , 10-12 , 11-13, 12-23, 14-16 , 16-17 , 20-23 , 13-14 e 14-16

A Tabela 5-24 traz o plano final de expansão obtido, o qual apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$218.000.000,00 e corresponde a solução ótima difundida na literatura.

Tabela 5-24- PET -Sistema IEEE 24 barras - G3- Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
06-10	1
07-08	2
10-12	1
14-16	1
16-17	1
20-23	1

Pela Figura 5-15 é possível verificar que a solução ótima foi obtida na oitava iteração, mostrando a influência do conjunto reduzido de rotas e das soluções geradas pelo AHCP no processo de busca boinspirado. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 788 segundos.

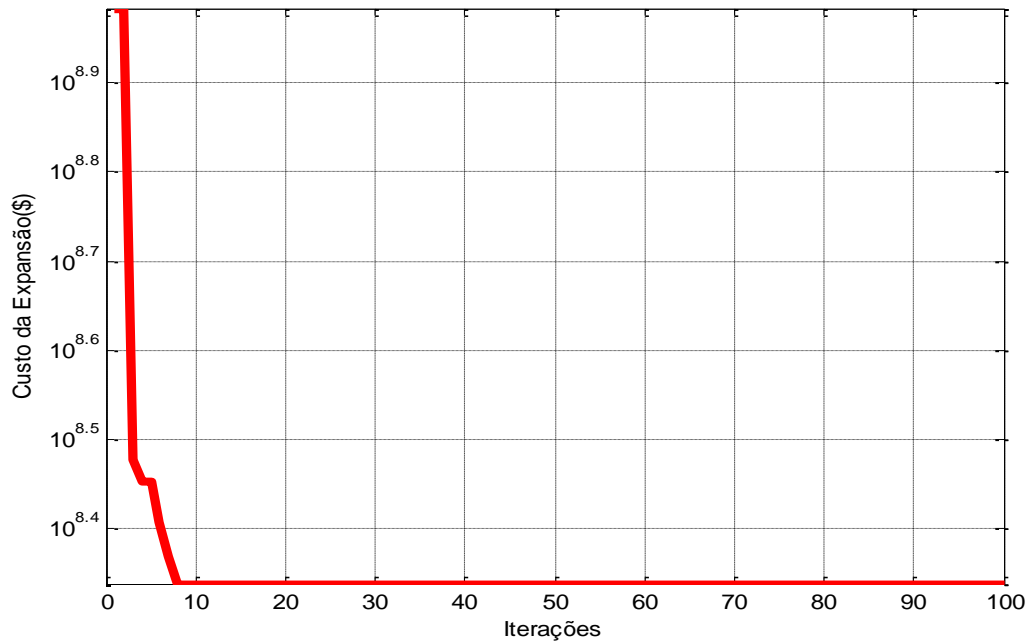


Figura 5-15- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema IEEE 24 barras - G3.

Sistema IEEE 24 barras - Cenário G4 - 2º Simulação

Para este cenário, o AHCP (IS^P) agrupou onze rotas candidatas das quarenta e uma possíveis, Tabela 5-25. Uma redução de aproximadamente 73% das alternativas de expansão. Para este caso, o AHCP (IS^P) em sua redução de rotas candidatas, Tabela 5-25, não contemplou apenas uma única rota ótima, a rota candidata entre as barras 9-11.

Tabela 5-25- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
1-5, 3-24, 6-10, 7-8, 10-12, 12-13, 14-16, 15-24, 16-17, 17-22 e 14-23

A Tabela 5-26 apresenta o plano final de expansão obtido, o qual tem um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$390.000.000,00. A solução ótima apresentada pela literatura especializada, para este cenário do sistema IEEE 24 barras, é de US\$342.000.000,00 [8], ou seja, a redução das rotas candidatas originou uma solução ótima local de boa qualidade, +14%, quando comparada com a literatura.

Tabela 5-26- PET -Sistema IEEE 24 barras - G4- Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
03-24	1
06-10	3
07-08	2
10-12	1
12-13	1
14-16	2
16-17	1

Pela Figura 5-16 é possível verificar que a solução ótima local foi obtida na sétima iteração. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 861 segundos.

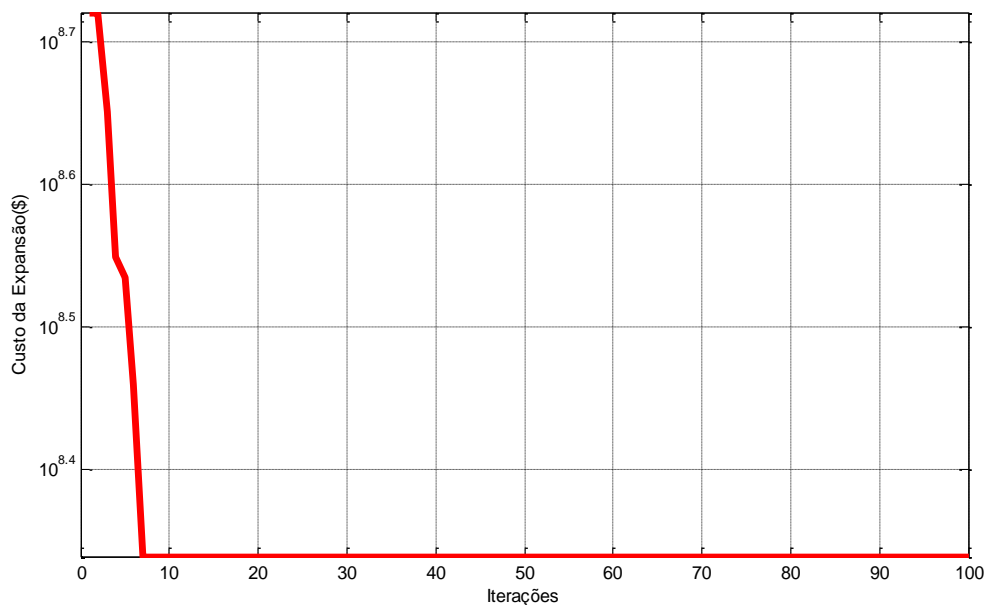


Figura 5-16- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema IEEE 24 barras - G4.

A Tabela 5-27 traz respectivamente, os resultados do PET estático para os cinco cenários de geração G0, G1, G2, G3 e G4 obtidos pela metodologia, com os planos de investimento dados em milhões de dólares.

Tabela 5-27- Resumo Resultados AHCP (IS^P)+ PSO - IEEE 24 barras - G0, G1, G2, G3 e G4

CUSTO E PLANOS DE EXPANSÃO				
G0 - \$152x10⁶	G1 - \$370x10⁶	G2 - \$392x10⁶	G3 - \$218x10⁶	G4 - \$390x10⁶
06-10 (1)	01-05 (1)	01-05 (1)	06-10 (1)	03-24 (1)
07-08 (2)	03-24 (1)	03-24 (1)	07-08 (2)	06-10 (3)
10-12 (1)	06-10 (1)	06-10 (1)	10-12 (1)	07-08 (2)
14-16 (1)	07-08 (2)	07-08 (1)	14-16 (1)	10-12 (1)
	14-16 (1)	10-12 (1)	16-17 (1)	12-13 (1)
	15-24 (1)	14-16 (1)	20-23 (1)	14-16 (2)
	16-17 (2)	15-24 (1)		16-17 (1)
	16-19 (1)	16-17 (2)		
	17-18 (1)	17-18 (2)		

As soluções encontradas pela metodologia proposta correspondem as soluções ótimas divulgadas na literatura para todos os cenários do sistema IEEE 24 barras, exceto para o cenário G4, sendo confirmada a otimalidade das soluções obtidas pelas referências [8], [17], [19], [60], [59], [61], [62] e [63].

5.4 SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL

Este sistema real, equivalente a região sul do Brasil, vem sendo utilizado para efeito de comparação com a literatura. O referido sistema é composto 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 [4] 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 de análise: em uma 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 Equivalente com Redespacho de Geração**

Para este caso tem-se um número total de 3^{79} combinações possíveis de investimento, demonstrando a dificuldade da obtenção da solução ótima global. Para esta análise 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 rota candidata (iii) enxame composto por 100 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações, como critério de convergência.

Ao aplicar a heurística construtiva proposta, analisando cada índice de sensibilidade de forma separada, encontrou os seguintes resultados, sendo o custo dado em milhões de dólares conforme Tabela 5-28.

Tabela 5-28- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade- Sul com Redespacho.

ÍNDICES	MELHOR CUSTO (\$)	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	70,289	79	18	77%	1222	SIM
IS^{ga2}	70,289	79	40	50%	1944	SIM
IS^{me1}	74,733	79	13	84%	1040	NÃO
IS^{me2}	70,289	79	15	81%	1292	SIM
IS^{mcc1}	74,733	79	18	77%	1168	NÃO
IS^{mcc2}	70,289	79	19	76%	1226	SIM
IS^P	70,289	79	18	77%	1242	SIM

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 5-29 apresenta o plano final de expansão obtido pelo processo de otimização bioinspirado, PSO, para o sistema equivalente da região Sul do Brasil com redespacho de geração. Destaca-se que foram resolvidos 10.000 problemas de otimização na busca pelo plano de expansão mais econômico.

Tabela 5-29 PET -Sistema Sul Equivalente com Redespacho - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
05-06	2
20-21	2
20-23	1
33-34	1
42-43	1
46-06	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$71.451.000,00. A Figura 5-17 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 540 segundos de simulação computacional. Pode-se verificar analisando o gráfico abaixo que a solução final foi encontrada com um pouco mais de cinquenta iterações.

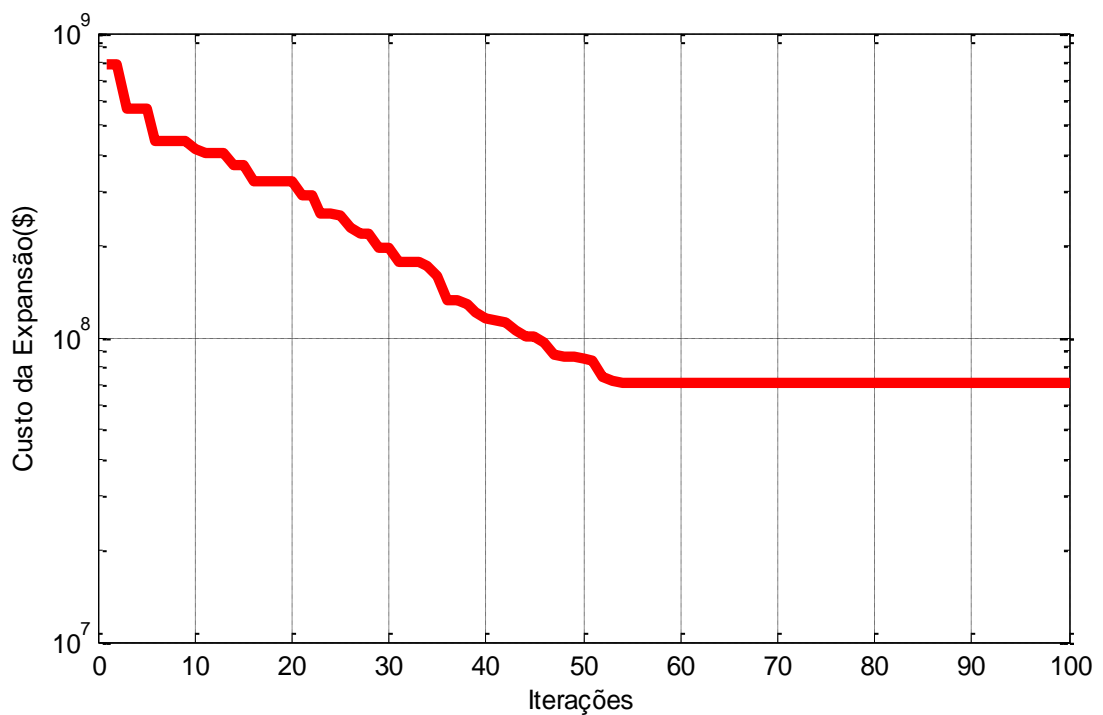


Figura 5-17- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema Sul Equivalente com Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Neste caso o AHCP (IS^P) foi usado com a finalidade de reduzir o espaço de busca e assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca multimodal. Desta forma, foram seleccionadas 18 rotas das 79 possíveis, redução de aproximadamente 77% das alternativas de expansão do sistema de transmissão. A Tabela 5-30 apresenta as rotas seleccionadas pelo AHCP. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-30, estão contidas no conjunto reduzido proposto pelo AHCP (IS^P).

