

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Patrícia Silva Neves

EXPANSÃO ESTÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA VIA FPA

Juiz de Fora

2017

Patrícia Silva Neves

**EXPANSÃO ESTÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA VIA FPA**

Dissertação submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

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

Coorientador: Bruno Henriques Dias, D. Sc.

Juiz de Fora

2017

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

Neves, Patrícia Silva.

Expansão estática de sistemas de transmissão de energia elétrica via FPA / Patrícia Silva Neves. -- 2017.

107 f. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Junior

Coorientador: Bruno Henriques Dias

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

1. Planejamento da Expansão da Transmissão. 2. Algoritmos Bioinspirados. 3. Flower Pollination Algorithm. 4. Algoritmo Heurístico Construtivo. 5. Otimização. I. Silva Junior, Ivo Chaves da, orient. II. Dias, Bruno Henriques, coorient. III. Título.

Patrícia Silva Neves

**EXPANSÃO ESTÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA VIA FPA**

Dissertação submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia.

Aprovada em 31 de Agosto de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D.Sc. - Orientador – UFJF

Prof. Bruno Henriques Dias, D.Sc. – Coorientador - UFJF

Prof. Edmarcio Antônio Belati, D.Sc. – UFABC

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc. – UFJF

Aos meus pais e irmãos.

Agradecimentos

Aos Professores Ivo Chaves da Silva Júnior e Bruno Henriques Dias pela excelente orientação, pelos conselhos e toda dedicação e incentivo demonstrados ao longo destes anos de trabalho.

Aos meus pais, Glória e Geraldo, e aos meus irmãos, Eduardo, Ana Paula, Marcelo e Edilene, que sempre estiveram ao meu lado e nunca mediram esforços para que eu concluísse mais esta etapa.

Ao meu namorado Saulo por todo amor, carinho e compreensão demonstrados nos momentos mais difíceis.

Ao LABSPOT – Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFJF – pela disponibilidade de utilização de recursos computacionais.

A todos os professores e amigos do mestrado que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À CAPES e à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

Em especial agradeço a todos os meus amigos e familiares que demonstraram compreensão e incentivo durante toda a realização do curso de pós-graduação.

“Obstáculo é aquilo que você enxerga quando tira os olhos do seu objetivo.”

(Henry Ford)

Resumo

O presente trabalho apresenta a aplicação conjunta de uma técnica de otimização bioinspirada e de um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) na resolução do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. O algoritmo bioinspirado utilizado é uma versão modificada do *Flower Pollination Algorithm* (FPA), no qual foi introduzido o operador de seleção clonal, oriundo do Algoritmo de Seleção Clonal (CLONALG), com o objetivo de potencializar o processo de busca local do FPA. A versão modificada proposta neste trabalho foi nomeada de *Clonal Flower Pollination Algorithm* (CFPA). O CFPA realiza a otimização da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, determinando, entre um conjunto de linhas (circuitos) de transmissão previamente definidas, quais devem ser construídas de modo a minimizar os custos de investimento e de operação do sistema elétrico, suprindo a demanda prevista para um dado horizonte de planejamento. De modo a aumentar a eficiência do processo de busca pelo CFPA, fez-se o uso de informações provenientes de um Algoritmo Heurístico Construtivo. Tais informações heurísticas são utilizadas na inicialização do CFPA e também na seleção de um conjunto reduzido das rotas mais relevantes à expansão, reduzindo o espaço de busca. Para aferir os resultados da metodologia proposta foram simulados os sistemas Garver, IEEE 24 Barras e o equivalente da região Sul do Brasil. Diante dos resultados, pode-se verificar que tanto a inclusão do operador de seleção clonal quanto as informações heurísticas foram capazes de aumentar a eficiência do FPA na resolução do problema aqui em estudo.

Palavras Chave: Planejamento da Expansão da Transmissão, Algoritmos Bioinspirados, Flower Pollination Algorithm, Algoritmo Heurístico Construtivo, Otimização.

Abstract

This work presents the application of a bio-inspired algorithm, together with a Heuristic Constructive Algorithm (HCA) in the solution of a power system static transmission expansion planning problem. The algorithm used is a modified version of the Flower Pollination Algorithm (FPA) that includes a clonal selection operator, from the clonal selection algorithm (CLONALG) that aims to improve the FPA local search process. The modified version proposed is entitled Clonal Flower Pollination Algorithm (CFPA). The CFPA realizes the power system transmission expansion planning, that is, it determines between a set of predefined transmission lines (circuits), which of them must be constructed in order to minimize the power systems investments and operation costs, while meeting the forecast demand in a given planning horizon. In order to increase the efficiency of the search process by the CFPA, information from an HCA has been utilized. That heuristic information has been used in the initialization process of the CFPA and also in the selection of a reduced set of most relevant lines candidates to the expansion plan, thus reducing the search space. To evaluate the results of the proposed methodology, the Garver, IEEE 24 Buses and South Brazilian Systems were simulated. Considering the results it can be verified that both the inclusion of the clonal selection algorithm and the heuristic information were able to increase the efficiency of the FPA in solving this problem.

Key-Words: Transmission Expansion Planning, Metaheuristics, Flower Pollination Algorithm, Heuristic Constructive Algorithm, Optimization.

Lista de Figuras

FIGURA II. 1 - FLUXOGRAMA DO FPA	33
FIGURA II. 2 - FLUXOGRAMA DO CFPA	36
FIGURA III. 1 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA	46
FIGURA IV. 1 - SISTEMA GARVER	50
FIGURA IV. 2 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO DO SISTEMA GARVER	52
FIGURA IV. 3 – CONVERGÊNCIA DO SISTEMA GARVER COM REDESPACHO VIA FPA	53
FIGURA IV. 4 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA GARVER COM REDESPACHO VIA CFPA	54
FIGURA IV. 5 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA GARVER COM REDESPACHO VIA CFPA E AHC	56
FIGURA IV. 6 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO VIA FPA.....	57
FIGURA IV. 7 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO VIA CFPA	58
FIGURA IV. 8 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO VIA CFPA E AHC	59
FIGURA IV. 9 - SISTEMA IEEE 24 BARRAS.....	61
FIGURA IV. 10 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G0) VIA FPA	63
FIGURA IV. 11 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G0) VIA CFPA	64
FIGURA IV. 12 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G0) VIA CFPA E AHC.....	65
FIGURA IV. 13 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G1) VIA FPA	67
FIGURA IV. 14 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G1) VIA CFPA	68
FIGURA IV. 15 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G1) VIA CFPA E AHC.....	69
FIGURA IV. 16 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2) VIA FPA	71
FIGURA IV. 17 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2) VIA CFPA	72
FIGURA IV. 18 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2) VIA CFPA E AHC.....	74
FIGURA IV. 19 - SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL	75
FIGURA IV. 20 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL COM REDESPACHO VIA FPA	77

FIGURA IV. 21 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL COM REDESPACHO VIA CFPA.....	78
FIGURA IV. 22 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL COM REDESPACHO VIA CFPA E AHC.....	79
FIGURA IV. 23 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA FPA.....	81
FIGURA IV. 24 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA CFPA	83
FIGURA IV. 25 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA CFPA – 500 ITERAÇÕES	84
FIGURA IV. 26 - CONVERGÊNCIA DO SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA CFPA E AHC	86

Lista de Tabelas

TABELA IV. 1 – PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA GARVER COM REDESPACHO VIA FPA	51
TABELA IV. 2 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA GARVER COM REDESPACHO	54
TABELA IV. 3 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO VIA FPA.....	57
TABELA IV. 4 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO.....	59
TABELA IV. 5 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G0) VIA FPA	62
TABELA IV. 6 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G0).....	64
TABELA IV. 7 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G1) VIA FPA	66
TABELA IV. 8 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G1).....	68
TABELA IV. 9 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2) VIA FPA	70
TABELA IV. 10 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2) VIA CFPA.....	72
TABELA IV. 11 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2).....	73
TABELA IV. 12 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUL COM REDESPACHO VIA FPA	77
TABELA IV. 13 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA SUL COM REDESPACHO	79
TABELA IV. 14 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA FPA	81
TABELA IV. 15 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA CFPA	82
TABELA IV. 16 - PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA O SISTEMA SUL SEM REDESPACHO VIA CFPA – 500 ITERAÇÕES.....	84
TABELA IV. 17 - CONJUNTO REDUZIDO DE ROTAS (AHC) PARA O SISTEMA SUL SEM REDESPACHO	85
TABELA IV. 18 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA GARVER COM REDESPACHO.....	87
TABELA IV. 19 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO	87
TABELA IV. 20 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G0).....	87
TABELA IV. 21 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G1).....	88
TABELA IV. 22 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS (G2).....	88

TABELA IV. 23 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA SUL COM REDESPACHO	88
TABELA IV. 24 - RESUMO DOS RESULTADOS - SISTEMA SUL SEM REDESPACHO.....	89
TABELA A. 1 - DADOS DE BARRA - SISTEMA GARVER	97
TABELA A. 2 - DADOS DE LINHA DOS CIRCUITOS EXISTENTES - SISTEMA GARVER	98
TABELA A. 3 - DADOS DE LINHA DOS CIRCUITOS CANDIDATOS - SISTEMA GARVER	98
TABELA A. 4 - DADOS DE BARRA - SISTEMA IEEE 24 BARRAS.....	99
TABELA A. 5 - DADOS DE LINHA DOS CIRCUITOS EXISTENTES - SISTEMA IEEE 24 BARRAS	100
TABELA A. 6 - DADOS DE LINHA DOS CIRCUITOS CANDIDATOS - SISTEMA IEEE 24 BARRAS	101
TABELA A. 7 - DADOS DE BARRA - SISTEMA SUL EQUIVALENTE	102
TABELA A. 8 - DADOS DE LINHA DOS CIRCUITOS EXISTENTES - SISTEMA SUL EQUIVALENTE.....	103
TABELA A. 9 - DADOS DE LINHA DOS CIRCUITOS CANDIDATOS - SISTEMA SUL EQUIVALENTE.....	105

Sumário

CAPÍTULO I	16
INTRODUÇÃO	16
I.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
I.2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
I.3- OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO DO ESTUDO.....	24
I.4- PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA PESQUISA	25
I.5 – ESTRUTURA DO TEXTO	25
CAPÍTULO II	27
OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA	27
II.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
II.2- A INSPIRAÇÃO NATURAL DO FPA.....	29
II.3. FLOWER POLLINATION ALGORITHM.....	30
II.4. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS PARA O FPA.....	34
II.5. CONCLUSÕES PARCIAIS.....	37
CAPÍTULO III	38
METODOLOGIA PROPOSTA	38
III.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	38
III.2- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	39
III.3. METODOLOGIA PROPOSTA	43
III.4. CONCLUSÕES PARCIAIS	47
CAPÍTULO IV	48

ESTUDO DE CASOS.....	48
IV.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	48
IV.2- PARÂMETROS UTILIZADOS	49
IV.3- SISTEMA GARVER.....	50
<i>IV.3.1- Sistema Garver com Redespacho de Geração.....</i>	<i>51</i>
<i>IV.3.2- Sistema Garver sem Redespacho de Geração.....</i>	<i>56</i>
IV.4- SISTEMA IEEE 24 BARRAS.....	60
<i>IV.4.1- Sistema IEEE 24 Barras – Cenário G0.....</i>	<i>62</i>
<i>IV.4.2- Sistema IEEE 24 Barras – Cenário G1.....</i>	<i>66</i>
<i>IV.4.3- Sistema IEEE 24 Barras – Cenário G2.....</i>	<i>70</i>
IV.5- SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL.....	74
<i>IV.5.1- Sistema Sul com Redespacho de Geração.....</i>	<i>76</i>
<i>IV.5.2- Sistema Sul sem Redespacho de Geração.....</i>	<i>80</i>
IV.6- CONCLUSÕES PARCIAIS	89
CAPÍTULO V.....	90
CONCLUSÕES	90
V.1- CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
V.2- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICE A	97
DADOS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	97
A.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	97
A.2- SISTEMA GARVER.....	97
A.3- SISTEMA IEEE 24 BARRAS	99
A.4- SISTEMA EQUIVALENTE SUL.....	102

Capítulo I

Introdução

I.1- Considerações Iniciais

O sistema elétrico brasileiro possui características que o tornam único no mundo. O grande potencial existente nas bacias hidrográficas incentiva seu aproveitamento para geração de energia elétrica. Este aspecto peculiar faz do Brasil um dos países com a matriz energética mais limpa e renovável do mundo [1]. No entanto, vale ressaltar que, se por um lado a matriz energética amplamente baseada em recursos hidráulicos é limpa, renovável e barata, por outro lado, existe a necessidade de interligação do sistema, com a finalidade de contornar a sazonalidade dos períodos chuvoso e seco. Além disso, os grandes centros consumidores estão instalados em regiões muito distantes dos centros geradores havendo, portanto, a necessidade do transporte de grandes blocos de energia por longas distâncias. Neste contexto, a adequada interligação elétrica entre geradores e consumidores é feita através dos sistemas de transmissão de energia elétrica.

A fim de se garantir o atendimento aos consumidores com o menor custo possível de investimento e operação, torna-se necessário analisar as diferentes estratégias de expansão do sistema elétrico, tanto em relação à geração quanto à transmissão de energia. No tocante ao planejamento da expansão do sistema de transmissão, o objetivo é

acompanhar o crescimento da demanda e a expansão do parque gerador, fazendo com que o sistema de transmissão seja capaz de prover o adequado atendimento a carga, além de evitar restrições de geração.

O planejamento do sistema elétrico, de um modo geral, é uma tarefa muito complexa, haja vista a dimensão territorial do país e a necessidade de transporte de grandes blocos de energia, contornando a sazonalidade entre os períodos chuvoso e seco. Soma-se ainda os recursos financeiros limitados, o elevado número de variáveis de decisão e as inúmeras incertezas inerentes ao problema [2].

Em síntese, o problema de planejamento da expansão da transmissão consiste na determinação dos circuitos que devem ser adicionados na rede elétrica a fim de suprir a demanda prevista para o horizonte de planejamento. Tais ampliações e reforços no sistema devem ser indicados de modo a buscar a modicidade tarifária e, portanto, é necessário que o conjunto das novas obras apresente custo mínimo de investimento e de operação do sistema elétrico, ao mesmo tempo em que obedeçam as restrições físicas e operativas do sistema, tratando-se, portanto, de um problema de otimização. Quando o objetivo é simplesmente a determinação de quais serão os novos empreendimentos e o local onde serão construídos, o problema é classificado como estático. Quando, além do objetivo estático, é necessária a definição da data de necessidade das ampliações, o problema passa a ser classificado como dinâmico. Neste caso, passa a existir um acoplamento temporal entre as variáveis de decisão, tornando o problema ainda mais complexo.

A natureza do processo decisório inerente ao problema de planejamento da expansão apresenta diversas particularidades que geram complicações na solução deste problema de otimização, mesmo para o caso do planejamento estático, abordado neste trabalho. Entre os agravantes, pode-se citar o fato de existirem variáveis inteiras no problema, referentes às decisões de expansão, que juntas com as demais variáveis contínuas dão origem a um problema de programação de natureza inteira mista. O problema de planejamento é caracterizado também como um problema combinatorial, dado as inúmeras alternativas de investimento no sistema. Esta característica comumente conduz ao fenômeno da explosão combinatorial, a medida que se aumenta o porte dos sistemas,

resultando em um elevado esforço computacional na solução do problema, as vezes até proibitivo. Além disso, é importante destacar que o problema de planejamento apresenta região de solução não convexa, existindo inúmeros pontos de mínimo e de máximo locais, que podem levar os algoritmos a convergirem prematuramente em direção a uma solução ótima local.

As características do problema de planejamento da expansão dos sistemas de transmissão mostram que sua solução é uma tarefa difícil, tornando atraente o estudo e pesquisas neste campo.

I.2- Revisão Bibliográfica

Inicialmente, os estudos de planejamento eram desenvolvidos basicamente através de técnicas de análises, como fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade transitória. Com o passar dos anos, a dificuldade gerada pelo crescimento dos sistemas de transmissão, aliada ao desenvolvimento da informática, motivou a criação dos modelos de síntese de sistemas, os quais utilizam técnicas de otimização que permitem obter soluções de boa qualidade minimizando os custos de investimento. Na década de 70 foram publicados os primeiros trabalhos visando à solução do problema de planejamento da transmissão, baseados essencialmente em heurísticas.

O primeiro algoritmo heurístico construtivo para a resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão foi formulado por Garver [3]. O problema foi modelado com um fluxo de potência ótimo, utilizando um algoritmo de programação linear para determinar os planos de expansão. A rede foi representada através do modelo de transportes, um modelo relaxado, que satisfaz somente a primeira lei de Kirchhoff, permitindo dar tratamento a sistemas ilhados.

Muito embora o modelo de transportes apresente vantagens no tratamento de sistemas não conexos, sua utilização pode ser menos adequada para sistemas reais, dado que se trata de um modelo bastante simplificado. Assim, Monticelli *at al* [4] sugeriu a

representação da rede através do modelo de fluxo de carga linear ou modelo CC, atendendo às duas Leis de Kirchhoff. O problema referente aos barramentos isolados foi convenientemente tratado através da superposição de uma rede fictícia com capacidade de transmissão muito baixa quando comparada com a rede elétrica existente. Os caminhos candidatos à expansão foram ordenados através de um índice de “Mínimo Esforço”, que consistia em uma análise de sensibilidade em relação às susceptâncias dos circuitos.

Em [5] o problema de planejamento foi modelado combinando o modelo de fluxo de carga linear e o modelo de transportes. A determinação do fluxo de potência ativa nos circuitos existentes foi feita a partir do modelo CC, enquanto o modelo de transportes foi utilizado na definição das linhas que deveriam ser construídas.