Tabela 5-30- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
2-3, 5-6 , 13-18, 13-20 , 18-20, 19-21, 19-25, 20-21 , 20-23 , 21-25, 24-25, 26-29, 27-29, 28-30, 31-32, 42-43 , 46-06 e 46-11.

O plano final de expansão obtido pelo PSO, para o sistema Sul, considerando as rotas sinalizadas pelo AHCP é dado na Tabela 5-31.

Tabela 5-31- PET -Sistema Sul Equivalente com Redespacho - Rotas Candidatas Reduzidas

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

Analisando o comportamento de convergência do PSO, verifica-se através da Figura 5-18, que a solução ótima foi encontrada na décima sétima iteração do processo de busca. O tempo total de simulação, com iterações, foi de aproximadamente 922 segundos.

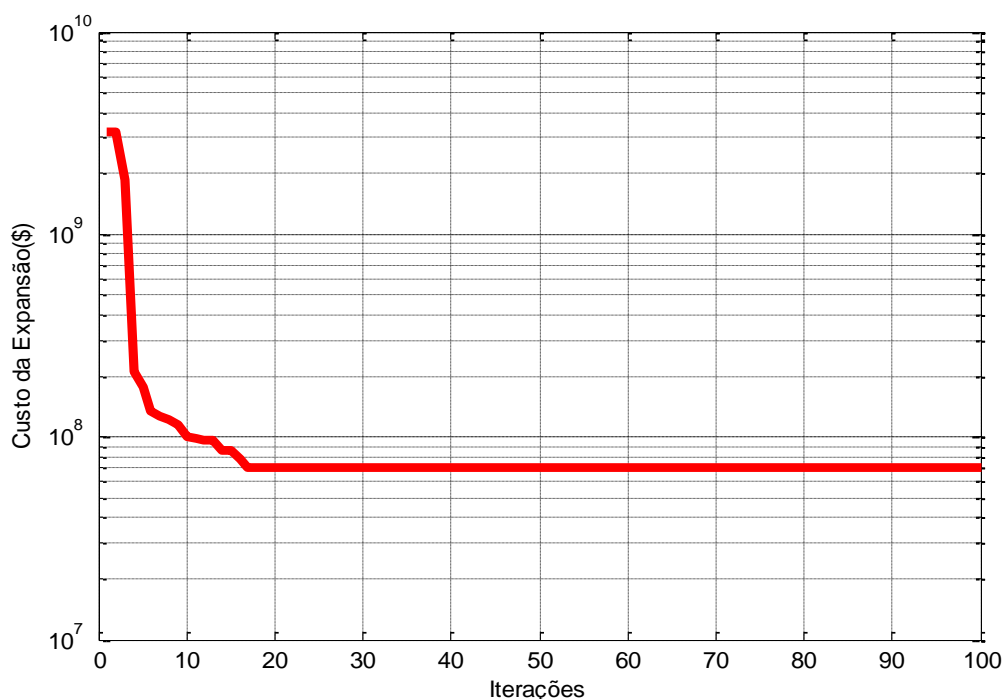


Figura 5-18- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema Sul Equivalente com Redespacho.

O PET apresentado, Tabela 5-31, dá origem a um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$70.289.000,00. Em pesquisa na literatura especializada, [12], [15] e [10], pôde-se verificar que o resultado aqui obtido corresponde a solução ótima global para o sistema equivalente da região Sul do Brasil com redespacho de geração.

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

A melhor solução encontrada na literatura, para esta segunda análise, corresponde a um custo total de investimento de US\$154.420.000,00 sendo inicialmente publicada em [64] por Romero e Monticelli e posteriormente confirmada por Binato [65].

Para esta simulação 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 100 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações, como critério de convergência. Este sistema apresenta um número total de 4^{79} combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão.

Ao aplicar a heurística construtiva proposta, analisando cada índice de forma separada, obteve-se os seguintes resultados, sendo o custo dado em milhões de dólares conforme Tabela 5-32.

Tabela 5-32- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade- Sul sem Redespacho

ÍNDICES	MELHOR CUSTO (\$)	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	154.420	79	33	58%	2276	SIM
IS^{ga2}	154.420	79	37	53%	2248	SIM
IS^{me1}	154.420	79	21	73%	2086	SIM
IS^{me2}	154.420	79	24	69%	2192	SIM
IS^{mcc1}	154.420	79	56	29%	2382	SIM
IS^{mcc2}	154.420	79	48	39%	2560	SIM
IS^P	154.420	79	33	58%	2212	SIM

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

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, 79 rotas candidatas, vide apêndice A. A Tabela 5-33 apresenta o plano final de expansão obtido pelo processo de otimização bioinspirado, PSO, para o sistema equivalente da região Sul do Brasil sem redespacho de geração..

Tabela 5-33- PET - Sistema Sul Equivalente sem Redespacho - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
02-03	2	24-25	2
02-04	1	28-43	1
12-14	2	31-32	1
13-18	2	42-43	2
19-25	1	46-03	1
20-21	1	-	-

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$212.383.000,00. Ou seja, o PSO não obteve sucesso para esta análise considerando todas as possíveis rotas candidatas a expansão.

A Figura 5-19 apresenta a evolução do processo de otimização bioinspirado com a construção final de dezesseis novos circuitos de transmissão que atendem à demanda de forma adequada. Foram necessários aproximadamente 788 segundos de simulação computacional para a convergência do PSO. Pode-se verificar analisando a evolução do processo de convergência a solução foi obtida na septuagésima iteração do processo de busca.

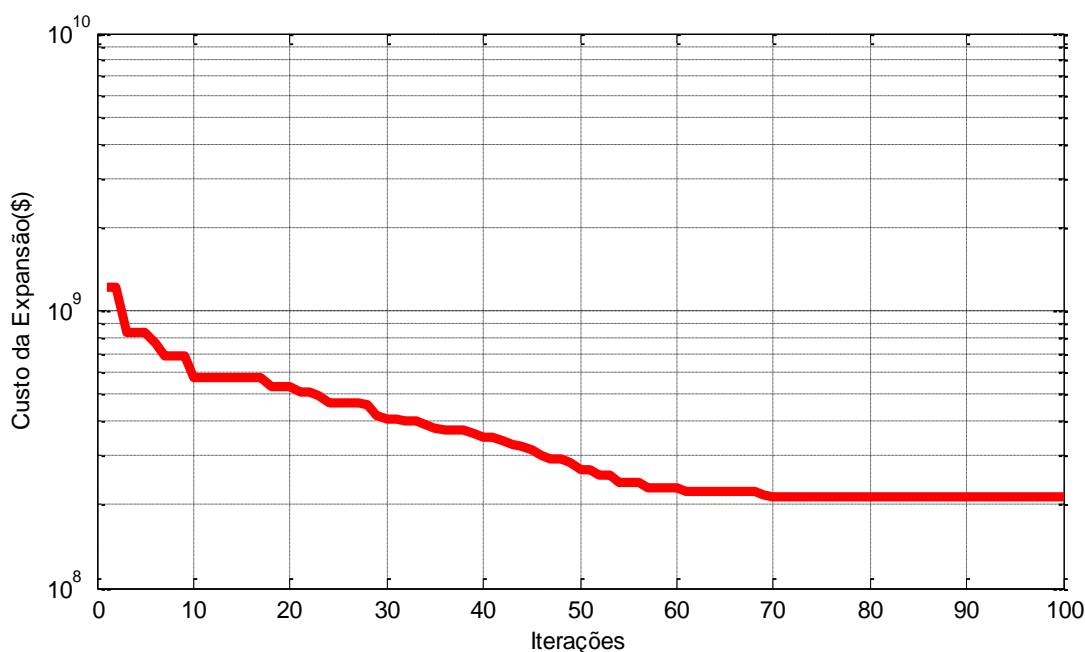


Figura 5-19- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema Sul Equivalente sem Redespacho.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Neste caso o AHCP (IS^P) foi usado com a finalidade de reduzir o espaço de busca e assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca multimodal. Para tanto, foram seleccionadas 33 rotas candidatas das 79 possíveis, vide Tabela 5-34. Ou seja, uma redução de aproximadamente 58%. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-4, estão contidas no conjunto reduzido proposto pelo AHCP (IS^P).

Tabela 5-34- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
2-3, 2-5, 5-6 , 5-8, 13-18, 14-15, 16-28, 18-20, 19-21, 19-25 , 20-21 , 20-23, 21-25, 24-25 , 25-32, 26-29 , 27-29, 27-38, 28-30 , 28-31, 28-41, 28-43, 29-30 , 31-32 , 31-41, 32-41, 32-43, 40-41, 40-45, 41-43, 42-43 , 46-3 e 46-06

A Tabela 5-35 traz o plano final de expansão do sistema de transmissão, alcançado pelo PSO, para o sistema Sul sem redespacho de geração. Plano este que representa um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$154.420.000,00.

Tabela 5-35- PET -Sistema Sul Equivalente sem Redespacho - Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	ROTAS SELECIONADAS	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 5-20 apresenta o gráfico de convergência do processo de busca via otimização bioinspirada, solução ótima foi encontrada na trigésima oitava iteração. O tempo total de simulação foi de aproximadamente de 1626 segundos, tempo superior a análise anterior, pelo fato usar o AHCP.

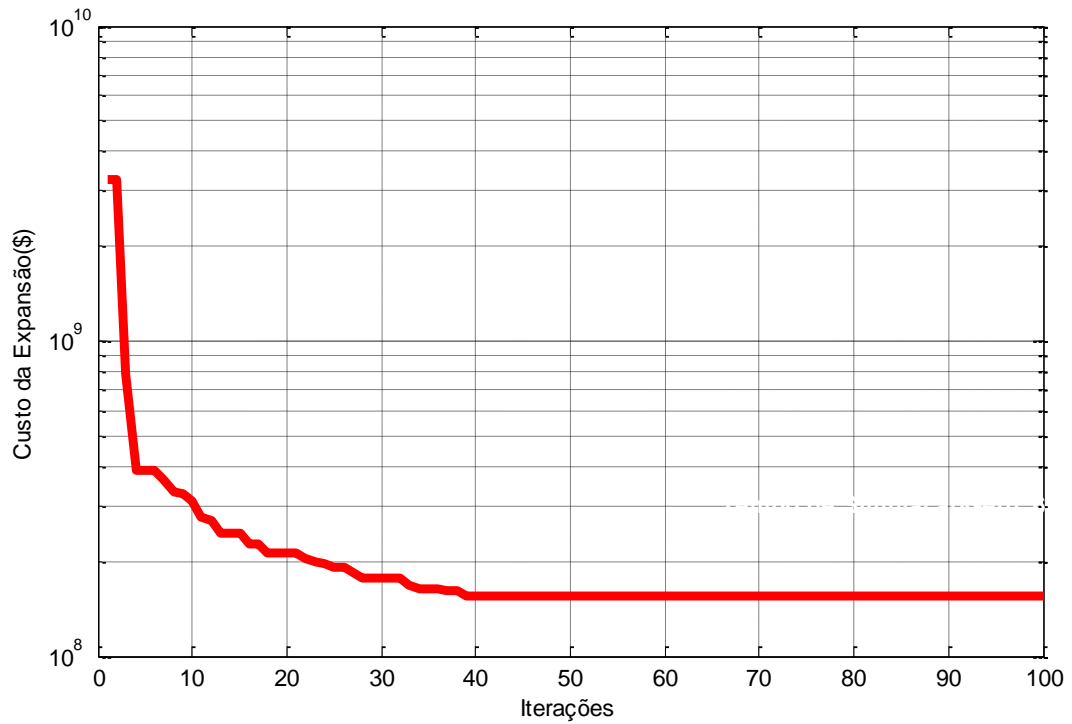


Figura 5-20- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema Sul Equivalente sem Redespacho.

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 [8], [15], [58], [64] e [66].

A Figura 5-21 abaixo corresponde ao sistema Sul equivalente, onde as linhas tracejadas representam as expansões realizadas para o caso sem redespacho de geração.

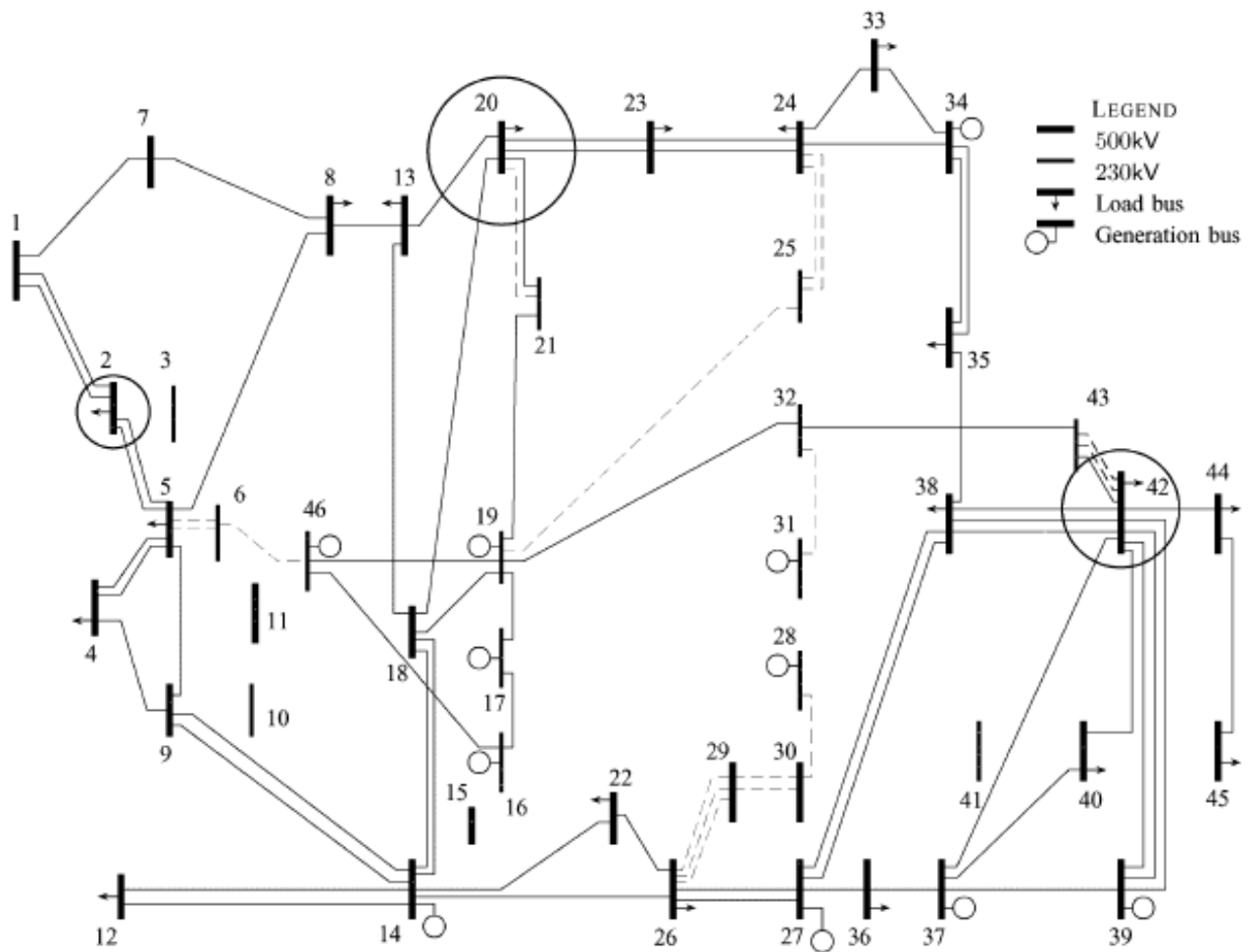


Figura 5-21- Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil.

5.5 SISTEMA COLOMBIANO

O sistema real Colombiano aqui em análise é formado por 93 barras, 193 circuitos existentes na topologia base, 155 rotas candidatas à expansão e uma demanda prevista de 9750 MW para o plano P1, 12162 MW para o plano P2 e 14559 MW para plano P3, todos os planos sem redespacho de geração. Para este caso tem-se um número total de 4^{155} combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão de energia elétrica. Destaca-se que foi utilizado o sistema Colombiano apresentado na Figura 5-22 com os cenários de geração P1, P2 e P3 [68]. Este sistema vem sendo muito utilizado para validar os resultados de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, os dados podem ser verificados no Apêndice A.

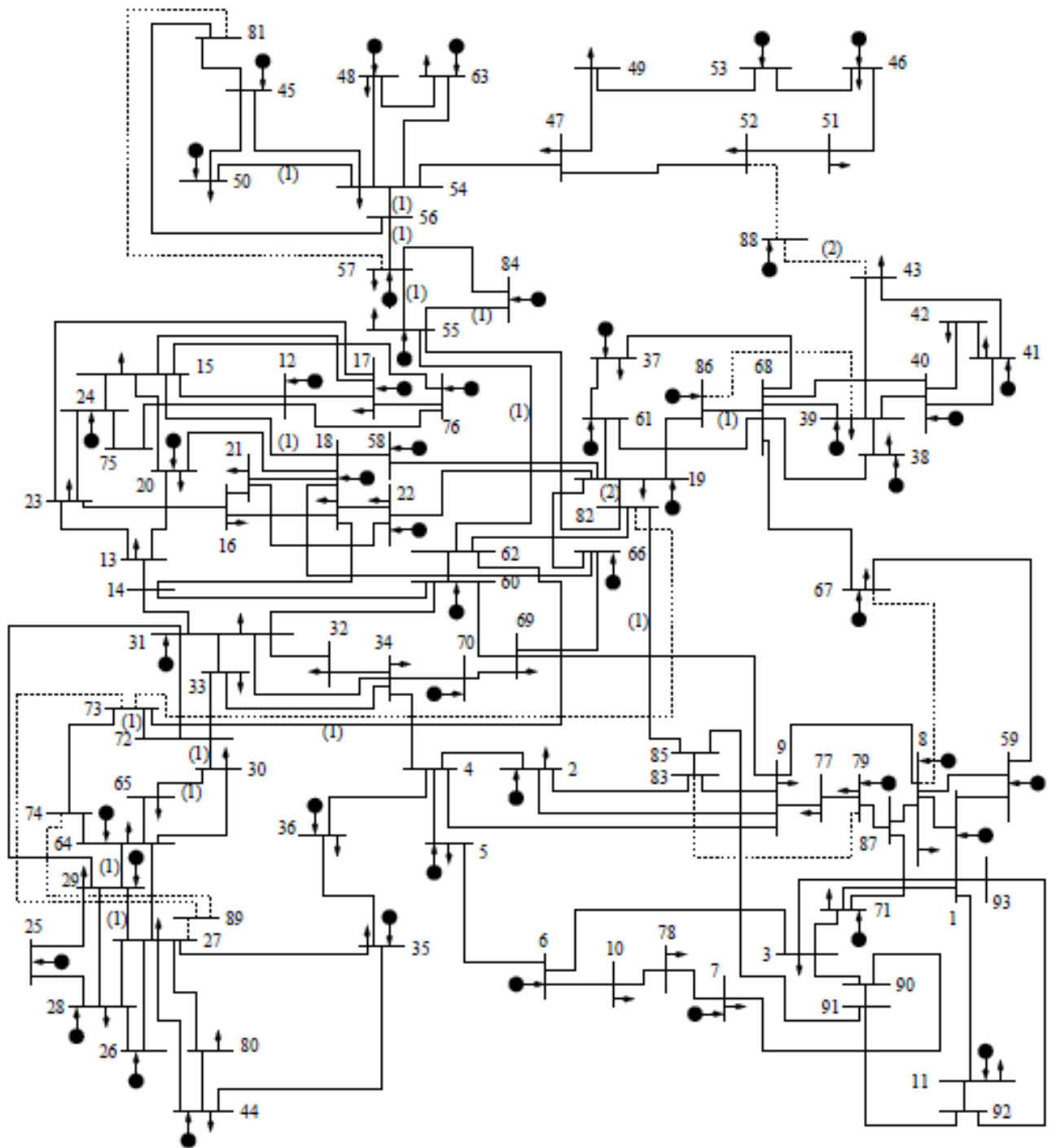


Figura 5-22- Sistema Colombiano 93 barras.

Ao empregar o AHCP, estudando cada índice individualmente, para o plano P1 tem-se os seguintes resultados, sendo o custo em milhões de dólares conforme Tabela 5-36.

Tabela 5-36- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - Colombiano -P1

ÍNDICES	MELHOR CUSTO (\$)	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	345.254	155	8	95%	774	NÃO
IS^{ga2}	345.254	155	13	92%	802	NÃO
IS^{me1}	345.254	155	5	97%	764	NÃO
IS^{me2}	345.254	155	7	96%	768	NÃO
IS^{mcc1}	345.254	155	7	96%	768	NÃO
IS^{mcc2}	345.254	155	8	95%	770	NÃO
IS^P	345.254	155	8	95%	772	NÃO

A Tabela 5-37 traz a os resultados obtidos pelo AHCP para o plano P2 com o custo em milhões de dólares.

Tabela 5-37- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - Colombiano -P2

ÍNDICES	MELHOR CUSTO (\$)	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	443.494	155	18	88%	1470	SIM
IS^{ga2}	443.494	155	18	88%	1484	SIM
IS^{me1}	443.494	155	17	89%	1410	SIM
IS^{me2}	443.494	155	16	90%	1478	SIM
IS^{mcc1}	443.494	155	16	90%	1468	SIM
IS^{mcc2}	443.494	155	17	89%	1468	SIM
IS^P	443.494	155	16	90%	1458	SIM

O resultados adquiridos pela heurística proposta para o plano P3 é apresentado na Tabela 5-38, sendo o custo em milhões de dólares.

Tabela 5-38- Resultado Índices AHCP: Redução x Qualidade - Colombiano -P3

ÍNDICES	MELHOR CUSTO (\$)	CONJUNTO TOTAL DE ROTAS	CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS	REDUÇÃO PERCENTUAL	PNL'S	OTIMALIDADE ENCONTRADA?
IS^{ga1}	641.381	155	28	82%	2532	NÃO
IS^{ga2}	641.381	155	29	81%	2482	NÃO
IS^{me1}	674.377	155	15	90%	2470	NÃO
IS^{me2}	645.252	155	20	87%	2114	NÃO
IS^{mcc1}	645.252	155	24	84%	2584	NÃO
IS^{mcc2}	641.381	155	23	85%	2408	NÃO
IS^P	641.381	155	21	86%	2492	NÃO

Mediante os resultados obtidos pela heurística proposta o índice portfólio IS^P foi escolhido para empregar o PSO e analisar os resultados e a performance da metodologia proposta.

Caso 1: Sistema Colombiano sem Redespacho de Geração

Para este caso tem-se um número total de 4^{155} 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 3 expansões por caminho candidato; (iii) exame composto por 350 partículas; (iv) um número máximo de 100 iterações, como critério de convergência. Em seguida as simulações realizadas para cada plano do sistema Colombiano 93 barras sem redespacho.

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

Neste caso foram consideradas todas as 155 rotas candidatas à expansão, ou seja, o plano final foi obtido somente pelo algoritmo bioinspirado via PSO.

Sistema Colombiano - Plano P1 - 1º Simulação

Neste primeiro plano de geração para o sistema Colombiano apresenta-se o plano final de expansão obtido pelo algoritmo bioinspirado na Tabela 5-39. Destaca-se que foram resolvidos 35.000 problemas de otimização na busca do plano de expansão mais econômico.

Tabela 5-39- PET - Sistema Colombiano P1 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
12-76	1	45-54	1
13-23	1	54-56	1
15-76	1	54-63	1
18-20	1	55-57	1
18-21	1	55-62	1
18-22	1	56-57	1
33-72	1	77-79	1
41-43	2	79-87	1
45-50	2	82-85	1

A solução obtida apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$408.0467.000,00. A Figura 5-23 apresenta a evolução do processo de otimização bioinspirado com a construção final de vinte novos circuitos de transmissão que atendem à demanda de forma adequada, sendo necessários 3180 segundos de simulação computacional. Pode-se verificar, na Figura 5-23, que a solução final foi encontrada com setenta e quatro iterações.