Uma nova proposta de algoritmo heurístico construtivo foi desenvolvida em [6]. Neste trabalho, os circuitos candidatos à expansão do sistema foram classificados de acordo com a sua eficácia no aumento da capacidade de transmissão ou na minimização do corte de carga do sistema. Esta sensibilidade empregada no processo de síntese de redes foi denominada de índice de “Mínimo Corte de Carga”.

O algoritmo heurístico construtivo proposto em [7] utilizou a estratégia do algoritmo de Mínimo Corte de Carga na solução do problema de planejamento da expansão da transmissão. A principal contribuição deste trabalho consistiu na utilização de forma integrada de vários indicadores de sensibilidade difundidos na literatura com o objetivo de obter soluções de melhor qualidade.

Um novo algoritmo heurístico foi proposto em [8]. A rede de transmissão foi representada por um modelo CC de fluxo de carga modificado, onde as decisões de expansão foram incorporadas ao problema de otimização através das equações originais do modelo CC e o critério de seleção da expansão foi decidido através de heurística baseada na ideia proposta por Garver [3], de modo a evitar a explosão combinatorial referente às alternativas de expansão. A metodologia primal-dual de pontos interiores foi utilizada como técnica de solução e as decisões de expansão foram representadas através de uma função contínua, a função tangente hiperbólica.

Baseado no algoritmo heurístico proposto em [8], foi desenvolvido em [9] uma metodologia para redução do espaço de busca e inicialização do processo de otimização multimodal para resolução do problema de planejamento da expansão da transmissão. O algoritmo proposto considerou diferentes inclinações da função tangente hiperbólica, dentro de um intervalo previamente determinado, associadas aos principais índices de sensibilidade existentes na literatura. A metodologia apresentada foi capaz de extrair um conjunto reduzido e muito relevante de alternativas de expansão.

A técnica de decomposição matemática foi empregada em [10] na resolução do problema de planejamento da expansão da transmissão. Os subproblemas de operação e de investimento foram resolvidos através da aplicação de programação linear, sendo relacionados entre si através dos cortes de Benders. A rede elétrica foi representada tanto por um modelo de transporte, quanto por um fluxo de potência linearizado.

Outro trabalho com base no princípio de decomposição pode ser visto em [11]. O planejamento da transmissão foi dividido em dois problemas: um subproblema de investimento e outro de operação. O subproblema de investimento foi resolvido via programação linear, enquanto que o subproblema de operação era resolvido via simulação de Monte Carlo, com estratégias de controle adequadas e restrições de confiabilidade adicionais.

Uma metodologia de decomposição hierárquica foi proposta em [12] para o problema de planejamento da expansão. Nesta abordagem foram utilizados três diferentes níveis de modelagem para a rede elétrica: modelos de transporte, modelos híbridos e modelos de fluxo de carga linearizados. Assim, uma solução inicial é obtida para o modelo mais simples e o algoritmo muda sucessivamente para modelos mais precisos na medida em que caminha para a solução final.

A metodologia proposta em [13] utilizou técnicas heurísticas junto à decomposição de Benders para evitar que cada subproblema inteiro fosse resolvido até atingir a otimalidade, diminuindo assim, o tempo computacional total e permitindo a análise de sistemas de grande porte.

Romero e Monticelli [14] utilizaram a decomposição de Benders hierarquizada, tal como proposta em [12], e resolveram o subproblema de investimento através de um algoritmo *Branch and Bound*.

Binato [15] propôs a solução do problema de planejamento da transmissão através de um algoritmo de decomposição de Benders modificado, com o objetivo de melhorar a convergência do algoritmo tradicional. Para isso, foi introduzido o conceito dos cortes de Gomory e os cortes de Benders foram obtidos através do relaxamento do problema escravo. Foi também proposta uma nova heurística para ser aplicada na solução do problema mestre a fim de reduzir o tempo de processamento.

Em geral, os modelos matemáticos, baseadas em derivadas, gradientes e técnicas de decomposição, apresentam limitações no tratamento de problemas altamente restritivos, não lineares, multimodais, de natureza combinatorial e de larga escala, como é o caso do problema de planejamento da expansão da transmissão. Por conta disso, a utilização de técnicas metaheurísticas tem se intensificado ao longo dos últimos anos, tendo as mais diversas aplicações.

No ramo do planejamento da transmissão, o uso das técnicas metaheurísticas teve início na década de 1990 [16]. Romero, Gallego e Monticelli utilizaram a técnica de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) para solucionar o referido problema, obtendo soluções de ótima qualidade. Em [17] os mesmos autores propuseram uma estratégia de paralelização, reduzindo o tempo de processamento do algoritmo.

O Algoritmo Genético (AG), baseado na genética natural e no processo evolutivo, é uma das metaheurísticas mais difundidas e tem sido muito aplicado em problemas de planejamento de sistemas de transmissão. Em [18] este algoritmo foi utilizado para definição de um plano de expansão da transmissão economicamente adaptado a um setor elétrico desregulamentado.

Em [19] foi apresentada uma versão modificada do Algoritmo Genético na resolução do planejamento ótimo da expansão de redes de transmissão. Com o objetivo de tornar o processo de busca mais eficiente, foi proposta a inicialização da população a partir

de métodos de otimização convencional. Além disso, o critério de mutação adotado foi inspirado na técnica utilizada pelo *Simulated Annealing*. O algoritmo proposto apresentou resultados de melhor qualidade quando comparados com resultados de Algoritmos Genéticos básicos.

A Busca Tabu (*Tabu Search*) é outra técnica utilizada para tratar o problema de planejamento da expansão da transmissão. Em [20] é proposto um algoritmo de Busca Tabu Paralelo, que combina características de outros métodos como Recozimento Simulado, Algoritmo Genético e Busca Heurística. Em [21] a Busca Tabu foi novamente utilizada no problema de planejamento. Os resultados obtidos mostram que a técnica é promissora e robusta.

O algoritmo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) foi utilizado em [22] na resolução do problema da expansão do sistema de transmissão. Este algoritmo apresenta uma fase de construção, onde são obtidas soluções viáveis para o problema e uma fase de busca local, onde o objetivo é melhorar a resposta obtida na fase de construção. Esta metodologia se mostrou eficaz na resolução de problemas combinatoriais.

Em [23] a técnica de otimização por Enxame de Partículas, *Particle Swarm Optimization* (PSO), foi utilizada no planejamento da expansão da transmissão. A técnica apresentou soluções de boa qualidade, convergência estável e baixo esforço computacional, mostrando-se muito eficiente.

O algoritmo Colônia de Formigas, *Ant Colony Optimization* (ACO), foi utilizado em [24]. O estudo realizado considerou uma abordagem determinística em ambientes estático e dinâmico. Os resultados apresentados mostraram a eficiência da metodologia proposta.

Em [25] foi apresentada uma versão hibridizada do algoritmo *Simulated Annealing* (SA). O algoritmo proposto incorporou um processo de busca local, refinando a solução encontrada para cada nível de temperatura. A metodologia encontrou bons resultados, em baixo tempo de processamento, apresentando uma melhoria de desempenho quando comparada com o algoritmo SA originalmente proposto.

A metaheurística denominada *Shuffled Frog Leaping* (SFL), mais conhecida como pulo do sapo, foi utilizada em [26] no problema de planejamento da transmissão para minimizar o custo total da expansão, composto por custos de investimento de construção de novas linhas, custos de congestionamento e o custo da redução de carga devido a contingências. A metodologia se mostrou muito eficiente e com rápida convergência. Os resultados obtidos foram comparados com o *Particle Swarm Optimization* (PSO) e o Algoritmo Genético (AG).

Em [27] foi apresentada a aplicação conjunta de um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) e uma técnica metaheurística no planejamento da transmissão. Na primeira etapa, o AHC foi utilizado a fim de identificar os caminhos relevantes à expansão e, assim, diminuir o espaço de busca. Posteriormente, o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) foi utilizado, juntamente com as informações heurísticas obtidas na primeira etapa, com o objetivo de encontrar o custo mínimo de expansão para o sistema. Os resultados apresentados mostraram a eficiência da metodologia proposta e da relevância de um espaço de soluções reduzido.

O algoritmo Colônia de Abelhas (*Bee Colony Algorithm*) foi utilizado em [28] para resolver o problema de planejamento estático da expansão a fim de minimizar o custo de investimento na transmissão. Os resultados apresentados indicam que a metodologia é capaz de obter o custo mínimo de investimento para os sistemas analisados.

Em [29] foram abordadas duas metodologias para resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão. A primeira fez uso da metaheurística PSO e dos modelos de transporte e linearizado para o sistema de transmissão. Na segunda abordagem, considerou-se múltiplos cenários de geração usando o modelo linear disjuntivo. Os resultados mostraram a eficiência de ambas as abordagens.

Em [30] foi apresentada uma estratégia para solução do problema de planejamento em duas etapas. Na primeira, foi utilizado um algoritmo heurístico construtivo para determinação de uma solução inicial factível para o problema. Esta solução foi utilizada na segunda etapa, na inicialização do processo de otimização multimodal, onde foi utilizado o

algoritmo de Ecolocalização. Os resultados apresentados apontaram para uma eficiência na utilização das duas etapas.

I.3- Objetivos e Motivação do Estudo

Diante das questões levantadas, este trabalho propõe um método de solução para o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica através da combinação de uma metaheurística e de um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC). Para tanto, será apresentada uma versão modificada do Algoritmo de Polinização de Flores - do inglês *Flower Pollination Algorithm* (FPA) - que incorpora o conceito do operador de seleção clonal, oriundo do Algoritmo de Seleção Clonal (CLONALG). Esta nova versão foi nomeada de *Clonal Flower Pollination Algorithm* (CFPA). O FPA simula o processo de polinização de flores existente na natureza e o operador de seleção clonal é utilizado com o objetivo de potencializar o processo de busca local, através da clonagem das soluções mais atraentes. O CFPA realiza a otimização do sistema com o objetivo de determinar o planejamento final de expansão de um determinado sistema de transmissão em estudo.

Devido ao baixo esforço computacional e a robustez dos algoritmos baseados em heurísticas, muitas de suas propriedades e resultados encontram grande aplicabilidade no desenvolvimento de algoritmos mais complexos. Desta forma, de modo a aumentar a eficiência do processo de busca pelo CFPA, foram utilizados alguns dos resultados obtidos em [9] através da proposta de um Algoritmo Heurístico Construtivo. Tais resultados são utilizados na inicialização do algoritmo bioinspirado proposto (CFPA) e também na seleção de um conjunto reduzido das rotas mais relevantes à expansão, reduzindo assim o espaço de soluções.

Ressalta-se ainda que o processo de busca multimodal utilizado neste trabalho (FPA) foi recentemente proposto, não tendo sido observados, até então, nenhuma aplicação do mesmo no problema de planejamento da expansão da transmissão, fato que motivou esta pesquisa.

I.4- Publicações Decorrentes desta Pesquisa

Em decorrência desta pesquisa, foram produzidos os seguintes trabalhos:

Artigo Publicado:

- Neves, P. S., Junior, I. C. S., Dias, B. H., Mendonça, I. M. “*Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Flower Pollination Algorithm e Heurística Construtiva*”, 12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Curitiba, Paraná, Novembro de 2016.

Artigo Aceito:

- Neves, P. S., Souza, R. O. G., Junior, I. C. S., Dias, B. H., “*Static Planning of the Expansion of Electrical Energy Transmission Systems Using Flower Pollination Algorithm*”, artigo submetido ao XII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2017.

I.5 - Estrutura do Texto

Além deste capítulo, esta dissertação conta com mais quatro capítulos e um apêndice.

O capítulo II apresenta os conceitos e a formulação referentes à técnica *Flower Pollination Algorithm* (FPA). Neste capítulo é apresentada também uma proposta de modificação no algoritmo padrão do FPA.

No capítulo III são descritas a formulação, a modelagem e a metodologia proposta para a resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão.

No capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta. Para validação do método foram utilizados três sistemas muito conhecidos na literatura especializada.

No capítulo V são apresentadas as principais conclusões obtidas neste estudo, bem como sugestões de trabalhos futuros tendo em vista os desenvolvimentos realizados nesta dissertação.

No Apêndice A são apresentados os dados dos sistemas elétricos utilizados nesta dissertação.

Capítulo II

Otimização Bioinspirada

II.1- Considerações Iniciais

A natureza vem resolvendo problemas desafiadores ao longo de milhões de anos, mostrando a capacidade dos sistemas biológicos de se adaptarem de forma eficaz ao ambiente frequentemente mutável, maximizando seus objetivos evolutivos. Com base nas características de sucesso dos sistemas biológicos, muitos algoritmos inspirados na natureza foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas, tendo as mais diversas aplicações, como problemas de engenharia, indústria, medicina, entre outros.

Em muitas aplicações de engenharia é necessário encontrar a solução ideal para um determinado problema sujeito a restrições altamente complexas. Tais problemas de otimização restritos são muitas vezes não lineares, e encontrar as soluções ótimas é geralmente uma tarefa muito desafiadora, às vezes impossível. Técnicas de otimização convencionais, baseadas em derivada e gradiente, em geral não funcionam bem para problemas com não linearidade e multimodalidade, sobretudo para problemas de maior porte. A tendência atual é o emprego de algoritmos metaheurísticos inspirados na natureza para enfrentar tais problemas complexos, e tem sido demonstrado que as metaheurísticas

são surpreendentemente muito eficientes. Por esta razão, a popularidade das técnicas metaheurísticas vem se intensificando ao longo dos últimos anos.

A maioria dos algoritmos inspirados na natureza faz uso de técnicas estocásticas na busca pela solução ótima. Para tanto, o algoritmo parte de um conjunto de soluções iniciais aleatórias que, ao longo do processo iterativo, são atualizadas e melhoradas com base no mecanismo de cada algoritmo, até que se atinja o critério de parada estabelecido. Assim, eles são considerados como uma busca aleatória, porém guiados por heurística. Devido ao grande sucesso das metaheurísticas, muitos algoritmos foram propostos nos últimos anos. Como exemplo, pode-se citar o algoritmo *Artificial Bee Colony*, proposto em 2005 [31]; *Cat Swarm Optimization*, em 2006 [32]; Em 2009 foram apresentados o *Cuckoo Search Algorithm* [32] e *Firefly Algorithm* [34]; *Bat Algorithm*, proposto em 2010 [35] e *Wolf Search*, em 2012 [36].

A técnica de otimização *Flower Pollination Algorithm* (FPA), em português, Algoritmo de Polinização de Flores, foi proposta em 2012 por Xin-She Yang, inspirada no processo de polinização de flores [37].

Yang observou que, do ponto de vista da evolução biológica, o objetivo da polinização das flores é a reprodução ótima das plantas em termos de números, bem como a sobrevivência daquelas mais fortes. Ou seja, o processo de polinização pode ser encarado como um recurso com vistas à otimização das espécies de plantas, o que levou Yang a idealizar um novo algoritmo de otimização.

Em função da sua facilidade de implementação, velocidade de processamento, eficiência, robustez e tratamento de problemas restritos e multimodais, o FPA tem sido empregado na solução dos mais diversos problemas de engenharia, apresentando resultados promissores.

II.2- A Inspiração Natural do FPA

O FPA é um dos métodos de otimização bioinspirada que foi desenvolvido recentemente (2012), tendo sido baseado no processo de polinização de flores. Para melhor entendimento, algumas considerações importantes sobre o processo natural de polinização das flores serão apresentadas a seguir para que, na sequência, o algoritmo de polinização possa ser descrito.

Segundo [37], o objetivo principal de uma flor é, em última instância, a reprodução da espécie via polinização. O processo de polinização acontece através da transferência de pólen de uma flor para outra. Essa transferência de pólen é frequentemente associada com polinizadores, tais como insetos, pássaros, morcegos, entre outros animais, mas pode também ocorrer sem a necessidade dos mesmos.

Quando o pólen é transferido de uma planta para outra com a ajuda de um animal polinizador, têm-se a chamada polinização biótica. A grande maioria das espécies de plantas com flores pertencem a este grupo. As demais espécies de plantas com flores possuem polinização abiótica, não sendo necessária a ação dos animais polinizadores. Neste último caso, o vento e a difusão em água consistem nos possíveis vetores de polinização.

Algumas plantas e animais coevoluíram em uma parceria flor-polinizador muito intensa, de forma que, algumas flores só podem atrair e depender de uma determinada espécie de insetos ou pássaros para a polinização. Essa tendência de que os polinizadores visitem exclusivamente certas espécies de flores, enquanto ignoram outras, é chamada de lealdade de flor. Esta lealdade de flor pode ter vantagens evolutivas, uma vez que maximiza a transferência de pólen de uma flor para outra de mesma espécie, aumentando assim a reprodução das mesmas espécies de plantas. Da mesma forma, esta tendência trás vantagens também para os polinizadores, pois com um custo mínimo de aprendizado e de exploração do espaço, eles podem ter certeza de que a oferta de néctar está disponível.

A polinização pode ser alcançada por autopolinização ou por polinização cruzada. No caso da polinização cruzada, ou alogamia, o processo de polinização pode acontecer a

partir do pólen de uma flor de uma planta diferente, ao passo que a autopolinização é a fertilização de uma flor com pólen da mesma flor ou de diferentes flores da mesma planta. A autopolinização muitas vezes ocorre devido à falta de polinizadores.