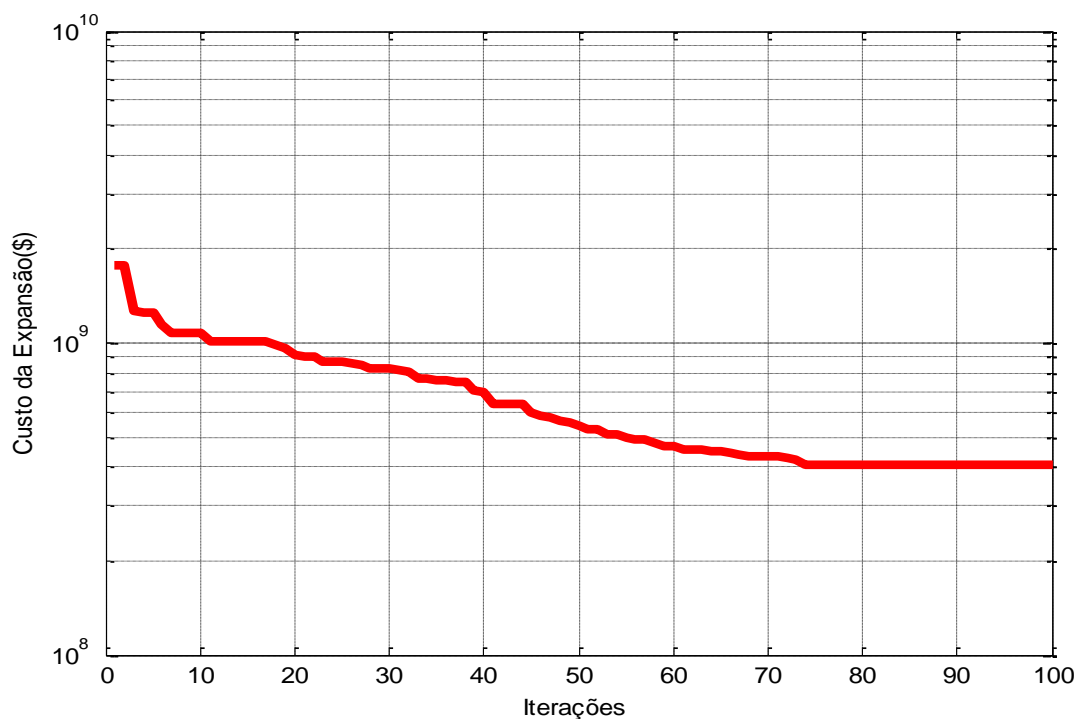


Figura 5-23- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema Colombiano - P1.

Sistema Colombiano - Plano P2 - 1º Simulação

Em uma segunda análise, utilizando o sistema Colombiano P2 o plano final de expansão obtido pelo algoritmo bioinspirado é apresentado na Tabela 5-40.

Tabela 5-40- PET - Sistema Colombiano P2 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
01-93	1	45-50	1
02-04	1	45-81	1
02-83	1	54-56	1
08-87	1	55-62	1
12-17	2	55-84	1
16-23	1	56-57	1
19-82	1	56-81	1
25-28	1	57-81	1
27-64	1	57-84	1
30-65	1	61-68	1
31-32	1	62-73	1
33-34	1	82-85	1

A topologia final apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$598.777.000,00. Com um tempo de simulação total de 3087 segundos, de acordo com a Figura 5-24, observa-se que este custo foi encontrado com noventa e nove iterações.

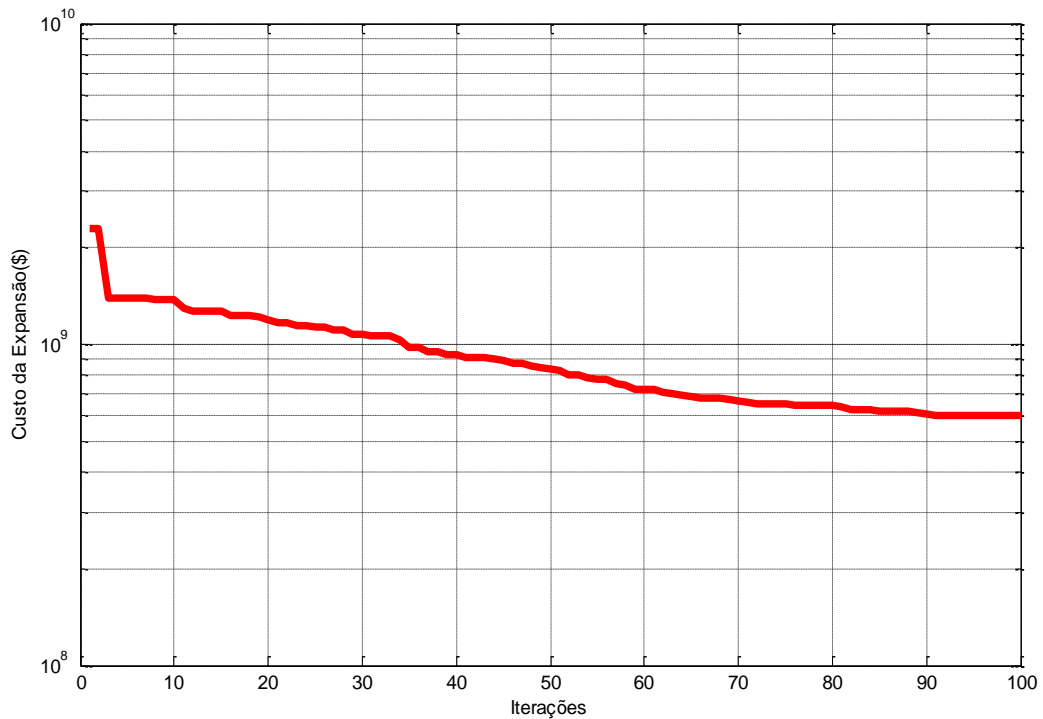


Figura 5-24- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema Colombiano - P2.

Diante do resultado pode-se verificar que para este caso não foi encontrada a solução ótima [8], que é de US\$443.494.000,00.

Sistema Colombiano - Plano P3 - 1º Simulação

Para o plano de geração P3 o plano final de expansão obtido pelo algoritmo bioinspirado é apresentado na Tabela 5-41.

Tabela 5-41- PET - Sistema Colombiano P3 - Todas as Rotas Candidatas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
03-90	1	31-33	1
04-36	1	37-68	2
05-06	2	38-68	1
07-78	1	39-68	1
07-90	1	45-54	1
08-87	1	45-81	1
13-20	1	46-53	1
14-60	2	52-88	1
15-20	1	55-57	1
18-21	2	55-62	1
19-22	1	55-82	1
19-66	1	55-84	1
19-82	1	56-57	1
21-22	2	56-81	1
23-24	2	62-73	1
25-28	1	58-86	1
25-29	2	69-70	1
27-29	1	72-73	2
29-64	2	82-85	1
30-72	1		

A topologia final apresenta um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$854.514.000,00. Com um tempo de simulação total de 3202 segundos, de acordo com a Figura 5-25, observa-se que este custo foi encontrado com cem iterações.

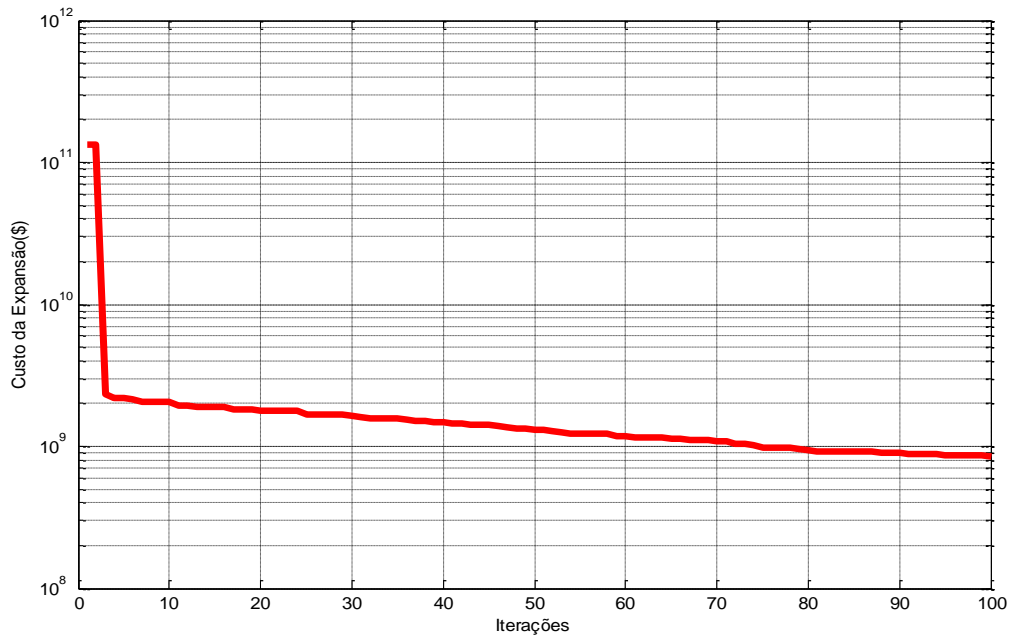


Figura 5-25- Evolução do PSO- Todas as Rotas Candidatas - Sistema Colombiano - P3.

De posse do resultado confirma-se que para este caso não foi encontrada a solução ótima [8], que é de US\$560.002.000,00.

B) 2ª Simulação: Consideração das Rotas Candidatas à Expansão Seleccionadas pelo AHCP (IS^P).

Nesta segunda simulação foram consideradas as rotas candidatas pré-seleccionadas pelo AHCP.

Sistema Colombiano - Plano P1 - 2º Simulação

Foram seleccionadas oito rotas das cento e cinquenta e cinco possíveis, Tabela 5-42. Uma redução de aproximadamente 95% das alternativas de expansão. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-42, o conjunto de rotas proposto pelo AHCP não reuniu todas as rotas ótimas, faltaram 4 rotas (50-54, 54-56, 55-62 e 56-57), isto é, encontrou-se 33% das rotas ótimas, Tabela 5-42.

Tabela 5-42- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
27-89, 43-88, 45-81, 55-57 , 55-82, 57-81, 64-74 e 82-85

O procedimento é análogo ao descrito anteriormente, apresenta o plano de expansão dado pela Tabela 5-43, o qual obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$345.254.000,00.

Tabela 5-43- PET -Sistema Colombiano P1 - Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
45-81	1
55-57	1
55-82	1
57-81	2
82-85	1

Na quarta iteração a solução final é obtida, com um tempo total de simulação de 3881 segundos, Figura 5-26.

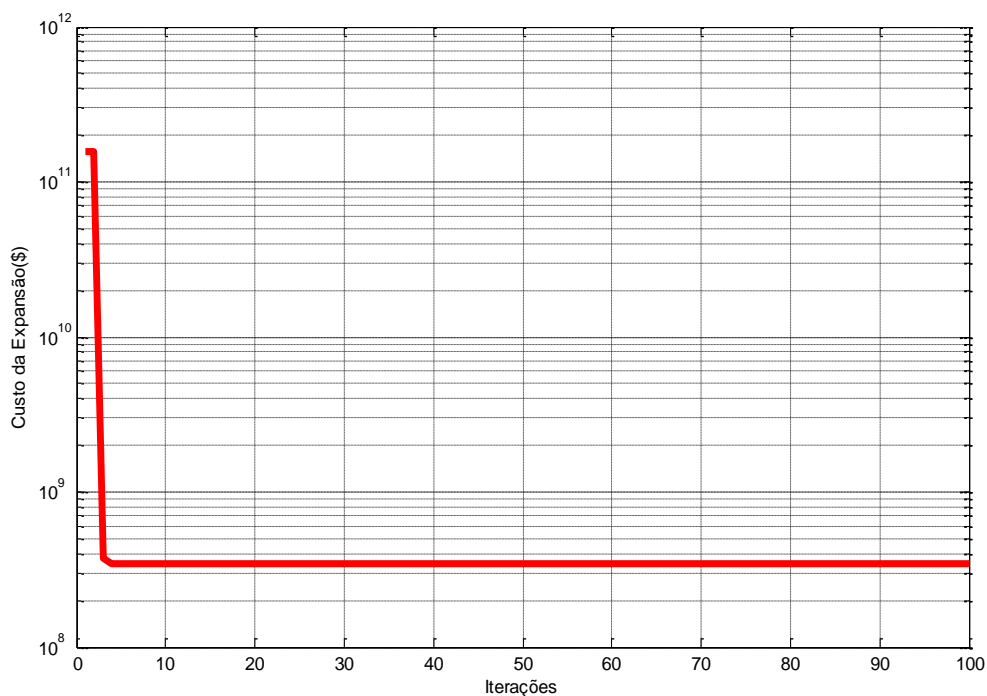


Figura 5-26- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema Colombiano - P1.

Apesar da solução ótima conhecida para o sistema Colombiano P1, US\$296.454.000,00 [8] não ter sido encontrada, a solução obtida difere do custo em +16%, Tabela 5-43.

Sistema Colombiano - Plano P2 - 2º Simulação

Foram selecionadas dezesseis rotas das cento e cinquenta e cinco possíveis, Tabela 5-44. Uma redução de aproximadamente 90% das alternativas de expansão. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-44.

Tabela 5-44- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
19-82, 27-29 , 27-89, 43-88, 45-81 , 55-57, 55-62 , 56-57, 57-81, 62-73 , 64-74, 73-74, 74-89, 82-85 , 85-91 e 90-91

O procedimento é análogo ao descrito anteriormente, apresenta o plano de expansão dado pela Tabela 5-45, o qual obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$443.494.000,00.

Tabela 5-45- PET -Sistema Colombiano P2 - Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
19-82	1
27-29	1
45-81	1
55-57	1
55-62	1
57-81	2
62-73	1
64-74	1
82-85	1

A literatura especializada [8], apresenta o mesmo custo ótimo apresentado anteriormente, US\$443.494.000,00. Entretanto, os planos diferem apenas pela construção de uma única linha. Ou seja, na solução ótima divulgada pela literatura especializada a linha 62-73, Tabela 5-45, é substituída pela linha 72-73. Destaca-se que ao utilizar a heurística construtiva, o número de rotas candidatas à expansão foi reduzido de 155 para 16 rotas. Ou seja, o conjunto

reduzido proposto foi capaz de proporcionar a obtenção do custo ótimo global através de uma nova configuração de expansão. Desta forma, pelo tamanho do sistema e pela complexidade do mesmo, pode-se dizer que a qualidade do conjunto reduzido de rotas candidatas à expansão foi, mais uma vez, satisfatória.

Na décima sétima iteração tem-se solução final, com um tempo total de simulação de 3988 segundos, Figura 5-27. O primoroso desempenho no processo de convergência se deve ao conjunto reduzido de rotas e as solução geradas pelo AHCP.

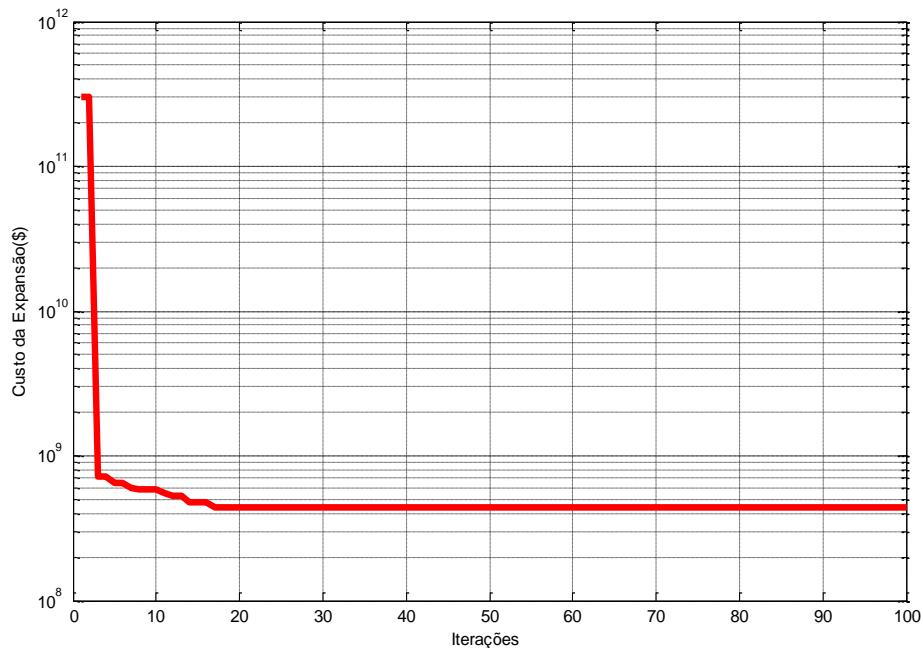


Figura 5-27- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema Colombiano - P2.

Sistema Colombiano - Plano P3 - 2º Simulação

Foram selecionadas vinte e uma rotas das cento e cinquenta e cinco possíveis Tabela 5-46. Uma redução de aproximadamente 73% das alternativas de expansão. Destaca-se que as rotas ótimas difundidas na literatura, em negrito na Tabela 5-46, para este caso o AHCP em sua redução contemplou-se 59% das rotas ótimas, faltaram 7 rotas de 17 (30-65, 30-72, 50-54, 54-56, 55-57, 56-57 e 72-73).

Tabela 5-46- Rotas propostas pelo AHCP – Índice IS^P

ROTAS DE EXPANSÃO PROPOSTAS
15-18 , 19-66, 19-82 , 27-29 , 29-64 , 27-89, 43-88 , 45-81 55-57, 55-62 , 55-84 , 57-81, 57-84, 62-73 , 64-74, 68-86 , 73-74, 73-82, 73-89, 74-89, e 82-85

O procedimento é análogo ao descrito anteriormente, apresenta o plano de expansão dado pela Tabela 5-47, o qual obteve um custo total de investimento no sistema de transmissão igual a US\$640.339.000,00.

Tabela 5-47- PET -Sistema Colombiano P3 - Rotas Candidatas Reduzidas

ROTAS SELECIONADAS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
15-18	1
19-82	2
27-29	1
43-88	2
45-81	1
55-57	1
55-62	1
55-84	1
57-81	2
62-73	1
68-86	1
73-89	1
82-85	1

Na oitava iteração tem-se a convergência, com um tempo total de simulação de 3883 segundos, Figura 5-28.

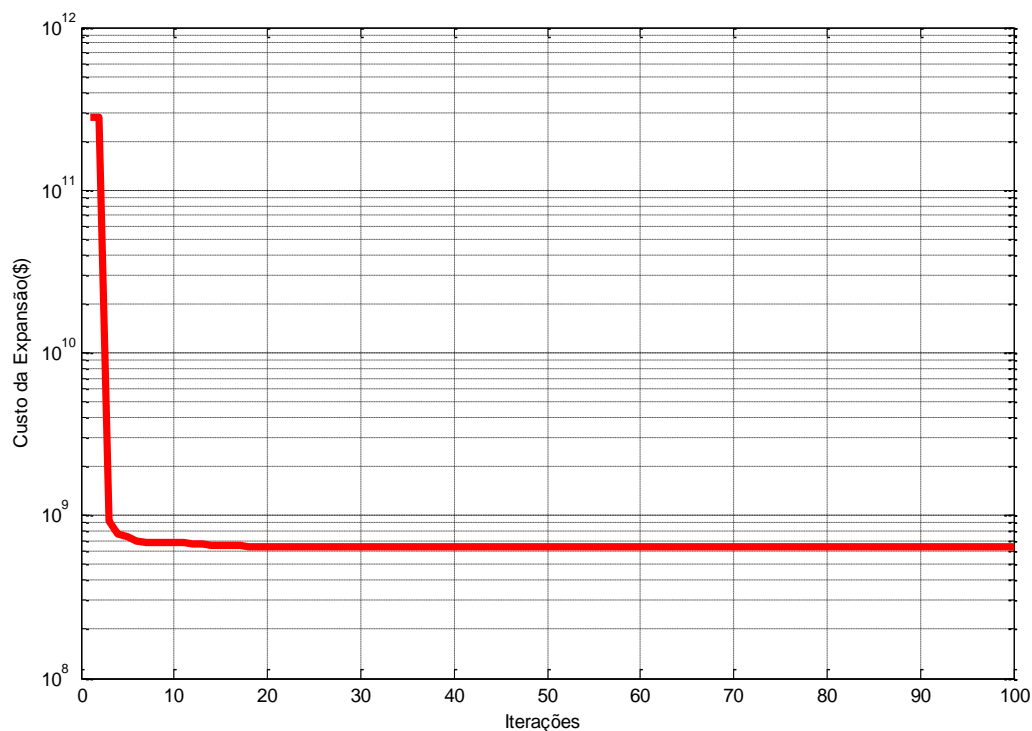


Figura 5-28- Evolução do PSO- Rotas Candidatas Reduzidas - Sistema Colombiano - P3.

A solução encontrada pela metodologia proposta, Tabela 5-47, não corresponde à solução ótima conhecida para o sistema Colombiano P3, que é US\$560.002.000,00, o custo obtido é +14% maior sendo confirmada pela referência [8].

Na tentativa de aperfeiçoar os resultados obtidos para os sistemas Colombiano P1 e P3 foram simulados com todas as rotas candidatas à expansão e utilizando as soluções iniciais oriundas do AHCP para inicializar as partículas, porém os resultados não melhoraram.

Os resultados do AHCP (redução de rotas) apresentados até aqui fizeram uso da sensibilidade baseada no portfólio proposto, uma vez que esta sensibilidade é inexistente na literatura. Desta forma, a Tabela 5-48 apresenta um resumo dos resultados obtidos individualmente pelos índices de sensibilidade. Ou seja, para cada índice de sensibilidade foi obtido um conjunto de rotas reduzidas de expansão e esse conjunto repassado ao PSO para a obtenção do planejamento final da expansão dos sistemas de transmissão em análise, sendo estes: sistema acadêmico Garver com e sem redespacho (Garver_C e Garver_S), sistema IEEE 24 barras no seus cinco cenários de geração (G0, G1, G2, G3 e G4), sistema equivalente da região Sul do Brasil com e sem redespacho (SUL_C E SUL_S) e o sistema Colombiano 93 barras nos seus três planos de geração (P1,P2 e P3).

Tabela 5-48- Resultado AHCP+ PSO : Todos os Índices: Melhores Resultados Obtidos – Rotas Reduzidas

SISTEMA	IS^{ga}	IS^{gam}	IS^{me}	IS^{mem}	IS^{mcc}	IS^{mccn}	IS^P
Garver_C	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000	110.000
Garver_S	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
IEEE24G0	152.000	152.000	152.000	152.000	152.000	152.000	152.000
IEEE24G1	370.000	370.000	370.000	370.000	370.000	370.000	370.000
IEEE24G2	392.000	392.000	392.000	392.000	392.000	392.000	392.000
IEEE24G3	218.000	218.000	218.000	218.000	330.000	218.000	218.000
IEEE24G4	342.000	378.000	378.000	342.000	376.000	390.000	390.000
SUL_C	70.289	70.289	74.733	70.289	74.733	70.289	70.289
SUL_S	161.827	154.420	161.113	154.420	164.880	161.827	154.420
COL_P1	345.254	345.254	345.254	345.254	345.254	345.254	345.254
COL_P2	443.494	443.494	443.494	443.494	443.494	443.494	443.494
COL_P3	640.339	660.667	674.377	646.847	640.339	641.381	640.339
SUCESSO	9/12	9/12	7/12	10/12	6/12	8/12	9/12

Diante dos resultados apresentados acima, pode-se verificar que de um total de doze sistemas de transmissão avaliados, o índice IS^{me2} foi o que originou os melhores resultados, maior taxa de sucesso, tendo proporcionado a obtenção da solução ótima global em dez sistemas. Ou seja, o índice IS^{me2} originou um conjunto reduzido de rotas mais eficiente, de melhor qualidade quando comparado com os demais .

A Tabela 5-49 apresenta um resumo do percentual de redução, de rotas candidatas, de cada um dos índices aqui abordados e a redução média.

Tabela 5-49- Percentual de Redução de Rotas – Todos os Índices – AHCP.

SISTEMA	IS^{ga1}	IS^{ga2}	IS^{me1}	IS^{me2}	IS^{mcc1}	IS^{mcc2}	IS^P
Garver_C	33%	27%	27%	47%	40%	47%	27%
Garver_S	67%	73%	67%	73%	67%	67%	67%
IEEE24G0	83%	88%	80%	83%	83%	88%	88%
IEEE24G1	44%	66%	7%	54%	68%	71%	61%
IEEE24G2	76%	76%	76%	76%	76%	76%	76%
IEEE24G3	78%	78%	73%	78%	83%	73%	73%
IEEE24G4	41%	66%	49%	63%	73%	76%	73%
SUL_C	77%	50%	84%	81%	77%	76%	77%
SUL_S	58%	53%	73%	69%	29%	39%	58%
COL_P1	95%	92%	97%	96%	96%	95%	95%
COL_P2	88%	88%	89%	90%	90%	89%	90%
COL_P3	82%	81%	90%	87%	84%	84%	86%
MÉDIA	69%	70%	68%	75%	73%	74%	73%

A Tabela 5-50 apresenta de forma sintetizada os resultados obtidos para as simulações do sistema IEEE 24 barras, Sul e Colombiano: tipo de simulação; custo de investimento; a iteração do PSO, a qual foi obtida a solução ótima; tempo total de simulação; e o número de rotas candidatas consideradas em cada simulação.