II.3. Flower Pollination Algorithm

Tendo em vista as considerações abordadas no item anterior, Yang idealizou as características do processo de polinização de flores, o comportamento dos animais polinizadores, o fenômeno da parceria flor-polinizador, ou lealdade de flor, e assim definiu quatro regras básicas para metáfora do FPA:

1. O processo de polinização cruzada e biótica pode ocorrer entre plantas separadas por longas distâncias, uma vez que os polinizadores se deslocam com o comportamento dos voos de Lévy. Desta forma, este tipo de polinização pode ser considerado como polinização ou busca global.
2. A autopolinização e o processo de polinização abiótico, por não contarem com a ajuda dos animais polinizadores, ocorrem entre flores vizinhas e, portanto, são consideradas como polinização ou busca local.
3. A lealdade de flor pode ser considerada como a probabilidade de reprodução, que é proporcional à semelhança de duas flores envolvidas.
4. A polinização local e a polinização global são controladas por um operador de probabilidade $p \in [0, 1]$. Devido à proximidade física e outros fatores tais como o vento, a polinização local pode ter uma significativa fração p nas atividades de polinização.

Obviamente, na realidade, cada planta pode ter várias flores, e cada flor geralmente lança milhões e até bilhões de gametas de pólen. No entanto, para simplificar, é suposto que cada planta tenha apenas uma flor, e que cada flor produza apenas um gameta de pólen. Dessa forma, não há necessidade de distinção entre um gameta, uma flor, uma planta ou a solução do problema. Para problemas de otimização multiobjetivos, o algoritmo pode ser facilmente estendido para incluir múltiplos gametas e múltiplas plantas.

O algoritmo baseado na polinização de flores foi então projetado partindo-se das quatro premissas básicas e das considerações descritas no parágrafo anterior. Foram concebidas duas etapas fundamentais neste algoritmo: a polinização global e a polinização local.

Na etapa de polinização global, o pólen das flores é transportado por polinizadores, tais como insetos e pássaros, podendo viajar por uma longa distância, uma vez que estes animais podem frequentemente voar e mover-se por grandes extensões. Isso garante a polinização e reprodução dos mais aptos. Representando o indivíduo mais apto da população como g_* , a primeira regra mais a lealdade de flor podem ser representadas matematicamente como apresentado na Equação (II.1).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(x_i^t - g_*) \quad (\text{II.1})$$

Onde x_i^t é o pólen i ou o vetor solução x_i na iteração t , e g_* é a melhor solução encontrada entre todas as soluções na atual geração ou iteração. O parâmetro L é a força da polinização, que é, essencialmente, um tamanho de passo. Como os insetos podem se mover a uma grande distância, com várias distâncias de passo, podemos usar um voo de Lévy para imitar essa característica de forma eficiente. Ou seja, estabelece-se $L > 0$ a partir de uma distribuição Levy, representada pela Equação (II.2).

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, \quad (s \gg s_0 > 0) \quad (\text{II.2})$$

Aqui $\Gamma(\lambda)$ é a função gama padrão, e esta distribuição é válida para valores de $s > 0$. Para este problema, foi usado $\lambda = 1,5$.

A segunda premissa e a lealdade de flor podem ser descritas matematicamente conforme a Equação (II.3), a qual representa a etapa de busca ou polinização local do FPA:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (\text{II.3})$$

Nesta equação, x_j^t e x_k^t são pólenes de flores diferentes da mesma espécie de planta. Isto essencialmente imita a lealdade de flor em uma vizinhança limitada. Matematicamente, se x_j^t e x_k^t vem da mesma espécie ou foram selecionados partir da mesma população, isto se torna uma varredura aleatória local, se considerarmos ϵ proveniente de uma distribuição uniforme em $[0,1]$.

Um processo de otimização através de algoritmos bioinspirados deve considerar dois aspectos: exploração que descobre potenciais novos locais no espaço de busca (busca global) e intensificação que utiliza soluções promissoras já identificadas (busca local). Para isso, um operador de probabilidade ou proximidade p é utilizado para alternar entre os dois modos de busca, propiciando uma varredura ampla e inteligente pelo espaço de soluções.

As considerações descritas acima podem ser agrupadas em um fluxograma que descreve o algoritmo, conforme ilustrado na Figura II.1.

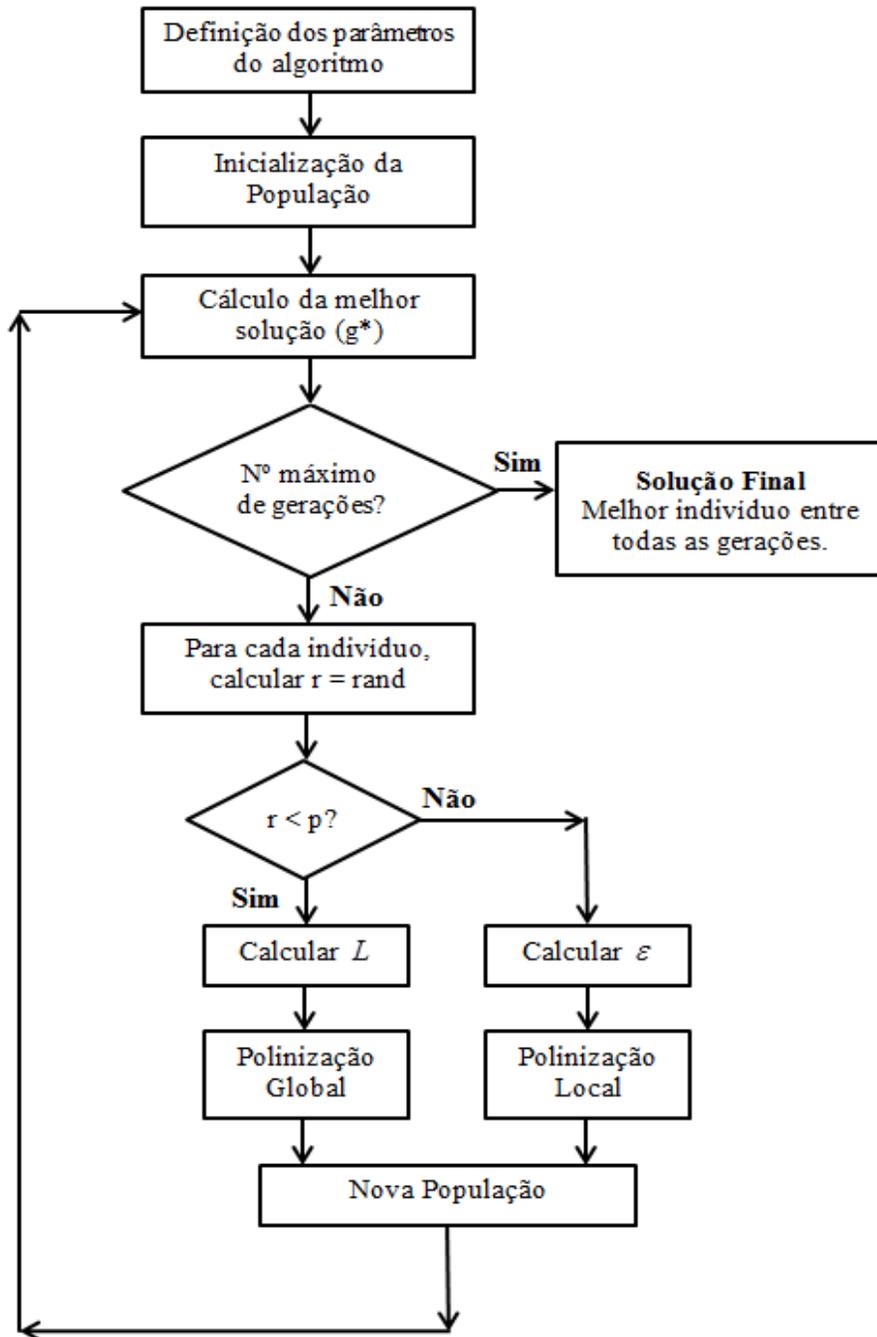


Figura II. 1 - Fluxograma do FPA

II.4. Modificações Propostas para o FPA

Como já discutido neste capítulo, a popularidade dos algoritmos baseados em metaheurísticas tem se intensificado muito nas últimas décadas e, paralelamente ao desenvolvimento de novas metodologias, cresce também os casos de aperfeiçoamentos e melhorias em algoritmos existentes [38]. Muitas técnicas são propostas para melhorar a performance de algoritmos estocásticos, sendo que uma das mais famosas consiste na combinação de operadores importados de diferentes algoritmos, resultando assim em uma hibridização de algoritmos.

As hibridizações e investigações de melhoria de desempenho de algoritmos existentes são muito importantes, pois possibilitam a máxima exploração do potencial de cada metodologia.

O operador de seleção clonal, oriundo do Algoritmo de Seleção Clonal, é encontrado na literatura como um efetivo meio de hibridização, tendo sido responsável por melhorar o desempenho de diversos algoritmos [39-42]. Por este motivo, o princípio de seleção clonal foi escolhido neste trabalho para ser investigado quanto a sua capacidade em aumentar o desempenho do FPA padrão.

O Algoritmo de Seleção Clonal, denominado genericamente de CLONALG (*CLONal selection ALGORITHM*), foi originalmente proposto em [43], tendo sido inspirado nos princípios imunológicos biológicos. Esta ferramenta foi desenvolvida para resolver problemas de aprendizagem de máquina e reconhecimento de padrões, mas, dadas suas características adaptativas, o algoritmo foi estendido para aplicações a problemas de otimização multimodal e combinatorial.

O CLONALG é um algoritmo baseado em população de indivíduos, em que a população, chamada de repertório, consiste de um conjunto de anticorpos, ou soluções para o problema. Os anticorpos são responsáveis pelo reconhecimento dos antígenos que, no caso de problemas de otimização, correspondem à função objetivo.

No sistema imunológico, o princípio de seleção clonal descreve o fenômeno de uma resposta imune adaptativa a estímulos de antígenos, ou corpos estranhos, estabelecendo a

ideia de que somente os anticorpos capazes de reconhecer os antígenos irão se proliferar, sendo selecionados em detrimento dos demais. Os anticorpos selecionados passam por um processo de clonagem, ou reprodução celular, sendo geradas cópias típicas destas células de maior afinidade. Quanto maior a afinidade do anticorpo com o antígeno, maior sua taxa de clonagem. Durante a reprodução celular, alguns clones passam por um processo de mutação somática, que introduz variações genéticas na população. Este processo é realizado de modo inversamente proporcional à afinidade, de modo que exista uma auto adaptação da taxa de variação genética a ser introduzida ao longo das gerações. A fim de manter a diversidade da população, ao final de cada geração, os indivíduos de menor afinidade são substituídos por soluções aleatórias.

Dadas estas considerações a respeito do princípio de seleção clonal, o CLONALG faz uso de dois mecanismos principais de evolução da população de indivíduos: um mecanismo de competição de indivíduos, responsável pela seleção dos mais aptos; e um mecanismo de variação genética (mutação) dos indivíduos, responsável por inserir diversidade e contribuir no processo de busca. Juntos, estes mecanismos colaboram para o aumento da afinidade entre o anticorpo e o antígeno que o selecionou, levando a população de indivíduos a caminhar rumo à solução ótima ou subótima do problema.

A modificação proposta no FPA consiste na utilização da característica de competição entre os indivíduos, de acordo com o princípio de seleção clonal. Na formulação padrão do FPA, o processo de polinização local pode ocorrer através de indivíduos de afinidade muito baixa, o que não é desejável, já que o objetivo é uma exploração local e indivíduos de menor aptidão tendem a ser menos efetivos na busca. Deste modo, a proposta é que, antes da aplicação da polinização local, os indivíduos da população passem por uma etapa de competição entre si e clonagem daqueles de maior aptidão. Os menos aptos, ou seja, aqueles que estão distantes dos pontos ótimos locais, são descartados nesta etapa e não sofrem atualização. Feita a seleção dos indivíduos de maior aptidão, o processo de clonagem gera tantos mais clones quanto maior a afinidade da solução. Isso garante que, durante a polinização local, aquelas soluções de maior aptidão possam ser atualizadas em diferentes direções do espaço de soluções, potencializando a exploração da vizinhança e aumentando a probabilidade de sucesso na obtenção do ponto

ótimo. Esta estratégia é responsável por melhorar o desempenho do processo de busca local do FPA. O fluxograma da Figura II.2 apresenta o funcionamento do algoritmo proposto.

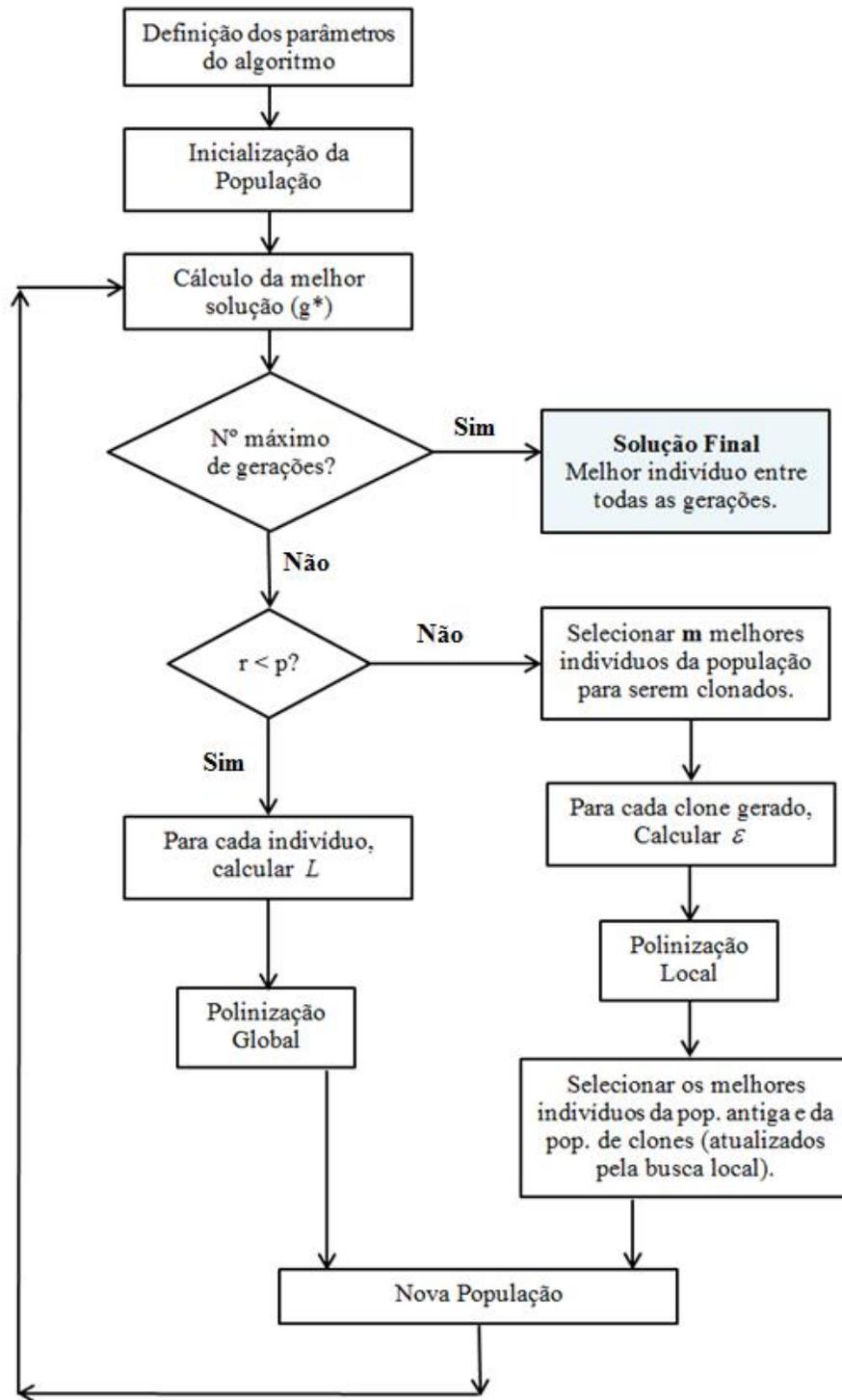


Figura II. 2 - Fluxograma do CFPA

II.5. Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentadas as informações básicas a respeito do processo de otimização bioinspirado *Flower Pollination Algorithm* (FPA), tais como sua inspiração biológica, as premissas básicas do algoritmo e a formulação matemática original. Apesar da já comprovada eficiência do FPA na resolução dos mais diversos problemas, entende-se que as investigações de melhorias nos algoritmos devem seguir de forma a se explorar toda a potencialidade da metodologia. Dessa forma, foi sugerido neste capítulo uma melhoria pontual no processo de busca local do referido algoritmo, tendo sido a mesma implementada a partir do operador de seleção clonal, oriundo do Algoritmo de Seleção Clonal (CLONALG). A melhoria proposta foi também apresentada e detalhada no presente capítulo.

Capítulo III

Metodologia Proposta

III.1- Considerações Iniciais

O objetivo do planejamento da expansão da rede de transmissão é a definição de um conjunto de obras que, uma vez incorporado ao sistema, seja capaz de aumentar sua capacidade de transmissão, atendendo à demanda prevista, ao menor custo possível de investimento e operação. Ao conjunto de obras que atenda a estes requisitos, dá-se o nome de plano de expansão ótimo.

A determinação do plano de expansão de menor custo é dada através da solução de um modelo matemático, que deve ser construído de modo a representar o referido problema de otimização. Normalmente, esta representação é feita através de um problema de programação não linear de natureza inteira mista.

Este capítulo apresenta inicialmente a formulação matemática para o problema de expansão estática da rede de transmissão, a partir de um modelo de fluxo de potência ótimo linearizado, ou seja, um fluxo de carga CC. Na sequência, são abordadas as considerações e formulações referentes à metodologia proposta para a resolução deste problema de planejamento.