Tabela 5-50- Resultado dos Índice Propostos - IS^{me2} e IS^P

Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G0				
SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	152.000	38 ^a	280	41
$IS^P + PSO$	152.000(*)	3 ^a	358	05
$IS^{me2} + PSO$	152.000(*)	1 ^a	341	07
Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G1				
SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	444.457	47 ^a	622	41
$IS^P + PSO$	370.000(*)	28 ^a	827	16
$IS^{me2} + PSO$	370.000(*)	17 ^a	842	19

Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G2

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	392.000	46 ^a	631	41
$IS^P + PSO$	392.000(*)	8 ^a	813	10
$IS^{me2} + PSO$	392.000(*)	5 ^a	708	10

Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G3

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	333.000	32 ^a	684	41
$IS^P + PSO$	218.000(*)	8 ^a	788	11
$IS^{me2} + PSO$	218.000(*)	7 ^a	769	09

Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G4

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	456.000	56 ^a	734	41
$IS^P + PSO$	390.000	7 ^a	861	11
$IS^{me2} + PSO$	342.000(*)	23 ^a	884	15

Sistema Sul Equivalente com Redespacho de Geração

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	71.451	53 ^a	740	79
$IS^P + PSO$	70.289(*)	17 ^a	922	18
$IS^{me2} + PSO$	70.289(*)	18 ^a	889	25

Sistema Sul Equivalente sem Redespacho de Geração

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	212.383	70 ^a	788	79
$IS^P + PSO$	154.420(*)	38 ^a	1626	33
$IS^{me2} + PSO$	154.420(*)	31 ^a	1588	24

Sistema Colombiano - Plano P1

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO PSO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
-----------	----------------------------------	--------------------------------	------------------	----------------------------------

PSO	408.467	74 ^a	3180	155
$IS^P + PSO$	345.254	4 ^a	3881	08
$IS^{me2} + PSO$	345.254	3 ^a	3723	07

Sistema Colombiano - Plano P2

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	598.777	99 ^a	3087	155
$IS^P + PSO$	443.494(*)	17 ^a	3988	16
$IS^{me2} + PSO$	443.494(*)	14 ^a	3881	16

Sistema Colombiano - Plano P3

SIMULAÇÃO	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÃO (Solução Ótima)	TEMPO (s)	NÚMERO DE ROTAS CANDIDATAS
PSO	854.514	100 ^a	3202	155
$IS^P + PSO$	640.339	8 ^a	3883	21
$IS^{me2} + PSO$	640.339	17 ^a	3978	20

(*) solução ótima difundida na literatura.

Conforme exposto na Tabela 5-50, verifica-se a eficiência da metodologia proposta destacando a segunda e a terceira simulação, a qual fazem uso do conjunto reduzido de rotas oriundo do AHCP pelos índices IS^P e IS^{me2} , respectivamente.

Os resultados encontrados mostraram-se satisfatórios, visto que para todos os sistemas considerados foram obtidas soluções de boa qualidade quando comparadas com a literatura especializada. Assim, a heurística proposta se apresentou como uma estratégia interessante na redução do espaço de busca, composto pelo número de rotas candidatas à expansão. Destaca-se que independente do processo de busca multimodal a ser utilizado, e desde que tenha qualidade, essa redução é relevante, pois aumenta a eficiência do processo de busca multimodal.

O tempo de processamento do algoritmo heurístico proposto é reduzido quando comparado com o esforço computacional do processo de otimização multimodal, o que justifica fortemente sua utilização devido ao potencial de ganhos obtidos.

5.6 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

O programa computacional desenvolvido neste trabalho 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.

5.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

O presente capítulo apresentou os resultados obtidos pela metodologia proposta, para redução de rotas candidatas a expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, através da simulação de doze sistemas amplamente difundidos na literatura especializada.

Todos os índices de sensibilidade propostos foram analisados, porém optou-se em dar maior ênfase na apresentação dos resultados obtidos pelo índice baseado no portfólio por ser um proposta inédita. Para cada um dos índices de sensibilidade foi obtido um conjunto de rotas reduzidas de expansão e esse conjunto repassado ao PSO para a obtenção do planejamento final da expansão dos sistemas de transmissão em análise.

Diante dos resultados apresentados pode-se verificar que o índice IS^{me2} foi o que proporcionou os melhores resultados. Ou seja, foi o índice que originou os conjuntos reduzidos de rotas mais eficientes quando comparado com os demais. Entretanto, se o foco for a análise dos resultados das simulações de sistemas reais de transmissão (Sistema Sul e Colombiano) têm-se um empate entre os índices: IS^{me2} , IS^{ga2} e IS^P . Das cinco simulações envolvendo os sistemas Sul e Colombiano, os índices mencionados agregados a metodologia proposta para redução de rotas candidatas proporcionaram um taxa de acerto de 60%. Ou seja, das cinco simulações realizadas, em três simulações foram obtidos os resultados ótimos divulgados na literatura.

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. Diante destes resultados pode se concluir que a combinação da técnica de otimização bioinspirada e as informações advindas do AHCP são promissoras e importante para qualquer método empregado para resolução do problema em estudo.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Nesta tese foi proposta uma nova estratégia de redução do espaço de busca para a resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tanto, foi utilizado um algoritmo heurístico construtivo, sendo propostos sete índices de sensibilidade. A metodologia proposta pode ser dividida em duas etapas.

Na primeira utilizou-se um algoritmo heurístico construtivo, onde a variável decisão de expansão é mitigada pela função tangente hiperbólica modificada, sendo esta introduzida ao modelo de fluxo de carga CC através da metodologia primal-dual de pontos interiores. Esta primeira etapa tem como objetivo, através da variação da inclinação da função tangente hiperbólica e de uma análise de sensibilidade, determinar um conjunto reduzido de rotas candidatas à expansão e assim, diminuir de maneira eficiente o espaço de busca. Já na segunda etapa, um processo de otimização multimodal PSO faz uso do conjunto de rotas selecionadas na primeira etapa do algoritmo heurístico construtivo de modo a melhorar a eficiência do processo de busca.

Apesar dos bons resultados obtidos pela estratégia proposta, como toda metodologia heurística ou metaheurística, não há como garantir a otimalidade e sim a viabilidade das soluções encontradas.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A seguir 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 verificação da influência destas no problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica;

- Utilização de novos/outros índices de sensibilidade;
- 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;
- Analisar o problema em questão considerando múltiplos cenários de geração e carga;
- Implementação computacional de algoritmos bioinspirado mais recentes;
- A inclusão de restrições de segurança no planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica;
- Modelo CA de fluxo de carga no problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica;
- Utilizar a soluções do AHCP para inicialização do PSO;
- A cada etapa, avaliar as configurações com os reforços nos ramos com os melhores índices e selecionar o reforço que propiciar a melhor configuração(construção "determinística");
- Criar uma distribuição de probabilidades dos índices de cada ramo candidato e realizar um sorteio para definir o ramo a ser reforçado. Realizar repetições do processo construtivo, gerando diversas soluções e obtendo um número maior de rotas candidatas.

APÊNDICE A

Dados dos Sistemas de Transmissão de Energia

Considerações Iniciais

Neste apêndice são apresentados os dados dos sistemas elétricos de potência utilizados neste trabalho 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.1 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.2 Sistema IEEE-24 Barras

Níveis de Geração e Carga							
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração - G0 (MW)	Geração - G1 (MW)	Geração - G2 (MW)	Geração - G3 (MW)	Geração - G4 (MW)	Carga (MW)
1	576	576	576	465	576	520	324
2	576	576	576	576	576	520	291
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	540
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	222
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	213
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	408
7	900	900	900	722	900	812	375
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	513
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	525
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	585
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	1773	1773	1773	1424	1457	1599	795
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	582
15	645	645	645	645	325	581	951
16	465	465	465	465	282	419	300
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	1200	1200	1200	1200	603	718	999
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	543
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	384
21	1200	1200	1200	1200	951	1077	0.0
22	900	900	900	900	900	900	0.0

Níveis de Geração e Carga							
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração - G0 (MW)	Geração - G1 (MW)	Geração - G2 (MW)	Geração - G3 (MW)	Geração - G4 (MW)	Carga (MW)
23	1980	1980	315	953	1980	1404	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Circuitos existentes na topologia base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-2	1	1.39	175
1-3	1	21.12	175
1-5	1	8.45	175
2-4	1	12.67	175
2-6	1	19.20	175
3-9	1	11.90	175
3-24	2	8.39	400
4-9	2	10.37	175
5-10	1	8.83	175
6-10	2	6.05	175
7-8	2	6.14	175
8-9	2	16.51	175
8-10	1	16.51	175
9-11	1	8.39	400
9-12	1	8.39	400
10-11	1	8.39	400
10-12	1	8.39	400
11-13	1	4.76	500
11-14	1	4.18	500
12-13	1	4.76	500
12-23	1	9.66	500
13-23	1	8.65	500
14-16	1	3.89	500
15-16	1	1.73	500
15-21	2	4.90	500
15-24	1	5.19	500
16-17	1	2.59	500
16-19	1	2.31	500
17-18	1	1.44	500
17-22	1	10.53	500
18-21	2	2.59	500
19-20	2	3.96	500
20-23	2	2.16	500
21-22	1	6.78	500

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
1-8	13.44	500	35
2-8	12.67	500	33
6-7	19.20	500	50
13-14	4.47	500	62
14-23	6.20	500	86
16-23	8.22	500	114
19-23	6.06	500	84
1-2	1.39	175	3
1-3	21.12	175	55
1-5	8.45	175	22
2-4	12.67	175	33
2-6	19.20	175	50
3-9	11.90	175	31
3-24	8.39	400	50
4-9	10.37	175	27
5-10	8.83	175	23
6-10	6.05	175	16
7-8	6.14	175	16
8-9	16.51	175	43
8-10	16.51	175	43
9-11	8.39	400	50
9-12	8.39	400	50
10-11	8.39	400	50
10-12	8.39	400	50
11-13	4.76	500	66
11-14	4.18	500	58
12-13	4.76	500	66
12-23	9.66	500	134
13-23	8.65	500	120
14-16	3.89	500	54
15-16	1.73	500	24
15-21	4.90	500	68
15-24	5.19	500	72
16-17	2.59	500	36
16-19	2.31	500	32
17-18	1.44	500	20
17-22	10.53	500	146
18-21	2.59	500	36
19-20	3.96	500	55
20-23	2.16	500	30
21-22	6.78	500	94

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
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
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

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
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
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

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
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
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

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 Colombiano P1

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
1	240	0,0
2	0,0	352,90
3	0,0	393,00
4	0,0	0,0
5	40	235,00
6	34	0,0
7	0,0	300,00
8	100	339,00
9	0,0	348,00
10	0,0	60,00
11	80	147,00
12	47	0,0
13	0,0	174,00
14	0,0	0,0
15	0,0	377,00
16	0,0	236,00
17	35	136,00

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração(MW)	Carga (MW)
18	480	36,20
19	900	19,60
20	0,0	202,40
21	0,0	186,00
22	200	53,00
23	0,0	203,00
29	618	339,00
30	0,0	137,00
31	189	234,00
32	0,0	126,00
33	0,0	165,00
34	0,0	77,50
35	200	172,00
36	0,0	112,00
37	138	118,00
38	0,0	86,00
39	0,0	180,00
40	305	0,0
41	70	54,80
42	0,0	102,00
43	0,0	35,40
44	23	257,00
45	950	0,0
64	0,0	88,00
65	0,0	132,00
66	200	0,0
67	474	266,00
68	0,0	0,0
69	0,0	71,40
70	30	0,0
71	0,0	315,00
72	0,0	0,0
73	0,0	0,0
74	0,0	0,0
75	0,0	0,0
76	40	0,0
77	0,0	55,00
78	0,0	36,65
79	0,0	98,00
80	0,0	60,00
81	0,0	0,0
82	0,0	0,0
83	0,0	0,0
84	0,0	0,0
85	0,0	0,0

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
86	0,0	0,0
87	0,0	0,0
88	0,0	0,0
89	0,0	0,0
90	0,0	0,0
91	0,0	0,0
92	0,0	0,0
93	0,0	0,0

A.5 Sistema Colombiano P2

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
1	240	0,0
2	165	406,53
3	0,0	490,50
4	0,0	0,0
5	40	293,56
6	34	0,0
7	0,0	374,26
8	230	423,00
9	0,0	434,12
10	0,0	74,21
11	108	183,90
12	47	0,0
13	0,0	217,26
14	0,0	0,0
15	0,0	470,17
16	0,0	294,00
17	35	169,57
18	540	45,20
19	1,340	24,46
20	0,0	252,50
21	0,0	231,70
22	200	66,13
23	0,0	252,50
24	150	0,0
25	86	0,0
26	70	0,0
27	0,0	331,40
28	0,0	406,30
29	618	422,60

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração(MW)	Carga (MW)
30	0,0	166,70
31	189	327,30
32	0,0	157,30
33	0,0	206,53
34	0,0	96,70
35	200	214,60
36	0,0	140,00
37	138	147,30
38	15	108,40
39	0,0	224,00
40	305	0,0
41	100	68,40
42	0,0	127,30
43	0,0	44,20
44	23	321,30
45	1,208	0,0
46	150	151,70
47	0,0	51,50
48	885	750,00
49	0,0	162,00
50	240	528,00
51	0,0	159,00
52	0,0	46,50
53	320	0,0
54	0,0	95,30
55	40	279,00
56	0,0	0,0
57	130	281,00
58	190	0,0
59	160	0,0
60	1,216	0,0
61	155	0,0
62	0,0	0,0
63	1,090	44,00
64	0,0	110,55
65	0,0	165,00
66	300	0,0
67	474	332,45
68	0,0	0,0
69	0,0	89,00
70	180	0,0
71	211	393,00
72	0,0	0,0
73	0,0	0,0
74	0,0	0,0

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
75	0,0	0,0
76	40	0,0
77	0,0	70,00
78	0,0	45,10
79	0,0	123,00
80	0,0	72,00
81	0,0	0,0
82	0,0	0,0
83	0,0	0,0
84	0,0	0,0
85	0,0	0,0
86	300,0	0,0
87	0,0	0,0
88	0,0	0,0
89	0,0	0,0
90	0,0	0,0
91	0,0	0,0
92	0,0	0,0
93	0,0	0,0

A.6 Sistema Colombiano P3

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
1	240	0,0
2	165	486,66
3	0,0	587,08
4	0,0	0,0
5	40	351,42
6	34	0,0
7	136	448,03
8	230	505,87
9	0,0	519,69
10	0,0	88,84
11	108	220,15
12	47	0,0
13	0,0	260,08
14	0,0	0,0
15	0,0	562,84
16	0,0	351,90
17	35	203,00
18	540	54,10

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração(MW)	Carga (MW)
19	1,340	29,28
20	45	302,27
21	0,0	277,44
22	200	79,17
23	0,0	302,27
24	150	0,0
25	86	0,0
26	70	0,0
27	0,0	396,71
28	14,0	486,39
29	618	505,96
30	0,0	199,5
31	189	391,88
32	0,0	188,33
33	0,0	247,24
34	0,0	115,81
35	200	256,86
36	44	167,29
37	138	176,30
38	15	129,72
39	15	268,19
40	305	0,0
41	100	81,85
42	0,0	152,39
43	0,0	52,90
44	23	384,64
45	1,208	0,0
46	150	151,70
47	0,0	51,50
48	885	896,26
49	0,0	193,27
50	240	632,75
51	0,0	190,45
52	0,0	55,60
53	320	0,0
54	0,0	114,19
55	40	333,59
56	0,0	0,0
57	130	336,94
58	190	0,0
59	160	0,0
60	1,216	0,0
61	155	0,0
62	0,0	0,0
63	1,090	52,77

Níveis de Geração e Carga		
Barra de Geração	Geração (MW)	Carga (MW)
64	280	132,35
65	0,0	197,58
66	300	0,0
67	474	397,98
68	0,0	0,0
69	0,0	106,61
70	180	0,0
71	424	471,21
72	0,0	0,0
73	0,0	0,0
74	0,0	0,0
75	0,0	0,0
76	40	0,0
77	0,0	82,85
78	0,0	54,07
79	300	146,87
80	0,0	88,34
81	0,0	0,0
82	0,0	0,0
83	0,0	0,0
84	500	0,0
85	0,0	0,0
86	850	0,0
87	0,0	0,0
88	300	0,0
89	0,0	0,0
90	0,0	0,0
91	0,0	0,0
92	0,0	0,0
93	0,0	0,0

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
25-28	1	5,65	320
25-29	1	5,70	320
13-14	2	0,09	350
13-20	1	1,78	350
13-23	1	2,77	350
14-31	2	13,07	250
14-18	2	14,94	250
14-60	2	10,67	300
2-4	2	2,71	350
2-9	1	1,22	350

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
2-83	1	2,00	570
9-83	1	2,00	400
15-18	1	3,65	450
15-17	1	4,83	320
15-20	1	5,13	320
15-76	1	4,14	320
15-24	1	1,45	350
37-61	1	1,39	350
19-61	2	11,05	250
61-68	1	7,89	250
37-68	1	5,44	320
40-68	1	13,20	320
12-75	1	6,41	320
24-75	1	1,61	350
35-36	1	20,74	250
27-35	1	14,98	250
35-44	2	13,58	250
38-68	1	3,89	350
38-39	1	3,00	350
27-80	1	2,42	350
44-80	1	10,14	250
56-81	1	1,14	550
45-54	1	9,46	320
45-50	2	0,70	350
10-78	1	1,02	350
7-78	1	0,43	350
30-64	1	15,33	250
30-65	1	9,10	250
30-72	2	1,73	350
55-57	1	1,74	600
57-84	1	0,87	600
55-84	1	0,87	600
56-57	1	2,40	600
9-77	1	1,90	350
77-79	1	0,97	350
1-59	2	2,32	350
59-67	2	11,80	250
8-59	2	10,56	250
1-3	1	10,40	250
3-71	1	1,36	450
3-6	1	4,97	350
55-62	1	2,81	550
47-52	1	6,44	350
51-52	1	8,59	250
29-31	2	10,42	250
41-42	1	0,94	350

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
40-42	1	1,53	350
46-53	2	10,41	250
46-51	1	11,41	250
69-70	2	2,28	350
66-69	2	12,17	250
9-69	2	10,98	350
60-69	2	9,06	350
31-32	1	2,59	350
32-34	1	5,40	350
16-18	1	6,25	350
16-23	1	2,38	350
16-21	1	2,82	350
31-34	1	7,92	250
31-33	2	2,48	350
31-60	2	19,44	250
31-72	2	2,44	350
47-54	2	10,03	250
47-49	2	9,42	250
18-58	2	2,12	350
18-20	1	5,04	350
18-66	2	6,64	350
18-21	1	3,48	350
18-22	1	2,09	350
19-22	1	6,91	350
4-5	3	0,49	350
5-6	2	0,74	350
17-23	1	9,13	250
17-76	1	0,20	350
12-17	1	0,86	350
1-71	2	8,41	250
1-8	1	8,10	250
1-11	1	7,99	250
4-36	2	8,50	250
19-58	1	8,26	320
27-64	1	2,80	350
27-28	1	2,38	350
27-44	1	8,93	250
26-27	1	6,57	350
27-29	1	1,66	350
19-66	1	5,16	350
73-74	1	2,14	600
64-65	1	7,41	350
29-64	1	0,63	350
4-34	2	10,16	270
34-70	2	4,15	350
33-34	1	11,39	320
8-71	1	0,75	400

Circuitos Existentes na Topologia Base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
54-63	3	4,95	320
48-63	1	2,38	350
67-68	2	16,60	250
39-68	1	1,45	350
8-9	1	1,68	350
79-87	1	0,71	350
8-87	1	1,32	350
39-43	1	11,63	250
41-43	1	11,42	250
23-24	1	2,55	350
21-22	1	5,49	350
26-28	1	5,12	350
28-29	1	2,81	350
6-10	1	3,37	350
33-72	1	2,28	350
39-40	2	10,20	250
12-76	1	0,81	350
48-54	3	3,96	350
50-54	2	8,76	250
62-73	1	2,72	750
49-53	2	10,08	250
40-41	1	1,86	350
45-81	1	2,67	450
64-74	1	2,67	500
54-56	3	2,67	450
60-62	3	2,57	450
72-73	2	2,67	500
19-82	1	2,67	450
55-82	1	2,90	550
83-85	2	2,67	450
82-85	1	3,41	700
19-86	1	15,13	300
68-86	1	4,04	350
7-90	2	0,50	350
3-90	1	0,74	350
90-91	1	2,67	550
85-91	1	1,39	600
11-92	1	2,67	450
1-93	1	2,67	450
92-93	1	0,97	600
91-92	1	0,88	600

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
52-88	9,80	300	34,190
43-88	18,16	250	39,56
57-81	2,19	550	58,89
73-82	3,74	550	97,96
27-89	2,67	450	13,27
74-89	0,34	550	14,57
73-89	2,46	550	66,65
79-83	4,57	350	15,40
8-67	22,40	250	29,20
39-86	5,45	350	9,88
25-28	5,65	320	9,767
25-29	5,70	320	9,88
13-14	0,09	350	3,90
13-20	1,78	350	5,742
13-23	2,77	350	7,007
14-31	13,07	250	18,622
14-18	14,94	250	20,232
14-60	10,67	300	15,977
2-4	2,71	350	6,662
2-9	1,22	350	5,282
2-83	2,00	570	5,972
9-83	2,00	400	5,972
15-18	3,65	450	7,927
15-17	4,83	320	9,422
15-20	5,13	320	9,652
15-76	4,14	320	9,882
15-24	1,45	350	5,282
37-61	1,39	350	4,937
19-61	11,05	250	16,092
61-68	7,89	250	12,412
37-68	5,44	320	9,652
40-68	13,20	320	18,162
12-75	6,41	320	11,492
24-75	1,61	350	5,512
35-36	20,74	250	27,362
27-35	14,98	250	22,072
35-44	13,58	250	20,347
38-68	3,89	350	7,927
38-39	3,00	350	6,317
27-80	2,42	350	7,007
44-80	10,14	250	17,587
56-81	1,14	550	32,858
45-54	9,46	320	13,562
45-50	0,70	350	4,362

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
10-78	1,02	350	4,937
7-78	0,43	350	4,132
30-64	15,33	250	20,577
30-65	9,10	250	13,677
30-72	1,73	350	5,512
55-57	1,74	600	46,808
57-84	0,87	600	26,658
55-84	0,87	600	26,658
56-57	2,40	600	62,618
9-77	1,90	350	5,857
77-79	0,97	350	5,167
1-59	2,32	350	6,202
59-67	11,80	250	16,667
8-59	10,56	250	15,402
1-3	10,40	250	15,862
3-71	1,36	450	5,167
3-6	4,97	350	9,422
55-62	2,81	550	70,988
47-52	6,44	350	10,572
51-52	8,59	250	12,872
29-31	10,42	250	32,981
41-42	0,94	350	4,707
40-42	1,53	350	5,167
46-53	10,41	250	14,597
46-51	11,41	250	16,322
69-70	2,28	350	6,202
66-69	12,17	250	17,127
9-69	10,98	350	15,747
60-69	9,06	350	13,677
31-32	2,59	350	6,547
32-34	5,40	350	9,767
16-18	6,25	350	10,917
16-23	2,38	350	6,892
16-21	2,82	350	6,892
31-34	7,92	250	12,412
31-33	2,48	350	6,432
31-60	19,44	250	25,982
31-72	2,44	350	6,317
47-54	10,03	250	14,252
47-49	9,42	250	13,562
18-58	2,12	350	5,742
18-20	5,04	350	9,537
18-66	6,64	350	11,377
18-21	3,48	350	7,467
18-22	2,09	350	6,432

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
4-5	0,49	350	4,247
5-6	0,74	350	4,477
17-23	9,13	250	12,987
17-76	0,20	350	3,902
12-17	0,86	350	4,707
1-71	8,41	250	14,367
1-8	8,10	250	13,217
1-11	7,99	250	12,527
4-36	8,50	250	13,562
19-58	8,26	320	11,722
27-64	2,80	350	6,777
27-28	2,38	350	6,202
27-44	8,93	250	16,322
26-27	6,57	350	10,917
27-29	1,66	350	5,052
19-66	5,16	350	9,307
73-74	2,14	600	58,278
64-65	7,41	350	11,837
29-64	0,63	350	4,362
4-34	10,16	270	14,942
34-70	4,15	350	8,272
33-34	11,39	320	16,322
8-71	0,75	400	4,477
54-63	4,95	320	9,077
48-63	2,38	350	6,317
67-68	16,60	250	22,072
39-68	1,45	350	5,282
8-9	1,68	350	5,972
79-87	0,71	350	4,477
8-87	1,32	350	5,167
39-43	11,63	250	16,552
41-43	11,42	250	16,322
23-24	2,55	350	6,317
21-22	05,49	350	9,882
26-28	05,12	350	9,307
28-29	2,81	350	6,777
6-10	3,37	350	7,582
33-72	2,28	350	6,202
39-40	10,20	250	16,207
12-76	0,81	350	4,707
48-54	3,96	350	8,042
50-54	8,76	250	12,872
62-73	2,72	750	73,158
49-53	10,08	250	14,252
40-41	1,86	350	5,742