III.2- Formulação Matemática

O planejamento da expansão de redes de transmissão de energia elétrica pode ser formulado como um problema de otimização não linear, com variáveis inteiras e reais. A solução deste problema está associada à determinação dos circuitos elétricos que sejam capazes de minimizar os custos de investimento e de operação da rede, ao mesmo tempo em que atendem a demanda de energia prevista para o horizonte de planejamento e que satisfazem um conjunto de restrições físicas e operativas do sistema elétrico. Os circuitos elétricos são selecionados a partir de um conjunto de circuitos candidatos à expansão, definido previamente.

A representação matemática mais fiel para os sistemas de potência consiste na modelagem através do fluxo de potência não linear ou CA [44]. Todavia, em virtude do forte acoplamento existente entre a potência ativa e o ângulo da tensão, a modelagem da rede através do fluxo de carga linear (CC) é muito difundida nos estudos de planejamento da transmissão, dado que este problema é voltado essencialmente para o fornecimento de potência ativa ao sistema.

A modelagem linear não substitui o fluxo de carga CA, mas permite determinar a distribuição dos fluxos de potência ativa na rede de transmissão de forma simples, com baixo esforço computacional e precisão aceitável, com erros da ordem de 2% a 5% em sistemas mais sobrecarregados [45]. Diante disso, a metodologia proposta neste trabalho faz uso do modelo de fluxo de carga linearizado, em detrimento à modelagem não linear, evitando aumentar a complexidade de um problema que já naturalmente de árdua solução.

O problema de planejamento da expansão da transmissão tem como função objetivo a minimização do custo total de investimento e de operação do sistema. Tal função objetivo é controlada por um conjunto de restrições, quais sejam: restrições de balanço de potência ativa, de carregamento dos circuitos elétricos, de geração de potência ativa pelas máquinas do sistema, entre outras. Este conjunto de equações é apresentado e detalhado a seguir.

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

Sujeito a:

$$g_i + r_i + \sum_{j \in \Omega_i} f_{ij} = d_i \quad (\text{III.2})$$

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} \quad \forall (i,j) \in E, C \quad (\text{III.3})$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (\text{III.4})$$

$$0 \leq r \leq \bar{r} \quad (\text{III.5})$$

$$PE_{ij} \in \mathbb{N} \quad \forall (i,j) \in C \quad (\text{III.6})$$

$$f_{ij} = \gamma_{ij} * \theta_{ij} \quad \forall (i,j) \in E \quad (\text{III.7})$$

$$f_{ij} = PE_{ij} * \gamma_{ij} * \theta_{ij} \quad \forall (i,j) \in C \quad (\text{III.8})$$

Onde:

- nr : Número de geradores fictícios;
- nc : Número de circuitos candidatos;
- c_m : Custo do déficit de energia (US\$/MW-ano);
- r_m : Geração da unidade geradora de déficit (MW);
- c_k : Custo da construção do circuito candidato k (US\$/ano);
- g_i : Geração da unidade geradora na barra i (MW);
- \bar{g}_i : Limite máximo de geração na barra i (MW);

r_i	:	Geração da unidade geradora fictícia na barra i (MW);
\bar{r}_i	:	Limite máximo da geração fictícia na barra i (MW);
PE_k	:	Parâmetro de expansão do circuito candidato k;
f_{ij}	:	Fluxo de potência ativa no circuito i - j (MW);
\bar{f}_{ij}	:	Limite de fluxo de potência ativa no circuito i - j (MW);
γ_{ij}	:	Susceptância do circuito i - j;
d_i	:	Demanda na barra i (MW);
θ_{ij}	:	Diferença angular entre as barras i - j;
E	:	Conjunto de circuitos existentes na topologia base;
C	:	Conjunto de circuitos candidatos à expansão;
Ω_i	:	Conjunto de barras conectadas a barra i;

A seguir, a função objetivo e cada uma das equações de restrição serão detalhadas.

III.2.1 – Função Objetivo

A função objetivo (III.1) corresponde à minimização da soma do custo de investimento referente à expansão do sistema de transmissão e do custo do corte de carga. O corte de carga, ou geração de déficit, pode ser interpretado como uma geração fictícia de potência ativa, de alto custo operacional, utilizada para garantir a viabilidade do problema, do ponto de vista matemático.

Os geradores fictícios são inseridos em cada barramento do sistema e entram em operação toda vez que as expansões realizadas não garantirem o atendimento à demanda. Por apresentarem custos operacionais muito elevados, a tendência é que, ao longo do processo de solução, os circuitos candidatos sejam adicionados à topologia corrente e os geradores de déficit apresentem geração nula.

III.2.2 – Restrições de Balanço de Potência Ativa

A equação (III.2) é a restrição de balanço de potência ativa do sistema, também conhecida como equação de atendimento à demanda. Esta restrição verifica o estado da rede, determinando que a soma da geração e dos fluxos que saem de determinado barramento deve corresponder ao valor da soma da demanda e dos fluxos que chegam ao barramento.

Neste ponto, destaca-se que a geração dos geradores fictícios é contabilizada nesta restrição, garantindo assim a factibilidade do problema, do ponto de vista matemático.

É importante ressaltar também que, neste trabalho, não foram consideradas as parcelas de perdas no sistema e, portanto, o balanço de potência total é fechado apenas com a contabilização da geração e da carga.

III.2.3 – Restrição de Carregamento de Circuitos

A equação (III.3) corresponde aos limites máximos de fluxo de potência ativa nos circuitos elétricos existentes e candidatos, representando assim a capacidade de transporte de fluxo das linhas de transmissão e transformadores.

III.2.4 – Restrição de Geração de Potência Ativa

As equações (III.4) e (III.5) determinam os limites inferiores e superiores de geração de potência ativa dos geradores existentes e fictícios, sendo estes últimos referentes aos eventuais cortes de carga existentes no sistema.

III.2.5 – Restrições do Parâmetro de Expansão (PE)

O planejamento da expansão da transmissão consiste em decidir, dentre 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 determinada linha de transmissão é representada pelo parâmetro de expansão (PE) na Equação (III.6). O valor nulo deste parâmetro significa a não construção do circuito, ao passo que um valor inteiro indica a construção de um ou mais circuitos na rota, de acordo com o valor associado ao parâmetro. Assim, o parâmetro de expansão corresponde a uma variável discreta no problema de planejamento, conferindo a natureza inteira mista do problema.

III.2.6 – Restrições de Fluxo de Potência Ativa

Conforme já mencionado, a formulação adotada neste trabalho faz uso do modelo de fluxo de potência linear, modelagem que é baseada no acoplamento entre a potência ativa e o ângulo da tensão, permitindo a determinação da distribuição dos fluxos de potência ativa na rede de transmissão de forma mais simplificada.

A formulação proposta é composta por dois tipos de circuitos: circuitos existentes na topologia base e circuitos candidatos à expansão do sistema. As restrições de fluxo de potência ativa, atendendo à modelagem de fluxo de carga CC, são dadas pelas equações (III.7) e (III.8), para os dois tipos de circuitos citados. Pode-se notar que quando um circuito candidato é adicionado à topologia existente, a equação (III.8) fica idêntica à equação (III.7) e, portanto, o circuito candidato passa a fazer parte da topologia existente.

III.3. Metodologia Proposta

Conforme discutido nos capítulos anteriores, o planejamento da expansão de sistemas de transmissão é um problema de otimização não linear, de natureza inteira mista, com região de solução não convexa, natureza combinatorial e tantas outras características

que tendem a agravar a complexidade na resolução deste problema. Estas particularidades mostram as dificuldades que existem na elaboração de algoritmos que sejam rápidos na resolução do problema, ao mesmo tempo em que garantam robustez e eficiência no processo de busca.

Diante da crescente popularidade das técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas e da comprovada eficiência das mesmas na solução de diversos problemas, optou-se neste trabalho pela adoção desta metodologia bioinspirada para resolução do problema de planejamento da transmissão. Dessa forma, um algoritmo proposto recentemente, nomeado *Flower Pollination Algorithm* (FPA), foi utilizado nesta investigação.

De forma a potencializar o processo de busca local do FPA, foi proposto no capítulo anterior a incorporação do operador de seleção clonal no algoritmo, introduzindo uma etapa prévia de competição e clonagem dos melhores indivíduos. O algoritmo resultante desta hibridização foi nomeado de *Clonal Flower Pollination Algorithm* (CFPA) e utilizado na resolução do conjunto de equações apresentado na sessão anterior.

Apesar de todas as vantagens existentes na utilização de algoritmos bioinspirados, estas técnicas ainda podem apresentar certo esforço computacional para problemas de maior porte, com múltiplas alternativas de solução, além de dificuldades para escapar de pontos de mínimos locais, que podem levar a uma convergência prematura.

Para contornar este problema, propõe-se neste trabalho uma metodologia que combina o uso do algoritmo bioinspirado em flores (CFPA) com um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC). O AHC é um algoritmo muito robusto, de fácil implementação e que apresenta baixo esforço computacional, entretanto, raramente encontra a solução ótima global, sobretudo para sistemas reais e de grande porte. Muito embora a utilização exclusiva de um único algoritmo apresente ressalvas, a aplicação conjunta destas técnicas pode trazer ganhos expressivos na qualidade da solução encontrada.

Foi proposto em [9] uma nova abordagem heurística construtiva baseada em índices de sensibilidade, na qual as decisões de expansão são relaxadas e representadas através da

função tangente hiperbólica. O algoritmo proposto considera diferentes inclinações da função tangente hiperbólica, dentro de um intervalo previamente determinado, associadas aos principais índices de sensibilidade existentes na literatura. A heurística construtiva foi utilizada em [9] com a finalidade de identificação dos caminhos mais relevantes à expansão. Para tal, cada sistema em análise foi simulado 50 vezes através do AHC, gerando 50 planos de expansão. A união das rotas selecionadas pelo algoritmo nestes 50 planos de investimento deu origem a um conjunto de rotas consideradas mais atraentes para o processo de expansão da rede.

Em outras palavras, o AHC proposto em [9] foi utilizado na redução do espaço de soluções. Esta redução das opções de investimento, ou seja, das rotas candidatas à expansão, é bastante relevante, tendo em vista que atua no sentido de aumentar a eficiência do processo de busca, independentemente da técnica de otimização utilizada.

Além da redução das alternativas de expansão, as informações obtidas pelo AHC também podem ser utilizadas na inicialização do processo de busca multimodal. Sendo assim, a metodologia proposta neste trabalho utiliza o melhor plano final de expansão, ou seja, o plano de menor custo, obtido após as 50 simulações do AHC, para compor a população inicial de indivíduos do algoritmo bioinspirado em flores. Esta estratégia é responsável por melhorar a performance de busca do CFPA, haja vista que a inicialização é feita de forma mais inteligente e o algoritmo parte de um ponto de melhor qualidade.

Diante do exposto, a metodologia proposta neste trabalho para resolução do problema de planejamento da expansão da transmissão utiliza importantes informações heurísticas, resultantes do trabalho [9], como dados de entrada para o processo de busca multimodal utilizado na obtenção do plano de expansão do sistema. A Figura III.1 a seguir ilustra esta proposta de resolução do problema.

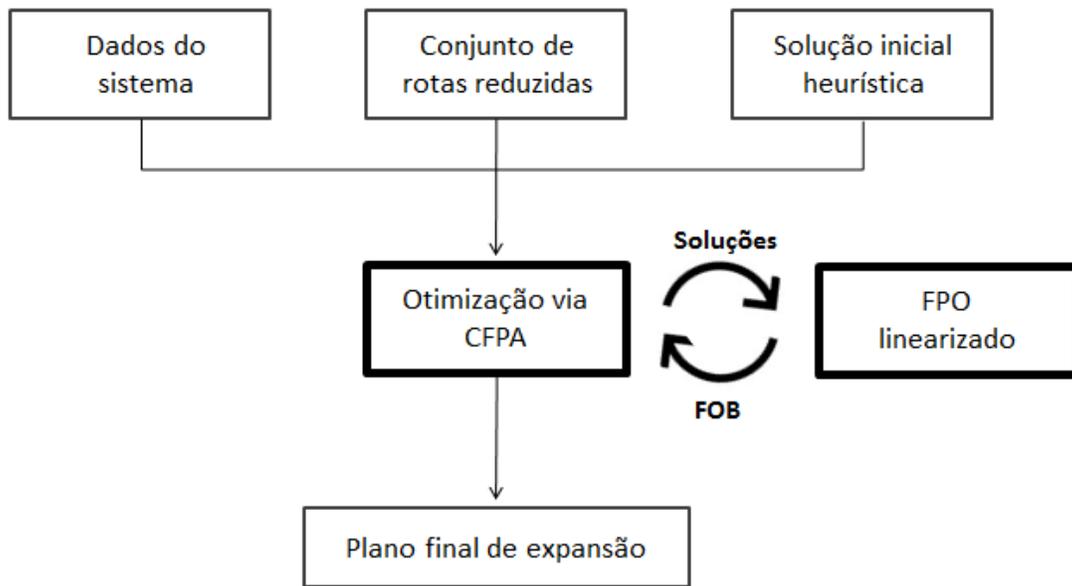


Figura III. 1 - Fluxograma da Metodologia Proposta

Neste ponto, vale ressaltar que, de modo a evitar as dificuldades relativas à resolução de problemas de programação inteira, a metodologia aqui proposta permite que o parâmetro de expansão assumira valores contínuos dentro do intervalo $[0, NEPC]$, onde NEPC corresponde ao número de expansões por caminho candidato, ou seja, equivale ao número máximo de circuitos elétricos que podem ser construídos em cada rota candidata à expansão. Assim, o problema que originalmente é de programação inteira passa a ser um problema de programação contínua.

Obviamente, 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. Dessa forma, o critério adotado consiste na solução do problema de otimização assumindo valores contínuos para o parâmetro de expansão e, na sequência, este parâmetro é arredondado para o inteiro mais próximo.

III.4. Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentada a formulação matemática proposta para resolução do problema de planejamento da expansão, modelada através de um fluxo de potência ótimo linearizado. A função objetivo deste problema corresponde à minimização da soma dos custos de expansão e de operação do sistema.

Nesta modelagem, a decisão de expansão é incorporada ao problema de otimização através das equações originais do fluxo de carga CC, utilizando para isso dois conjuntos de circuitos: os existentes na topologia corrente e aqueles que são candidatos à expansão do sistema.

Foi apresentado também detalhes da metodologia empregada na resolução do referido problema, a qual utilizada informações heurísticas importantes, resultantes do trabalho [9]. Estas informações são utilizadas a fim de prover uma redução eficiente do espaço de soluções e uma inicialização mais inteligente para o processo de busca multimodal utilizado na obtenção dos planos de expansão.

Capítulo IV

Estudo de Casos

IV.1- Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta no problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tal, foram utilizados três sistemas muito comuns nos estudos de planejamento da expansão da transmissão: o sistema acadêmico proposto por Garver, o sistema IEEE 24 barras e o sistema equivalente Sul brasileiro. Os dados destes sistemas podem ser consultados no Apêndice A.

Conforme discutido no capítulo anterior, a metodologia proposta neste trabalho faz uso de importantes informações heurísticas obtidas em [9] e utiliza o CFPA para identificação do plano ótimo de expansão do sistema. Contudo, de forma a evidenciar os progressos obtidos durante o estudo, os resultados serão apresentados, para cada sistema, em três etapas:

- Na primeira simulação o algoritmo padrão do FPA, proposto em [37], será utilizado na obtenção do plano de expansão. Nesta análise, todas as rotas originalmente candidatas à expansão do sistema serão consideradas, ou seja,

as informações oriundas do AHC não serão utilizadas nesta etapa de simulação.

- Posteriormente, a fim de ressaltar o ganho em desempenho obtido pelas modificações realizadas no FPA padrão, o algoritmo CFPA proposto é utilizado. Assim como na primeira etapa de simulação, as informações heurísticas também não são utilizadas neste momento.
- Por fim, a metodologia proposta é utilizada em sua forma completa na terceira simulação. Nesta análise, as informações heurísticas advindas do AHC [9] são utilizadas como dado de entrada do CFPA, o qual é responsável pela obtenção do plano de expansão. Esta etapa evidencia os benefícios da aplicação conjunta da busca multimodal e das informações heurísticas.

Os resultados obtidos são comparados com alguns dos existentes na literatura especializada, de modo a avaliar a eficácia da metodologia proposta.

IV.2- Parâmetros Utilizados

A modelagem apresentada para resolução do problema de planejamento da expansão da rede de transmissão apresenta alguns parâmetros que devem ser inicializados pelo usuário. A seguir são apresentados os valores adotados nas simulações realizadas, objetivando a comparação com outros trabalhos da área:

- Tolerância (ϵ) para o corte de carga total permitido ao sistema: 1 MW.
- Número de indivíduos da população no FPA e no CFPA: 200 flores.
- Número máximo de iterações: 100.

Dado que o número de indivíduos, ou partículas, da população é 200 e que as simulações são realizadas em 100 iterações, o algoritmo deve resolver um total de 20.000 problemas de otimização na busca pela solução ótima global.

IV.3- Sistema Garver

O sistema acadêmico proposto por Garver é um sistema de pequeno porte, mas que já é capaz de ilustrar as principais dificuldades encontradas na resolução do problema de planejamento da expansão da rede de transmissão, razão pela qual é muito conhecido na literatura especializada.

Este sistema é composto por seis barras, seis circuitos existentes na topologia base, 15 circuitos candidatos à expansão da rede e uma demanda de 760 MW prevista para o horizonte de planejamento. A Figura IV.1 apresenta a rede de Garver, onde é possível observar que se trata de um sistema não conexo, apresentando uma barra isolada.

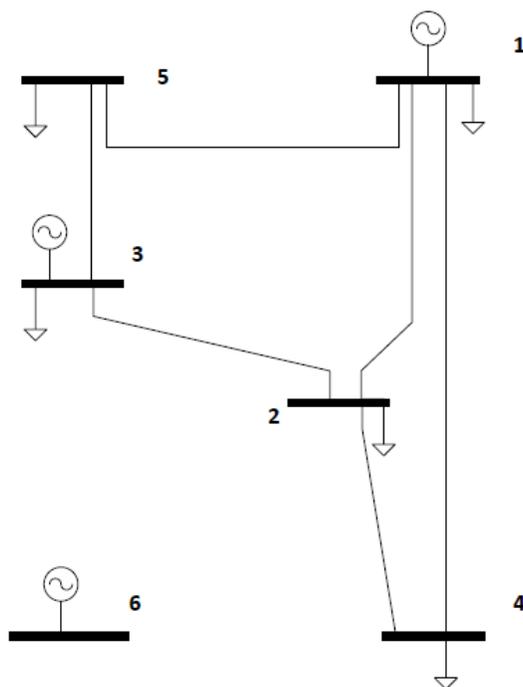


Figura IV. 1 - Sistema Garver

Comumente, nos estudos de planejamento da expansão da transmissão, os sistemas são avaliados perante duas alternativas: uma em que se permite o redespacho de geração de potência ativa, e outra em que o despacho é predeterminado, sendo, portanto, um caso mais restritivo e de solução mais complexa. A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada uma das alternativas citadas.

IV.3.1- Sistema Garver com Redespacho de Geração

Neste primeiro caso, considera-se a possibilidade de redespacho das unidades geradoras para atendimento à carga, o que torna o sistema elétrico mais flexível do ponto de vista do planejamento e operação.

Para o sistema Garver com redespacho de geração, considera-se um número máximo de três expansões por caminho candidato, ou seja, é permitida a construção de até três circuitos elétricos em cada rota candidata à expansão. A partir do valor do número máximo de expansões por caminho e do número de caminhos candidatos, têm-se, para este caso, um número total de $4^{15} \approx 10^9$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente à explosão combinatorial das alternativas.

A seguir são apresentados os resultados das três simulações realizadas para o sistema Garver com redespacho de geração.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

Nesta simulação o sistema Garver com redespacho foi avaliado apenas pelo FPA, ou seja, as informações heurísticas não foram utilizadas na seleção das rotas relevantes à expansão e, dessa forma, todas as 15 rotas candidatas à expansão do sistema Garver foram consideradas. A Tabela IV.1 apresenta a solução obtida pelo FPA para o sistema Garver com redespacho de geração. Conforme pode ser visto, o plano final de expansão proposto pelo algoritmo compreende a construção de um novo circuito entre a barra três e a barra cinco e três outros circuitos unindo as barras quatro e seis do sistema.

Tabela IV. 1 – Plano Final de Expansão para o Sistema Garver com Redespacho via FPA

Rotas Seleccionadas	Número de Circuitos Construídos
3-5	1
4-6	3

A Figura IV.2 ilustra a configuração final obtida para o sistema Garver com redespacho de geração, onde as linhas tracejadas representam as expansões realizadas.

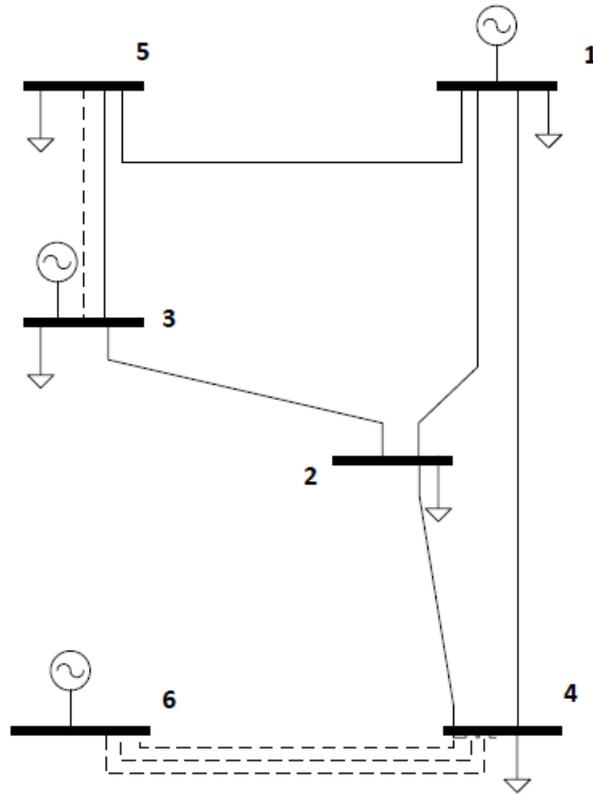


Figura IV. 2 - Plano Final de Expansão do Sistema Garver

A proposta de expansão apresentada na Tabela IV.1 tem um custo total de investimento de US\$ 110.000.000,00. A solução ótima foi obtida na 10ª iteração do processo de busca via FPA, como pode ser visto na Figura IV.3.

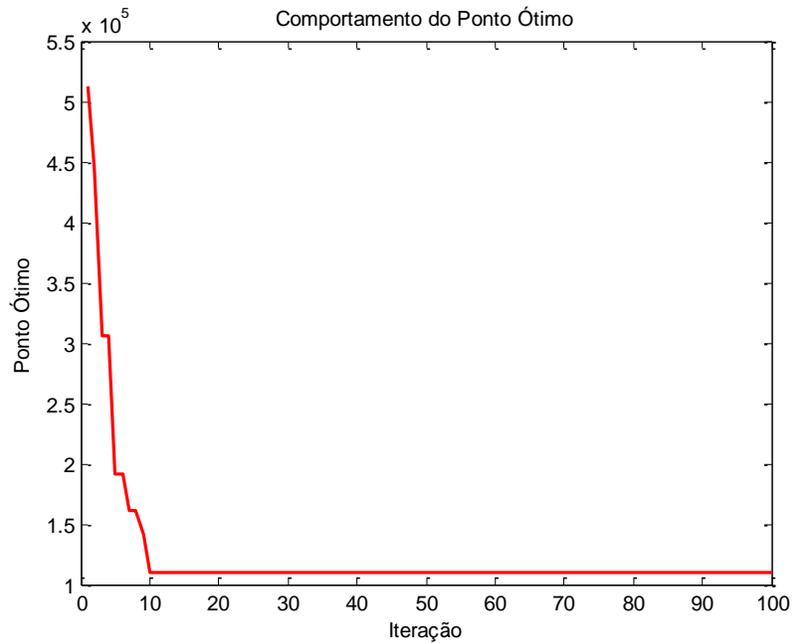


Figura IV. 3 – Convergência do Sistema Garver com Redespacho via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

Nesta etapa é realizada uma simulação equivalente à anterior, ou seja, sem informações heurísticas. A diferença consiste na utilização do algoritmo multimodal CFPA, modificado a partir do FPA. O plano final de expansão corresponde ao mesmo plano obtido na etapa anterior, conforme Tabela IV.1, sendo que a solução ótima foi encontrada na 8ª iteração do processo de busca via CFPA, como pode ser visto na Figura IV.4.

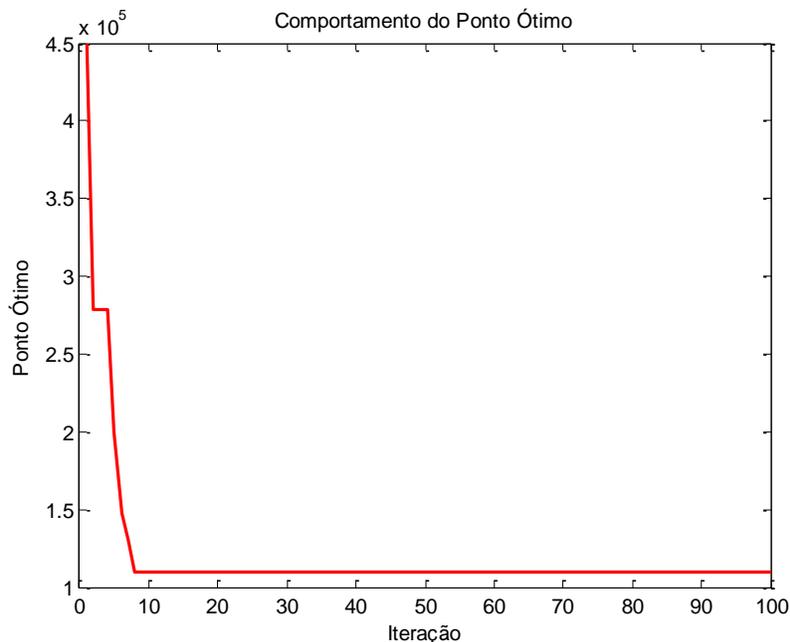


Figura IV. 4 - Convergência do Sistema Garver com Redespacho via CFPA

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

Nesta simulação as informações advindas do Algoritmo Heurístico Construtivo foram utilizadas juntamente com o CFPA na obtenção do plano de expansão do sistema elétrico. Em [9], o AHC foi simulado 50 vezes e um conjunto de rotas preferenciais para expansão do sistema Garver com reprogramação de geração foi definido. O conjunto de rotas reduzidas é apresentado na Tabela IV.2.

Tabela IV. 2 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema Garver com Redespacho

Rotas Selecionadas pelo AHC
2-3, 2-6, <u>3-5</u> , <u>4-6</u> e 5-6

Das 15 rotas existentes originalmente no conjunto candidato à expansão, apenas cinco foram selecionadas, representando uma redução de aproximadamente 67% das alternativas de expansão. Assim, o número de combinações de investimento caiu de $4^{15} \approx 10^9$ para $4^5 = 1024$. Vale ressaltar que as rotas que fazem parte do plano de expansão ótimo para o sistema Garver com redespacho de geração estão contidas no conjunto reduzido, destacadas na Tabela IV.2 em negrito e sublinhado, o que é essencial para sucesso do método.

Outra informação relevante que se pode extrair ao simular o AHC, além do conjunto reduzido de rotas, são as soluções finais encontradas, ou seja, os planos de expansão propostos pelo método heurístico. Dos 50 planos de expansão, resultantes das 50 simulações do AHC, escolheu-se aquele que apresentava menor custo para compor as soluções iniciais do CFPA. Desta forma, o processo bioinspirado parte de um ponto de melhor qualidade.

O plano final de expansão obtido pelo CFPA, considerando as rotas pré-selecionadas pelo AHC e a solução inicial heurística, é o mesmo obtido anteriormente para o sistema Garver com redespacho, apresentado na Tabela IV.1, tendo um custo total de investimento de US\$ 110.000.000,00. Este é o custo ótimo de expansão conhecido na literatura especializada [12], [14], [27].

A redução no espaço de busca e a solução inicial heurística proporcionam maior rapidez e eficiência ao processo iterativo, como pode ser comprovado pelo gráfico de convergência da Figura IV.5, que mostra que a solução ótima foi obtida na primeira iteração.

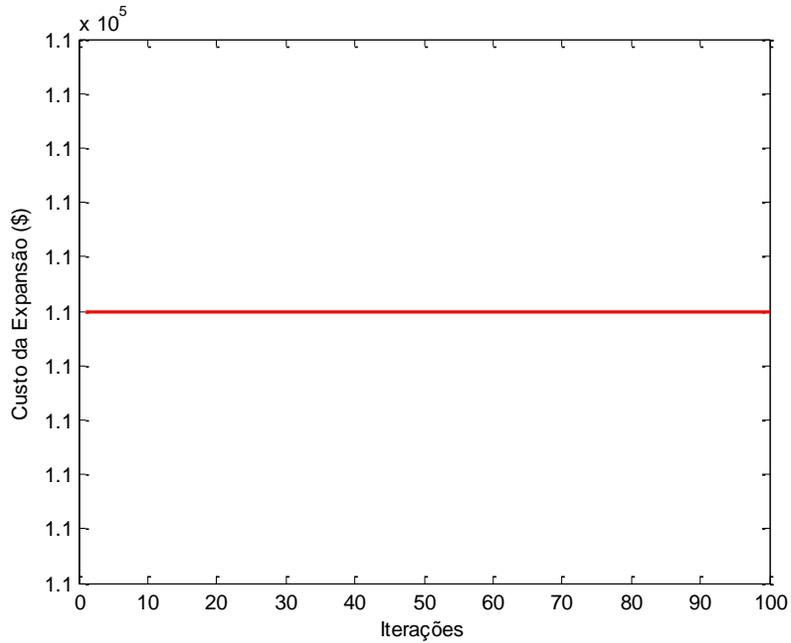


Figura IV. 5 - Convergência do Sistema Garver com Redespacho via CFPA e AHC

IV.3.2- Sistema Garver sem Redespacho de Geração

No sistema Garver sem redespacho de geração considera-se que as unidades geradoras possuem despachos de potência ativa predefinidos, o que pode dificultar o atendimento à demanda. Por este motivo, os sistemas elétricos sem redespacho de geração são de solução mais complexa e, em geral, apresentam custos de investimento na expansão mais elevados que os casos onde o redespacho de geração é permitido para atendimento às solicitações.

Considera-se um número máximo de quatro expansões por caminho candidato para este sistema, ou seja, para cada rota candidata têm-se a opção de construção de até quatro circuitos. Dado que existem 15 rotas candidatas e que é também uma opção a não construção de circuitos em determinada rota, o número total de combinações de investimento neste sistema é da ordem de $5^{15} \approx 3 * 10^{10}$. A seguir são apresentados os resultados das três simulações realizadas.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

Nesta primeira análise todas as 15 rotas originalmente candidatas à expansão do sistema Garver foram consideradas na busca. A Tabela IV.3 apresenta o plano final de expansão obtido pelo FPA para o sistema Garver sem redespacho de geração.

Tabela IV. 3 - Plano Final de Expansão para o Sistema Garver sem Redespacho via FPA

Rotas Selecionadas	Número de Circuitos Construídos
2-6	4
3-5	1
4-6	2

O plano de expansão apresentado na Tabela IV.3 compreende a construção de sete novos circuitos, distribuídos em três rotas, e possui um custo total de investimento no sistema de transmissão de US\$ 200.000.000,00. A Figura IV.6 ilustra o gráfico de convergência do processo de busca, onde se observa que a solução ótima foi obtida após 49 iterações.

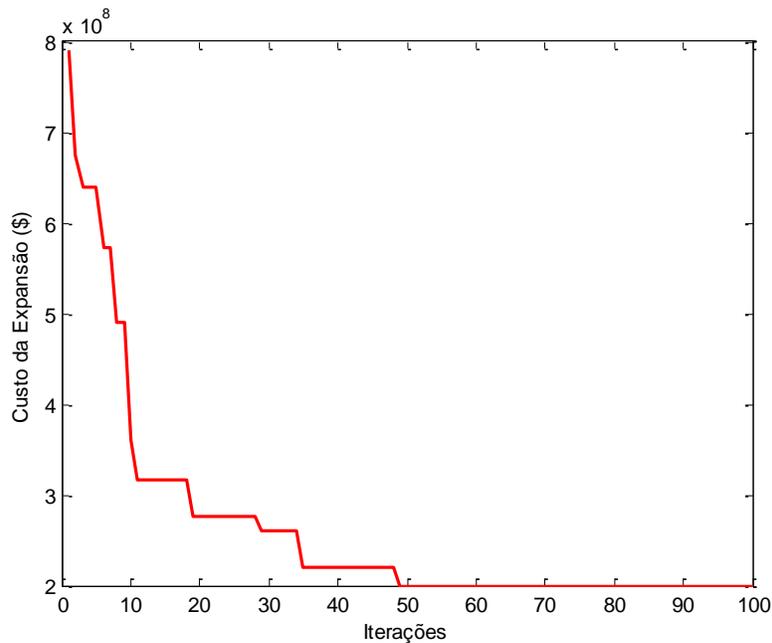


Figura IV. 6 - Convergência do Sistema Garver sem Redespacho via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

Nesta análise utiliza-se o CFPA para otimização da expansão do sistema, considerando todas as 15 rotas candidatas à construção de novos circuitos. O plano final obtido pelo CFPA corresponde ao mesmo encontrado anteriormente pelo FPA e apresentado na Tabela IV.3. A convergência do processo iterativo foi alcançada na iteração 28, conforme Figura IV.7.

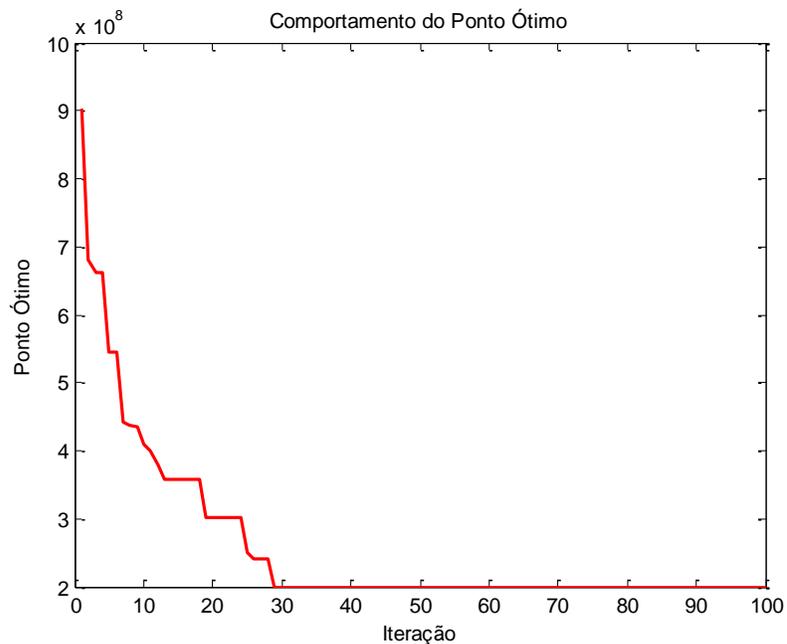


Figura IV. 7 - Convergência do Sistema Garver sem Redespacho via CFPA

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

Nesta última análise foram utilizadas as informações advindas do Algoritmo Heurístico Construtivo, conforme apresentado em [9]. Assim, um conjunto reduzido de alternativas de expansão e a melhor solução obtida pelo AHC foram utilizados juntamente com o CFPA na obtenção do plano de expansão do sistema elétrico. A Tabela IV.4 mostra as rotas selecionadas pelo AHC.