Circuitos Candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento Cost (milhões de dólares)
40-41	1,86	350	5,742
45-81	2,67	450	13,270
64-74	2,67	500	13,270
54-56	2,67	450	13,270
60-62	2,57	450	13,270
72-73	2,67	500	13,270
19-82	2,67	450	13,270
55-82	2,90	550	77,498
62-82	1,01	600	30,998
83-85	2,67	450	13,270
82-85	3,41	700	89,898
19-86	15,13	300	20,922
68-86	4,04	350	8,272
7-90	0,50	350	4,247
3-90	0,74	350	4,592
90-91	2,67	550	13,270
85-91	1,39	600	40,298
11-92	2,67	450	13,270
1-93	2,67	450	13,270
92-93	0,97	600	30,068
91-92	00,88	600	27,588

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] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, and A. Villegas, “Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 938–946, May 2003.
- [3] L. L. Garver, “Transmission Network Estimation Using Linear Programming,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688–1697, Sep. 1970.
- [4] A. Monticelli, A. Santos, M. V. Pereira, S. H. Cunha, B. J. Parker, and J. C. . Praca, “Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3919–3925, Oct. 1982.
- [5] R. Villasana, L. L. Garver, and S. J. Salon, “Transmission Network Planning Using Linear Programming,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 2, pp. 349–356, Feb. 1985.
- [6] M. V. Pereira and 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, no. 2, pp. 381–389, Feb. 1985.
- [7] I. C. Silva Junior, “Planejamento Estático Da Expansão De Sistemas De Transmissão Utilizando Um Novo Algoritmo Heurístico Construtivo”, Dissertação, UFJF, 2003.
- [8] A. S. Resende, “Particle Swarm Optimization Aplicada ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão,” Tese, UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- [9] P. V. Gomes and J. T. Saraiva, “Static transmission expansion planning using Heuristic and metaheuristic techniques,” in *PowerTech, IEEE Eindhoven*, 2015, pp. 1–6.
- [10] E. J. de Oliveira, I. C. Da Silva, J. L. . Pereira, and S. Carneiro, “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1616–1621, Aug. 2005.
- [11] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, and S. Granville, “A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion”, *IEEE Transaction ons Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 560–565, Agosto 2001.

- [12] S. Binato, M. V. Pereira, and S. Granville, "A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 235–240, May 2001.
- [13] M. O. Buygi, G. Balzer, H. M. Shanechi, and M. Shahidehpour, "Market-Based Transmission Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2060–2067, Nov. 2004.
- [14] I. de J Silva, M. J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia, and C. A. Murari, "Transmission Network Expansion Planning With Security Constraints," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 152, no. 6, pp. 828–836, Nov. 2005.
- [15] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "Transmission System Expansion Planning by a Branch-and-Bound Algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 90–99, Jan. 2008.
- [16] B. Dewani, M. B. Daigavane, and A. S. Zadgaonkar, "A Review of Various Computational Intelligence Techniques for Transmission Network Expansion Planning," *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Karnataka, India 2012*, pp. 1–5.
- [17] S. P. Torres and C. A. Castro, "Parallel Particle Swarm Optimization Applied to the Static Transmission Expansion Planning Problem," in *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, Orlando, 2012*, pp. 1–6.
- [18] C. Rathore, R. Roy, S. Raj, and A. K. Sinha, "Mosquitoes-Behaviour Based (MOX) Evolutionary Algorithm in Static Transmission Network Expansion Planning" *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2013, Nagercoil, India*, pp. 1006–1011.
- [19] C. Rathore, R. Roy, U. Sharma, and J. Patel, "Artificial Bee Colony Algorithm based static transmission expansion planning," *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability , 2013, Nagercoil, India*, pp. 1126–1131.
- [20] G. A. Orfanos, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatziargyriou, "A Recursive Harmony Search Algorithm for Security Constrained Transmission Expansion Planning," in *PowerTech IEEE Grenoble, 2013*, pp. 1–6.
- [21] S. Arora and S. Singh, "A Conceptual Comparison of Firefly Algorithm, Bat Algorithm and Cuckoo Search, " *International Conference on Control Computing Communication Materials*", Allahabad, India 2013, pp. 1–4.
- [22] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, "Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 364–369, Feb. 1996.

- [23] R. A. Gallego, A. B. Alves, A. Monticelli, and R. Romero, "Parallel Simulated Annealing Applied to Long Term Transmission Network Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 181–188, Feb. 1997.
- [24] A. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, L. M. Honório, and L. A. F. Manso, "Performance Comparison of Metaheuristics to Solve the Multi-Stage Transmission Expansion Planning Problem," *IET Generation Transmission Distribution*, vol. 5, no. 3, pp. 360–367, Mar. 2011.
- [25] Y. P. Dusonchet and A. El-Abiad, "Transmission Planning Using Discrete Dynamic Optimizing," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 4, pp. 1358–1371, Jul. 1973.
- [26] A. El-Abiad and Y. Dusonchet, "Discrete Optimization and the Planning of Electric Power Networks," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 20, no. 3, pp. 230–238, May 1973.
- [27] R. Hemmati, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Comprehensive Review of Generation and Transmission Expansion Planning," *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 7, no. 9, pp. 955–964, Sep. 2013.
- [28] A. M. Leite da Silva, L. A. F. Manso, W. S. Sales, S. A. Flavio, G. J. Anders, and L. C. de Resende, "Chronological Power Flow for Planning Transmission Systems Considering Intermittent Sources," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2314–2322, Nov. 2012.
- [29] J. Aghaei, N. Amjady, A. Baharvandi, and M.-A. Akbari, "Generation and Transmission Expansion Planning: MILP-Based Probabilistic Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1592–1601, Jul. 2014.
- [30] B. Alizadeh and S. Jadid, "A Dynamic Model for Coordination of Generation and Transmission Expansion Planning in Power Systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 65, Feb 2015, pp. 408–418.
- [31] A. S. Sousa and E. N. Asada, "Long-Term Transmission System Expansion Planning With Multi-Objective Evolutionary Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 149–156, Feb. 2015.
- [32] S.P. Torres and C. A. Castro, "Specialized Differential Evolution Technique to Solve the Alternating Current Model Based Transmission Expansion Planning Problem," *Electric Power Energy Systems*, vol. 68 (2015), pp. 243–251, Jan. 2015.
- [33] M. Rahmani, R. Romero, and M. J. Rider, "Strategies to Reduce the Number of Variables and the Combinatorial Search Space of the Multistage Transmission Expansion Planning Problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2164–2173, 2013.

- [34] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, 2ed. Edgard Blucher.
- [35] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, “Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 149, no. 1, pp. 27–36, Jan. 2002.
- [36] R. Romero, *Análise Crítica de Algoritmos Heurísticos Construtivos Usados no Planejamento a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão*. Relatório: DEE-FEIS-UNESP, Ilha Solteira, 1999.
- [37] R. Romero and C. Rocha, “Planificación de Sistemas de Transmisión Usando un Algoritmo Heurístico Constructivo,” *XII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica*, Temuco, Chile 1997.
- [38] J. Kennedy, R. Eberhart, , “Particle Swarm Optimization,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942 – 1948, New Jersey, USA 1995.
- [39] F. Heppner, U. Grenander, “A Stochastic Nonlinear Model for Coordinated Bird Flocks,” vol. *The Ubiquity of Chaos*, AAAS Publications, Washington DC, 1990.
- [40] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*: 2ed. Luniver Press, 2010.
- [41] C. E. Sacramento, “Planejamento Dinâmico da Expansão dos Sistemas de Subtransmissão Através de Metaheurísticas.” Tese, UNIFEI, 2007.
- [42] E. R. C. Viveros, “Ajuste Coordenado de Controladores de Sistemas de Potência Usando Metaheurísticas,” Tese, UFRJ-COPPE, 2007.
- [43] M. A. Abido, “Optimal Design of Power-System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*,, vol. 17, no. 3, pp. 406–413, Setembro 2002.
- [44] D. Kavitha and K. S. Swarup, “Transmission Expansion Planning Using LP-Based Particle Swarm Optimization,” in *2006 New Delhi, IEEE Power India Conference*.
- [45] P. Ren, L.-Q. Gao, N. Li, Y. Li, and Z.-L. Lin, “Transmission Network Optimal Planning Using the Particle Swarm Optimization Method,” *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2005, *Guangzhou, China*, p. 4006–4011 Vol. 7.
- [46] S. P. Torres, C. A. Castro, R. M. Pringles, and W. Guaman, “Comparison of Particle Swarm Based Meta-Heuristics for the Electric Transmission Network Expansion Planning Problem,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit Michigan 2011*, pp. 1–7.
- [47] M. C. S. Oliveira, T. L. Silva, and D. J. Aloise, “Otimização por Nuvem de Partículas: Diferença entre Aplicações a Problemas Contínuos e Discretos.” no. XXXVI-SBPO, 2015, São João Del Rei.

- [48] M. A. Khanesar, M. Teshnehlab, and M. A. Shoorehdeli, "A novel binary particle swarm optimization," in *Mediterranean Conference Control Automation Athens, Greece 2007*, pp. 1–6.
- [49] I. M. Mendonça, I. C. S. Junior, and A. L. M. Marcato, "Static Planning of the Expansion of Electrical Energy Transmission Systems Using Particle Swarm Optimization," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 60, pp. 234–244, Sep. 2014.
- [50] A. Verma, B. K. Panigrahi, and P. R. Bijwe, "Transmission Network Expansion Planning with Adaptive Particle Swarm Optimization," in *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, Coimbatore, India 2009*, pp. 1099–1104.
- [51] M. Eghbal, T. K. Saha, and K. N. Hasan, "Transmission Expansion Planning by Meta-Heuristic Techniques: A Comparison of Shuffled Frog Leaping Algorithm, PSO and GA," *IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan 2011*, pp. 1–8.
- [52] D. P. Cristian, R. Teslovan, C. Barbulescu, S. Kilyeni, and A. Simo, "PSO Based OPF Algorithm," *IEEE EUROCON, Zagreb, Croatia 2013*, pp. 1235–1243.
- [53] A. Simo, C. Barbulescu, S. Kilyeni, and A. Deacu, "PSO Based Transmission Network Expansion Planning," *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Beirut, Lebanon 2014*, pp. 520–525.
- [54] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 136–146, Fevereiro 1994.
- [55] I. M. Mendonça, "Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão De Energia Elétrica Utilizando Otimização por Enxame de Partículas." Dissertação de Mestrado, UFJF, Agosto-2012.
- [56] M. Cortes-Carmona, R. Palma-Behnke, and O. Moya, "Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm" *International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba Brasil 2009*, pp. 1–7.
- [57] H. Mori and K. Shimomugi, "Transmission Network Expansion Planning with Scatter Search," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Montreal Canada 2007*. pp. 3749–3754.
- [58] P. Limsakul, S. Pothiya, and N. Leeprechanon, "Application of Ant Colony Optimization to Transmission Network Expansion Planning with Security Constraint," *International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, China. 2009*, pp. 1–6.
- [59] R. Romero, C. Rocha, J. R. S. Mantovani, and I. G. Sanchez, "Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning,"

Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceeding-, vol. 152, no. 2, pp. 277–282, Mar. 2005.

[60] G. A. Orfanos, A. G. Anastopoulou, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatziargyriou, “Static Transmission Expansion Planning Under an Improved Harmony Search Algorithm,” in *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Cagliari, Italy* 2012, pp. 1–6.

[61] I. G. Sanchez, R. Romero, J. R. S. Mantovani, and M. J. Rider, “Transmission Expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear-Programming Technique,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 152, no. 6, pp. 763–769, Nov. 2005.

[62] A. A. Lima, “Análise e Implementação de um Algoritmo de Busca Dispersa para o Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão”, Dissertação UNESP, Oct-2012.

[63] A. S. Sousa and E. N. Asada, “A Heuristic Method Based on the Branch and Cut Algorithm to the Transmission System Expansion Planning Problem,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–6.

[64] R. Romero and A. Monticelli, “A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 373–380, Fevereiro 1994.

[65] S. Binato, “Expansão Ótima de Sistemas de transmissão Através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes,” Tese, UFRJ-COPPE, 2000.

[66] S. Binato, G. C. de Oliveira, and J. L. de Araujo, “A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 247–253, May 2001.

[67] R. Romero, C. Rocha, M. Mantovani, and J. R. S. Mantovani, “Analysis of Heuristic Algorithms for the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network Expansion Systems,” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 150, no. 5, pp. 521–526, Sep. 2003.