Tabela IV. 4 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema Garver sem Redespacho

Rotas Selecionadas pelo AHC
1-5, 1-6, 2-4, 2-5, <u>2-6</u> , 3-4, <u>3-5</u> , 3-6, 4-5, <u>4-6</u> e 5-6

Onze das 15 rotas existentes originalmente no conjunto candidato foram selecionadas, representando uma redução de cerca 27% das alternativas de expansão. Assim, o número de combinações de investimento caiu de $5^{15} \approx 3 * 10^{10}$ para $5^{11} \approx 4,8 * 10^7$. O plano final de expansão obtido nesta simulação é o mesmo obtido anteriormente para o sistema Garver sem redespacho, apresentado na Tabela IV.3, tendo um custo total de investimento de US\$ 200.000.000,00. Este é o custo referente ao plano de expansão ótimo conhecido na literatura para o sistema Garver sem redespacho de geração [12], [14], [19].

A redução no espaço de busca e a solução inicial heurística proporcionam maior rapidez e eficiência ao processo, como pode ser comprovado pelo gráfico de convergência da Figura IV.8, que mostra que a solução ótima foi obtida na 7ª iteração.

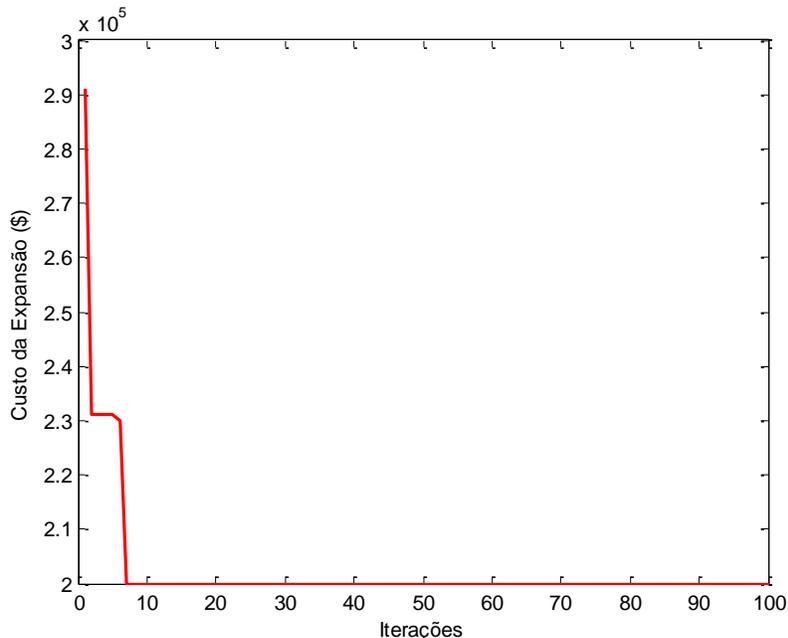


Figura IV. 8 - Convergência do Sistema Garver sem Redespacho via CFPA e AHC

IV.4- Sistema IEEE 24 Barras

O sistema IEEE 24 barras vem sendo muito utilizado em trabalhos recentes na validação de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Este sistema é composto por 24 barras, 38 circuitos existentes na topologia base, 41 circuitos candidatos à expansão da rede, uma demanda total de 8.550 MW a ser suprida e cinco diferentes planos de geração. Dentre esses planos ou cenários, existe um que corresponde ao planejamento com reprogramação da geração, o qual é conhecido como cenário G0, e possui capacidade de geração de 10.251 MW. Nos demais cenários (G1, G2, G3 e G4), a capacidade total de geração é de 8.550 MW e o plano de geração é previamente especificado, não sendo, portanto, permitido o redespacho das unidades geradoras.

Cada um dos cinco cenários do sistema IEEE 24 barras conta com um total de 10 unidades de geração. Para os diferentes planos de geração, diferentes são os despachos de potência ativa das unidades geradoras em cada barramento. Os dados deste sistema podem ser consultados no Apêndice A deste trabalho, e seu diagrama é ilustrado na Figura IV.9.

Para todos os cinco planos de geração do sistema IEEE 24 barras, considera-se um número máximo de três circuitos a serem construídos em cada rota candidata à expansão. Sendo assim, para as 41 rotas candidatas à expansão, e dado que existe um total de quatro alternativas para cada rota, lembrando que é também uma opção a não construção de circuitos, têm-se um total de $4^{41} \approx 4,8 * 10^{24}$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os planos de geração G0, G1 e G2 do sistema IEEE 24 barras. Por simplicidade na apresentação de resultados, optou-se por não apresentar os planos de geração G3 e G4, tendo em vista que apenas os três primeiros cenários já são capazes de ilustrar de forma eficaz a aplicação da metodologia proposta.

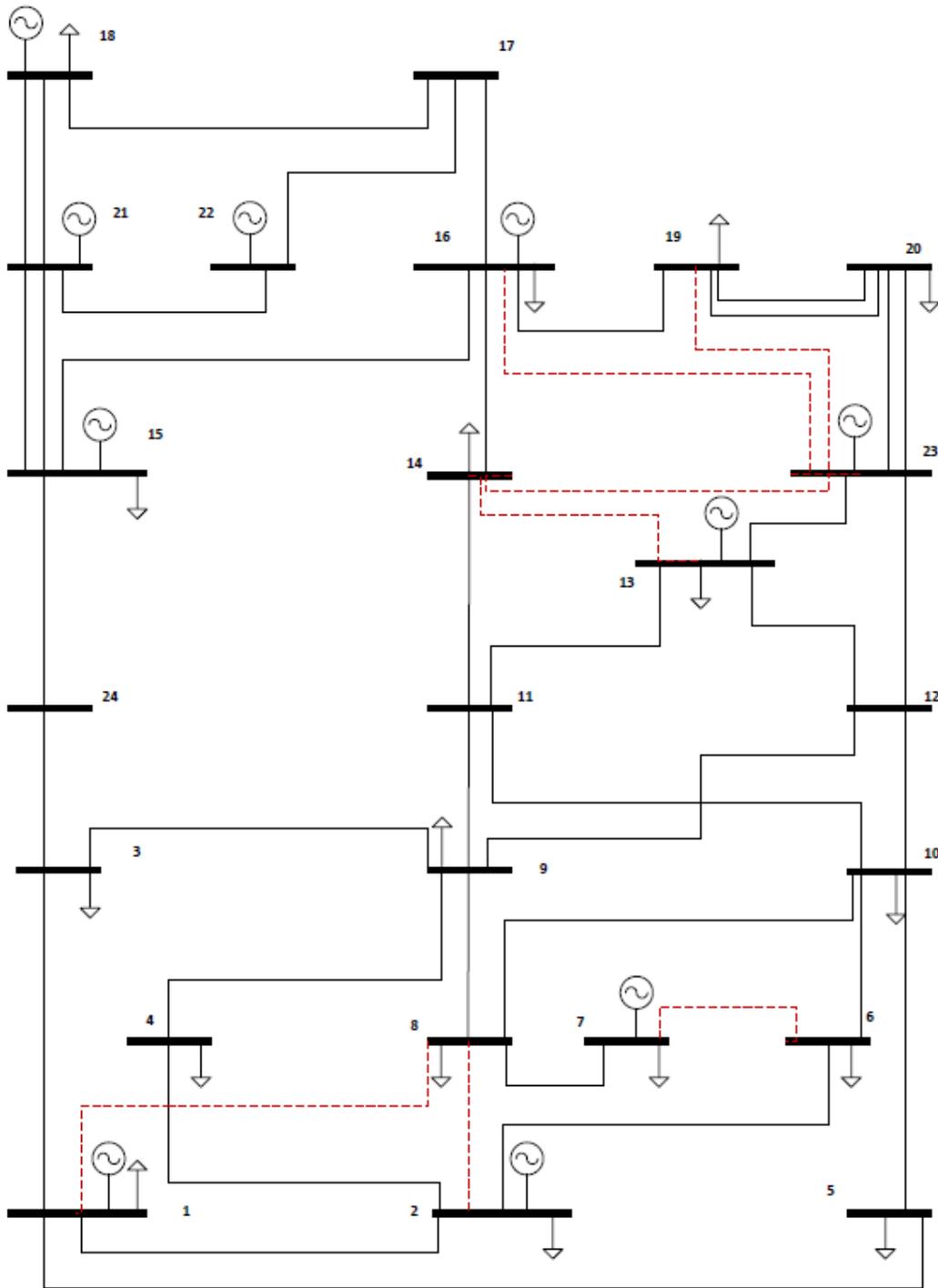


Figura IV. 9 - Sistema IEEE 24 Barras

IV.4.1- Sistema IEEE 24 Barras – Cenário G0

Dentre os cinco planos de geração do sistema IEEE 24 barras, o cenário G0 é o de mais simples solução, em função da reprogramação, ou redespacho de geração de potência, ser permitida para atendimento à demanda.

Seguindo a dinâmica proposta, são apresentados inicialmente os resultados obtidos pela aplicação exclusiva do FPA, em seguida os resultados encontrados pelo CFPA e, na sequência, os resultados obtidos pela aplicação conjunta do CFPA e das informações do Algoritmo Heurístico Construtivo.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

Nesta primeira simulação o FPA foi submetido a um problema de maior porte, haja vista a consideração de todas as 41 rotas originalmente candidatas à expansão do sistema de 24 barras, onde o número de combinações de investimento possíveis é da ordem de $4^{41} \approx 4,8 * 10^{24}$.

O plano de obras para expansão da rede, proposto pelo FPA, inclui cinco novos circuitos, alocados em quatro rotas, como apresentado na Tabela IV.5. Este plano corresponde à solução ótima conhecida na literatura para o cenário G0 do sistema IEEE 24 barras, conforme [9] e [29].

Tabela IV. 5 - Plano Final de Expansão para o Sistema IEEE 24 Barras (G0) via FPA

Rotas Selecionadas	Número de Circuitos Construídos
06-10	1
07-08	2
10-12	1
14-16	1

A proposta de expansão apresentada pelo algoritmo tem um custo total de investimento de US\$ 152.000.000,00. A solução ótima foi obtida na 48ª iteração do processo de busca via FPA, como pode ser visto na Figura IV.10.

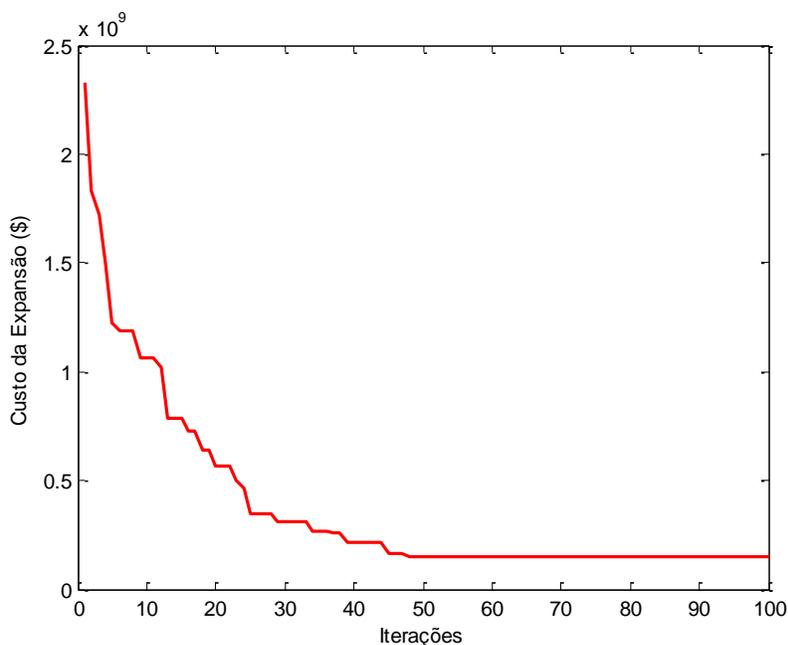


Figura IV. 10 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G0) via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

O CFPA obteve o mesmo plano de expansão apresentado na Tabela IV.5. A solução ótima foi obtida na 34ª iteração do processo de busca multimodal, como pode ser visto na Figura IV.11.

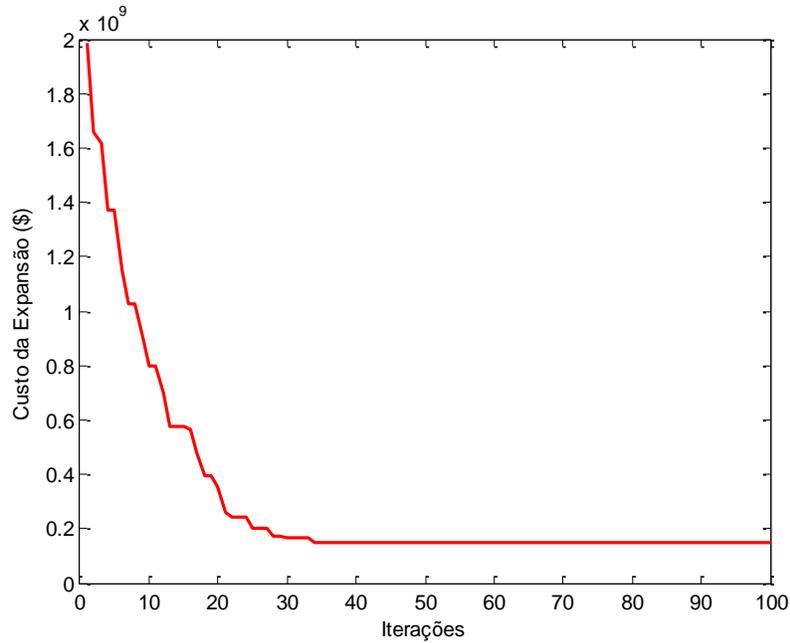


Figura IV. 11 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G0) via CFPA

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

Na terceira análise, foram utilizadas as informações oriundas do Algoritmo Heurístico Construtivo juntamente com CFPA para obtenção do plano de expansão do sistema elétrico. A Tabela IV.6 apresenta o conjunto de rotas reduzidas obtidas em [9] e utilizadas nesta simulação.

Tabela IV. 6 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema IEEE 24 Barras (G0)

Rotas Selecionadas pelo AHC
3-24, <u>6-10</u> , <u>7-8</u> , <u>10-12</u> e <u>14-16</u>

Comparando-se o plano de expansão proposto na análise anterior, apresentado na Tabela IV.5, e as rotas selecionadas pelo AHC, na Tabela IV.6, é possível observar que todas as rotas que fazem parte do plano de expansão ótimo para o cenário G0 estão contidas no conjunto reduzido, o que é de fundamental importância. Além disso, uma segunda observação diz respeito à expressiva redução do número de rotas candidatas, passando de 41 para apenas cinco, ou seja, uma redução de 88% das alternativas de expansão. Assim, o número de combinações de investimento caiu de $4^{41} \approx 4,8 * 10^{24}$ para $4^5 = 1024$. Tais observações deixam como mensagem que, para este sistema, o AHC foi muito eficiente na busca pela solução.

O plano final de expansão obtido pelo CFPA, considerando as rotas pré-selecionadas pelo AHC e a solução inicial heurística, é o mesmo obtido anteriormente para o cenário G0, apresentado na Tabela IV.5, tendo um custo total de investimento de US\$ 152.000.000,00. A expressiva redução no espaço de busca para este sistema eleva sobremaneira as possibilidades de obtenção da resposta ótima já na primeira iteração, como pode ser comprovado pelo gráfico de convergência da Figura IV.12.

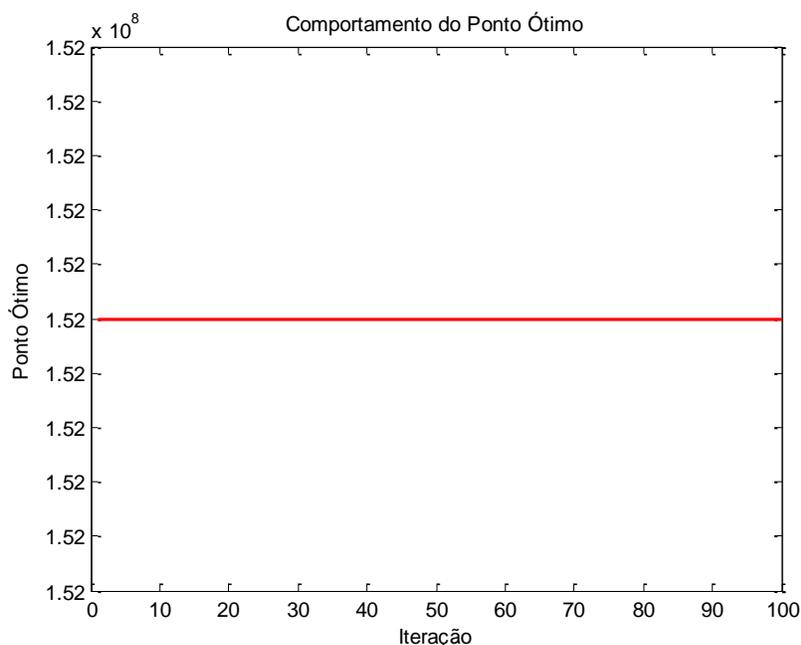


Figura IV. 12 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G0) via CFPA e AHC

IV.4.2- Sistema IEEE 24 Barras – Cenário G1

O cenário de geração G1 é um dos quatro desdobramentos da versão sem reprogramação do sistema IEEE 24 barras. Nesta situação, a capacidade de geração de energia é equivalente à demanda total do sistema, o que torna a otimização da expansão da transmissão uma tarefa árdua.

De forma semelhante ao tratamento dos sistemas anteriores, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação apenas do FPA e do CFPA e, em seguida, a aplicação do CFPA com informações do AHC.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

Como já mencionado, nos sistemas elétricos de potência onde não é permitida a reprogramação, o problema de planejamento de expansão da rede é de solução muito mais complexa e normalmente de custo mais elevado. Essa característica pode ser observada na Tabela IV.7, que apresenta o plano de expansão proposto pelo FPA para o cenário G0 do sistema IEEE 24 barras, o qual inclui 10 novos circuitos na configuração existente, representando um custo total de investimento de US\$ 370.000.000,00.

Tabela IV. 7 - Plano Final de Expansão para o Sistema IEEE 24 Barras (G1) via FPA

Rotas Seleccionadas	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

Se comparado ao plano de expansão proposto para o cenário G0, onde o redespacho de geração é permitido, é possível verificar que o número de circuitos adicionado na topologia sofre aumento de 100%, ao passo que o custo de investimento aumenta em 143% para atendimento da mesma demanda no cenário de geração G1.

O gráfico de convergência do processo iterativo pode ser visto na Figura IV.13, onde se observa que a solução ótima foi obtida na 74ª iteração.

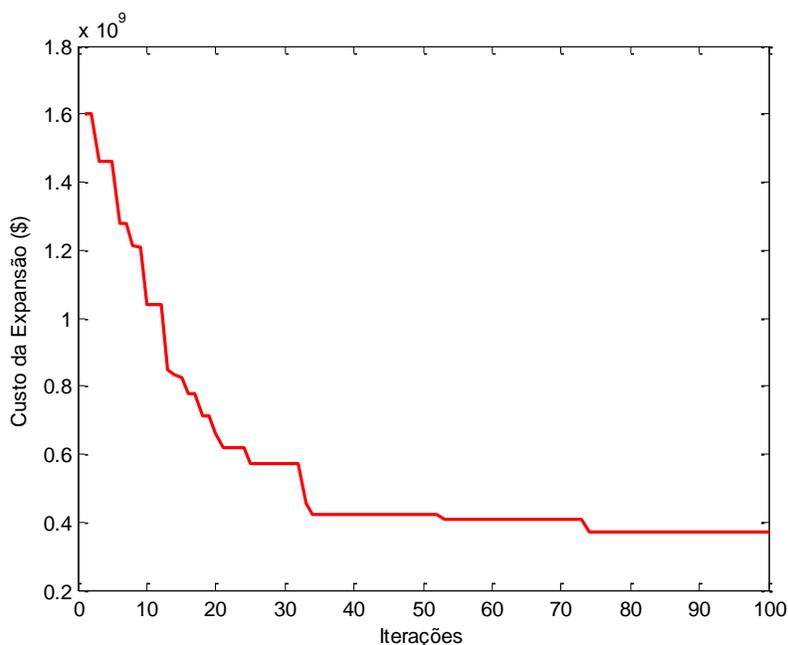


Figura IV. 13 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G1) via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

O plano de expansão fornecido pelo CFPA corresponde ao mesmo plano encontrado na análise anterior e apresentado na Tabela IV.7. Este plano corresponde à solução ótima conhecida na literatura para o cenário G1 do sistema IEEE 24 barras [9].

A convergência do processo iterativo foi obtida com 51 iterações, conforme pode ser visto na Figura IV.14.

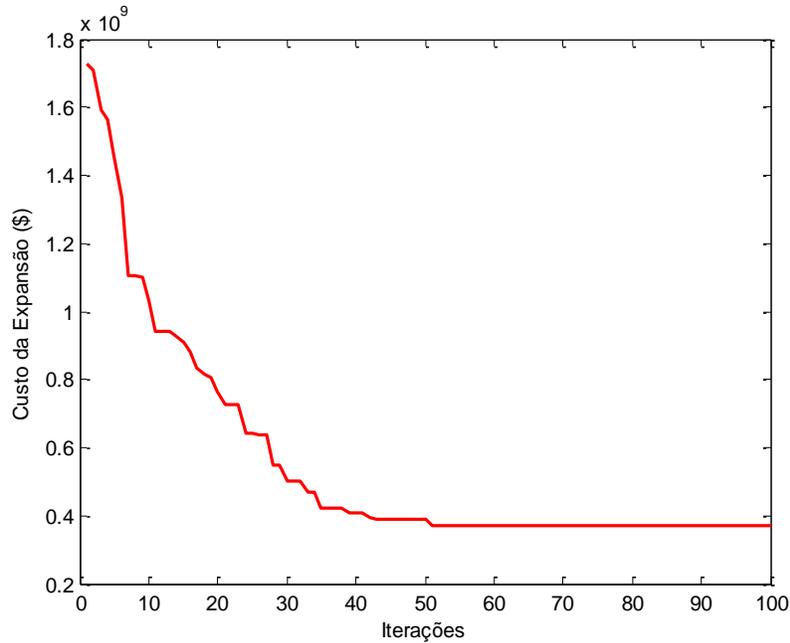


Figura IV. 14 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G1) via CFPA

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

Após 50 simulações do AHC, [9] chegou ao conjunto de rotas apresentado na Tabela IV.8, o qual compreende todos os caminhos que fazem parte do plano de expansão ótimo para o cenário G1.

Tabela IV. 8 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema IEEE 24 Barras (G1)

Rotas Selecionadas pelo AHC
<u>1-5</u>, 2-6, 2-8, <u>3-24</u>, 6-7, <u>6-10</u>, <u>7-8</u>, 10-11, 11-13, <u>14-16</u>, 15-21, <u>15-24</u>, <u>16-17</u>, <u>16-19</u>, <u>17-18</u> e 17-22

O conjunto reduzido é composto por apenas 16 caminhos candidatos, o que representa uma redução de 61% em relação as 41 rotas originalmente candidatas. Dessa forma, o número de combinações de investimento caiu de $4^{41} \approx 4,8 * 10^{24}$ para $4^{16} \approx 4,3 * 10^9$. O CFPA foi então submetido à busca pelo ótimo global explorando um conjunto reduzido de alternativas, ou seja, um espaço de busca muito menor. Além disso, a incorporação da melhor solução obtida pelo AHC na população inicial de indivíduos do CFPA permite que o algoritmo inicie o processo de busca partindo de um ponto de melhor qualidade.

O plano final de expansão obtido pelo CFPA é o mesmo obtido anteriormente para o cenário G1, apresentado na Tabela IV.7, tendo um custo total de investimento de US\$ 370.000.000,00. Muito embora a solução tenha sido a mesma, a inclusão no CFPA destas duas informações fornecidas pelo AHC permite que o algoritmo trabalhe de forma mais eficiente, como pode ser verificado pelo gráfico de convergência da Figura IV.15, que mostra que a solução ótima foi encontrada na 12ª iteração.

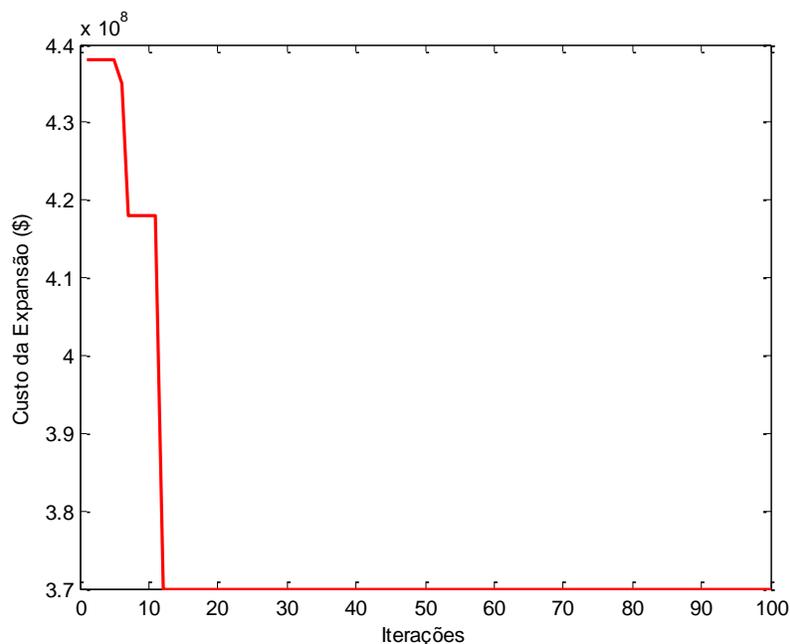


Figura IV. 15 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G1) via CFPA e AHC

IV.4.3- Sistema IEEE 24 Barras – Cenário G2

Assim como o cenário de geração G1, o cenário G2 também corresponde a um caso onde o redespacho de geração de potência ativa não é permitido, sendo a capacidade de geração de energia equivalente à demanda total do sistema. A distinção entre estes cenários é simplesmente em relação aos valores do despacho de potência ativa dos geradores, o que resulta em diferentes decisões de investimento para cada um dos cenários.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o cenário de geração G2. A primeira parte traz os resultados da aplicação do FPA, a segunda do CFPA e, em seguida, a aplicação do CFPA com informações do AHC.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

O plano de expansão da rede proposto pelo FPA é apresentado na Tabela IV.9. A solução encontrada compreende a incorporação de 11 novos circuitos no sistema elétrico, com um custo total de investimento de US\$ 403.000.000,00.

Tabela IV. 9 - Plano Final de Expansão para o Sistema IEEE 24 Barras (G2) via FPA

Rotas Seleccionadas	Número de Circuitos Construídos
02-08	1
03-24	1
06-10	1
07-08	1
10-12	1
14-16	1
15-24	1
16-17	2
17-18	2

O gráfico de convergência do processo iterativo pode ser visto na Figura IV.16, onde se observa que a solução foi obtida na 78ª iteração.

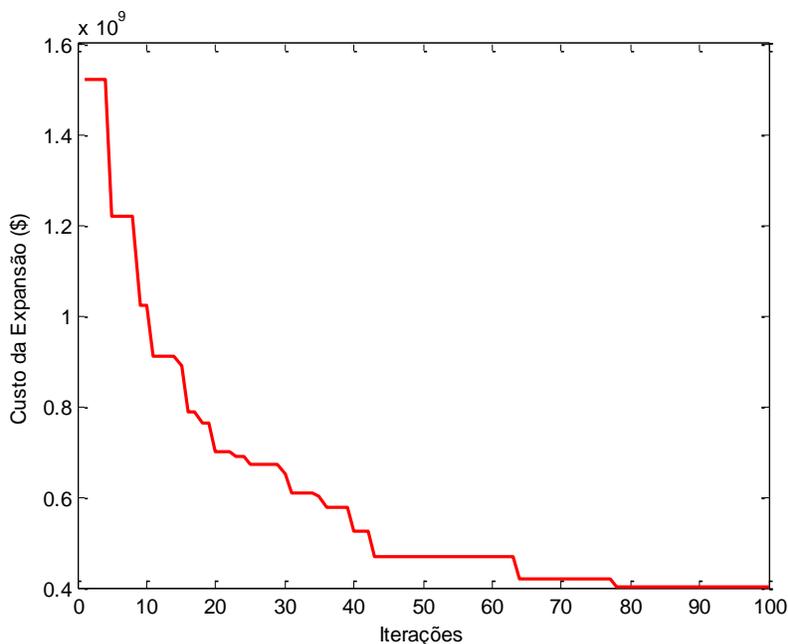


Figura IV. 16 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G2) via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

O CFPA foi utilizado nesta segunda simulação e obteve o plano de expansão da rede apresentado na Tabela IV.10. A solução encontrada compreende a incorporação de 11 novos circuitos no sistema elétrico, com um custo total de investimento de US\$ 392.000.000,00. Este plano de expansão tem custo inferior ao obtido pelo FPA, e corresponde à solução ótima conhecida na literatura para o cenário G2 do sistema IEEE 24 barras [9], [29].

Este resultado demonstra a importância do adequado planejamento da expansão da geração e da transmissão de sistemas elétricos de potência, uma vez que, a simples alteração no despacho de três das 10 máquinas existentes no sistema resultou na mudança

do plano de expansão da rede, bem como no valor do custo de investimento associado, quando comparado ao plano proposto para o cenário G1 do mesmo sistema.

Tabela IV. 10 - Plano Final de Expansão para o Sistema IEEE 24 Barras (G2) via CFPA

Rotas Seleccionadas	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
17-18	2

O gráfico de convergência do processo iterativo pode ser visto na Figura IV.17, onde se observa que a solução ótima foi obtida na 82ª iteração.

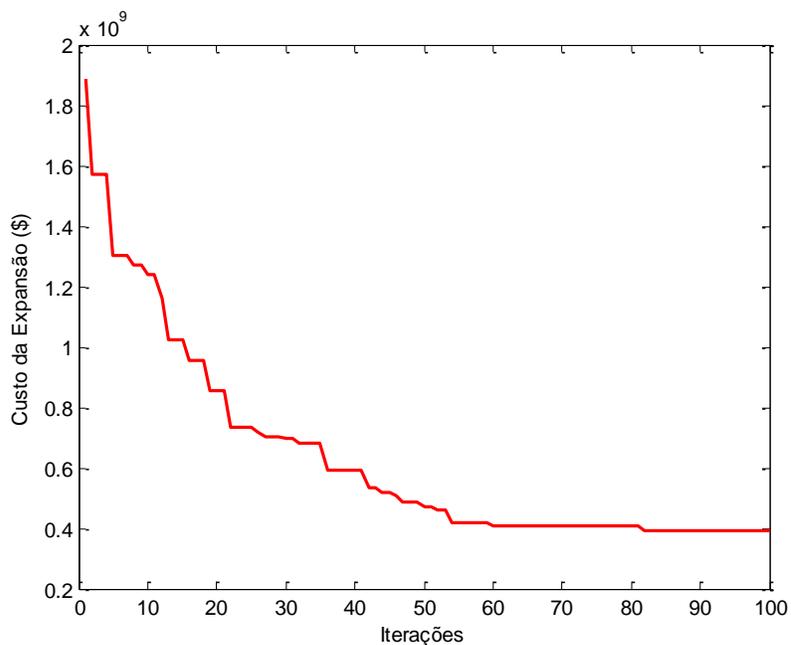


Figura IV. 17 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G2) via CFPA

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

O conjunto reduzido de caminhos candidatos à expansão do sistema IEEE 24 barras, cenário G2, é apresentado na Tabela IV.11 [9].

Tabela IV. 11 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema IEEE 24 Barras (G2)

Rotas Selecionadas pelo AHC
<u>1-5</u>, <u>3-24</u>, <u>6-10</u>, <u>7-8</u>, <u>10-12</u>, <u>14-16</u>, 15-21, <u>15-24</u>, <u>16-17</u> e <u>17-18</u>

Das 41 rotas existentes originalmente no conjunto candidato, apenas 10 foram selecionadas, representando uma redução de aproximadamente 76% das alternativas de expansão. Assim, o número de combinações de investimento caiu de $4^{41} \approx 4,8 * 10^{24}$ para $4^{10} \approx 10^5$.

O plano final de expansão obtido pelo CFPA é o mesmo obtido anteriormente para o cenário G2, apresentado na Tabela IV.10, tendo um custo total de investimento de US\$ 392.000.000,00. Apesar de a solução ter sido a mesma, a inclusão no CFPA destas duas informações fornecidas pelo AHC permite que o algoritmo trabalhe de forma mais eficiente, como pode ser verificado pelo gráfico de convergência, que mostra que a solução ótima foi encontrada na 12ª iteração.

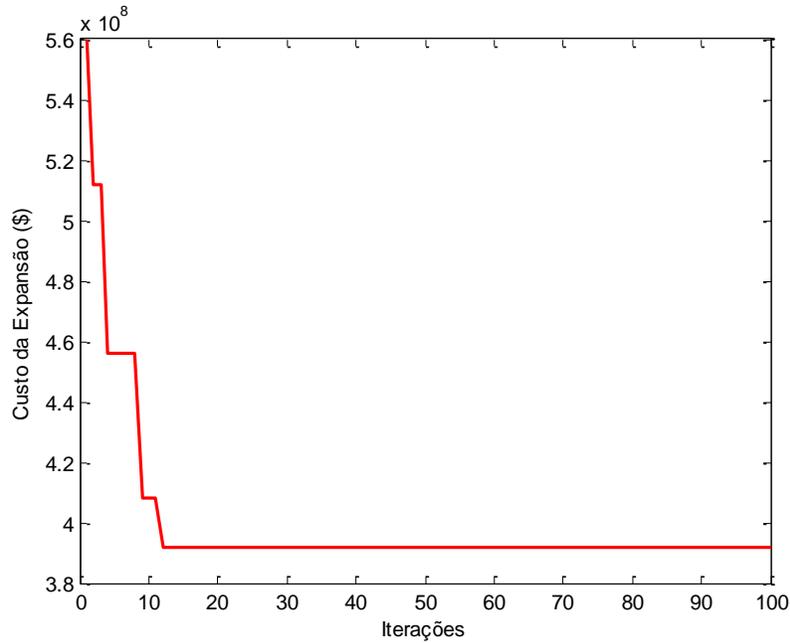


Figura IV. 18 - Convergência do Sistema IEEE 24 Barras (G2) via CFPA e AHC

IV.5- Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil

O sistema Sul é um sistema real, equivalente ao sistema elétrico da região Sul do Brasil. Foi proposto inicialmente por [4] e desde então vem sendo muito utilizado na validação de novas metodologias propostas para o problema de planejamento da expansão da rede de transmissão de energia elétrica.

A configuração da rede é composta por 46 barramentos, sendo que 11 deles são isolados do restante do sistema, e 66 circuitos. A Figura IV.19 ilustra o sistema em questão.

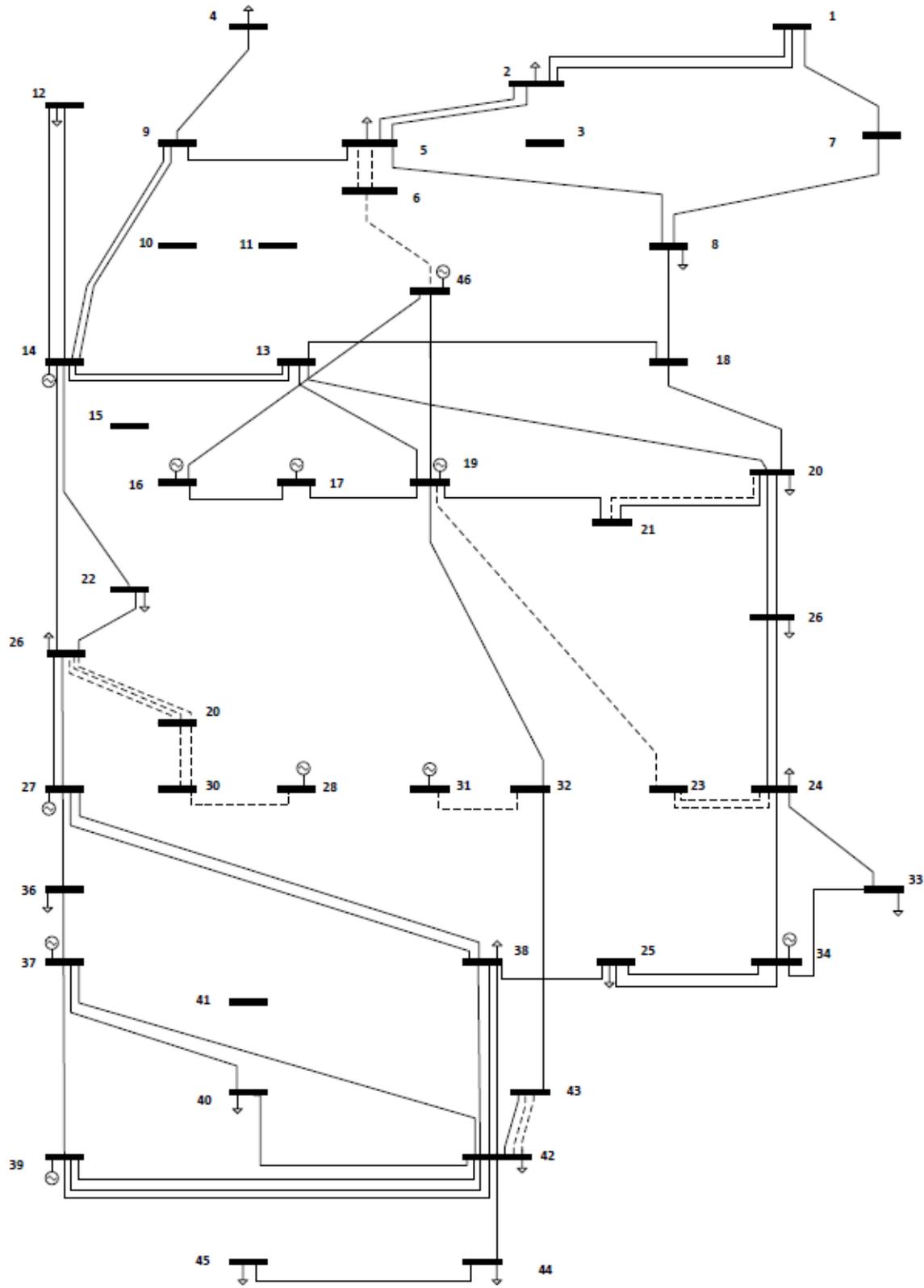


Figura IV. 19 - Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil

A demanda total a ser suprida ao longo do horizonte de planejamento é de 6.880 MW. O sistema Sul possui, para fins de expansão da rede, um total de 79 caminhos candidatos à construção de novos circuitos. Os dados deste sistema podem ser consultados no Apêndice A deste trabalho.

Mais uma vez serão consideradas duas situações, onde na primeira análise será permitida a reprogramação das unidades geradoras e, na segunda, as unidades geradoras terão os despachos de potência ativa predeterminados.

IV.5.1- Sistema Sul com Redespacho de Geração

Neste primeiro caso, considera-se a possibilidade de redespacho das unidades geradoras para atendimento à carga, o que torna o sistema elétrico mais flexível do ponto de vista do planejamento e da operação. Assim, para atendimento da demanda de 6.880 MW, o sistema em questão dispõe de uma capacidade total de geração de 9.045 MW.

Para o sistema Sul com redespacho, considera-se um número máximo de apenas duas expansões por caminho candidato. Desta forma, existe um total de $3^{79} \approx 5 * 10^{37}$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente à explosão combinatorial das alternativas.

A seguir são apresentados os resultados das três simulações realizadas para o sistema Sul com redespacho de geração.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

Nesta primeira análise o sistema Sul foi avaliado pelo FPA e todas as 79 rotas candidatas foram consideradas. A Tabela IV.12 apresenta o plano de obras proposto na transmissão, com a inclusão de oito novos circuitos e um custo total de investimento de US\$ 70.289.000,00. Este custo corresponde ao plano de expansão ótimo conhecido na

literatura para o sistema Sul com redespacho de geração, sendo confirmado pelas referências [8], [14] e [15].

Tabela IV. 12 - Plano Final de Expansão para o Sistema Sul com Redespacho via FPA

Rotas Seleccionadas	Número de Circuitos Construídos
05-06	2
13-20	1
20-21	2
20-23	1
42-43	1
46-06	1

O gráfico da Figura IV.20 mostra que a convergência foi alcançada com 87 iterações.

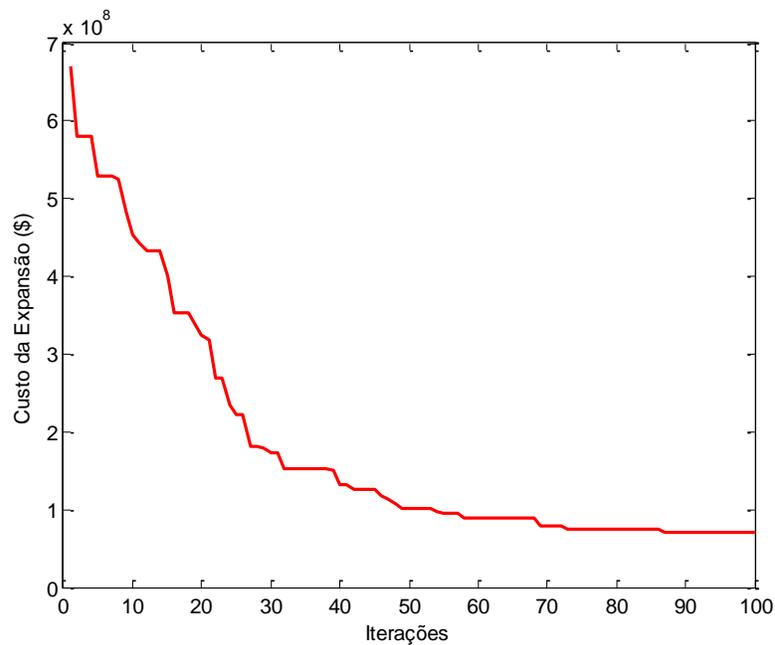


Figura IV. 20 - Convergência do Sistema Sul com Redespacho via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

O CFPA obteve o mesmo plano de expansão obtido anteriormente pelo FPA, conforme apresentado na Tabela IV.12, com custo total de investimento de US\$ 70.289.000,00. O gráfico da Figura IV.21 mostra que a convergência foi alcançada com 64 iterações.

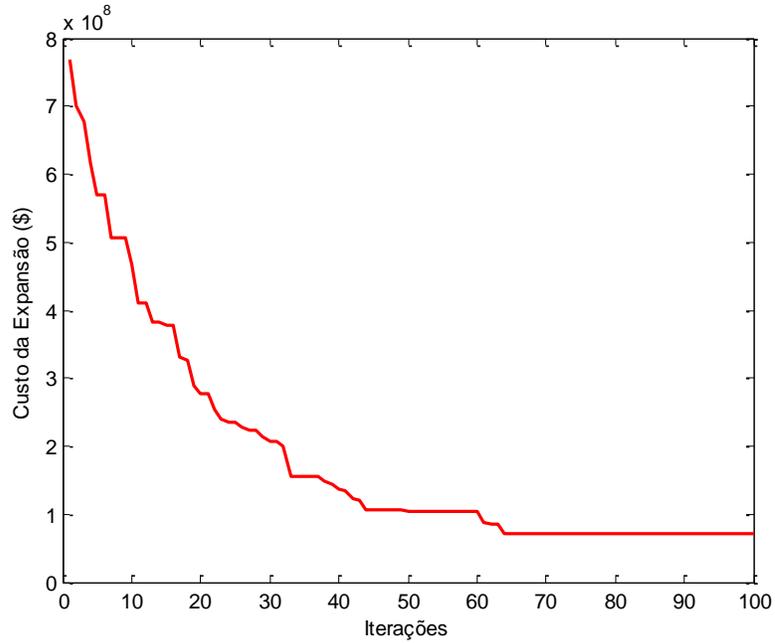


Figura IV. 21 - Convergência do Sistema Sul com Redespacho via CFPA

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

A Tabela IV.13 apresenta o conjunto das rotas mais relevantes à expansão do sistema Sul com redespacho, de acordo com o AHC [9].

Tabela IV. 13 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema Sul com Redespacho

Rotas Selecionadas pelo AHC
2-3, <u>5-6</u> , 13-18, <u>13-20</u> , 18-20, 19-21, 19-25, <u>20-21</u> , <u>20-23</u> , 21-25, 24-25, 26-29, 27-29, 28-30, 31-32, <u>42-43</u> , <u>46-06</u> e 46-11

O algoritmo heurístico foi capaz de reduzir o conjunto de rotas em 77%, passando de 79 para apenas 18 caminhos. Assim, o número de combinações de investimento caiu de $3^{79} \approx 5 * 10^{37}$ para $3^{18} \approx 4 * 10^8$. O plano final de expansão proposto pelo CFPA, a partir das informações heurísticas, é o mesmo encontrado inicialmente e apresentado na Tabela IV.12, com um custo total de investimento no sistema de US\$ 70.289.000,00. Apesar de a solução ser a mesma, o processo iterativo se mostrou mais eficiente, obtendo a solução ótima com apenas 16 iterações, como pode ser visto através do gráfico de convergência da Figura IV.22.

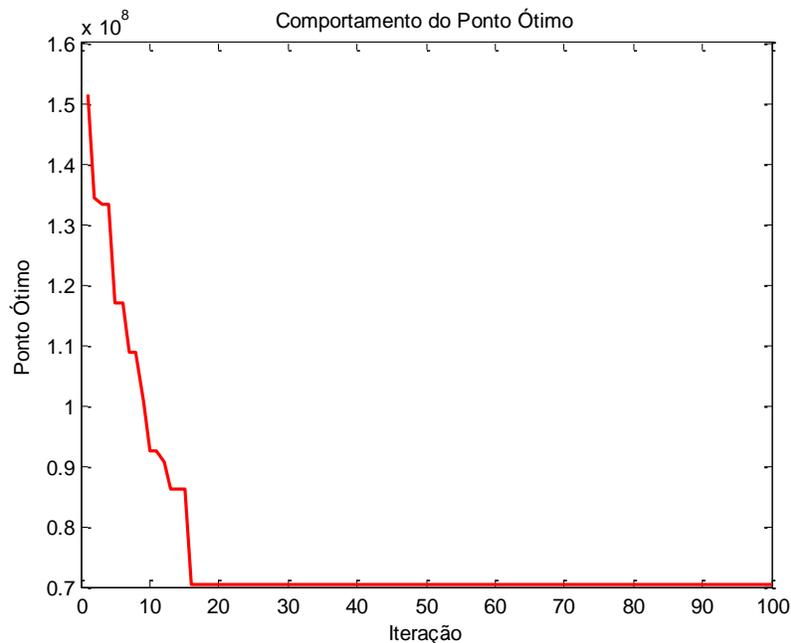


Figura IV. 22 - Convergência do Sistema Sul com Redespacho via CFPA e AHC

IV.5.2- Sistema Sul sem Redespacho de Geração

Nesta segunda análise, o despacho das máquinas do sistema é predefinido, não sendo permitida a reprogramação. Assim, a capacidade total de geração corresponde ao exato valor da demanda do sistema, de 6.880 MW, dado que este estudo é feito desconsiderando o valor de perdas. Da mesma forma que observado nas análises anteriores, é esperado que, no cenário onde a reprogramação de geração é travada, o custo de investimento na expansão do sistema seja mais elevado, haja vista que a rede se torna menos flexível.

Para o sistema Sul sem redespacho de geração, considera-se um número máximo de três expansões por caminho candidato, ou seja, é permitida a construção de até três circuitos elétricos em cada rota candidata à expansão. Desta forma, existe um total de $4^{79} \approx 3,6 * 10^{47}$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente à explosão combinatorial das alternativas.

A seguir são apresentados os resultados das simulações realizadas para o sistema Sul sem redespacho de geração.

- 1ª Análise: Otimização via FPA

Neste caso, o sistema foi avaliado pelo FPA, sendo consideradas todas as 79 rotas candidatas à expansão. Como visto a pouco, isso equivale a dizer que o FPA foi submetido a um problema com $4^{79} \approx 3,6 * 10^{47}$ possibilidades de solução. Essa explosão combinatorial das alternativas de expansão resulta na dificuldade do algoritmo em encontrar a solução ótima global.

A Tabela IV.14 apresenta o plano de obras proposto na transmissão, com a inclusão de 20 novos circuitos e um custo total de investimento de US\$ 181.371.000,00.

Tabela IV. 14 - Plano Final de Expansão para o Sistema Sul sem Redespacho via FPA

Rotas Seleccionadas	Número de Circuitos Construídos
05-06	2
19-25	1
20-21	1
24-25	3
26-29	3
28-30	1
29-30	3
31-32	1
37-39	1
42-43	3
46-06	1

O gráfico da Figura IV.23 ilustra o comportamento do ponto ótimo durante o processo iterativo, onde se observa que a convergência foi alcançada após 88 iterações.

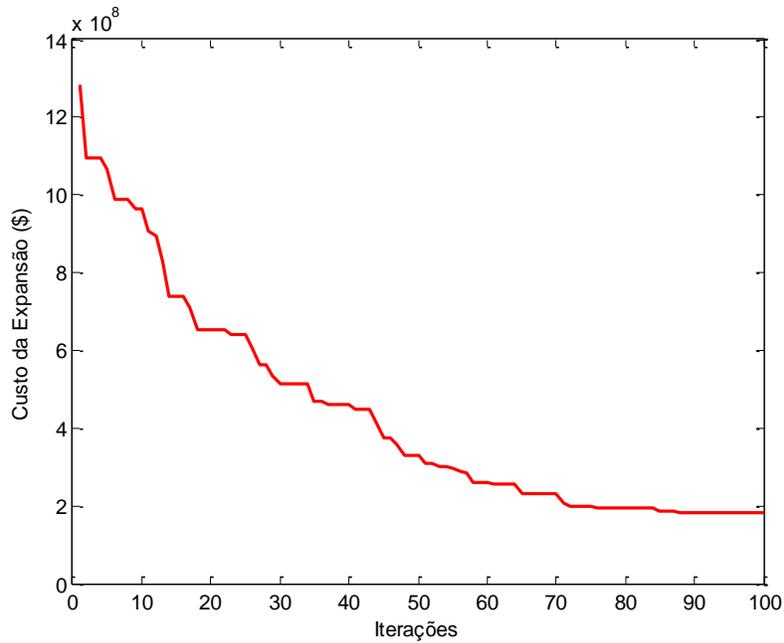


Figura IV. 23 - Convergência do Sistema Sul sem Redespacho via FPA

- 2ª Análise: Otimização via CFPA

Utilizando o CFPA na otimização da expansão do sistema Sul sem redespacho, foi possível determinar um plano de expansão mais econômico em relação ao obtido pelo FPA, com custo de investimento de US\$ 177.632.000,00. O plano de obras proposto no sistema pode ser visto na Tabela IV.15.

A solução encontrada pelo CFPA nesta simulação, apesar de apresentar custo reduzido em relação à análise anterior, ainda não corresponde ao ótimo global conhecido para o sistema Sul sem redespacho de geração. A melhor solução encontrada na literatura para este sistema corresponde a um custo total de investimento de US\$ 154.420.000,00 [12] e [15].

Tabela IV. 15 - Plano Final de Expansão para o Sistema Sul sem Redespacho via CFPA

Rotas Seleccionadas	Número de Circuitos Construídos
05-06	2
20-21	1
24-25	3
25-32	1
28-31	1
31-32	1
32-43	1
42-43	3
46-06	1

O gráfico da Figura IV.24 ilustra o comportamento do ponto ótimo durante o processo iterativo, onde se observa que a convergência foi alcançada ao final do processo.

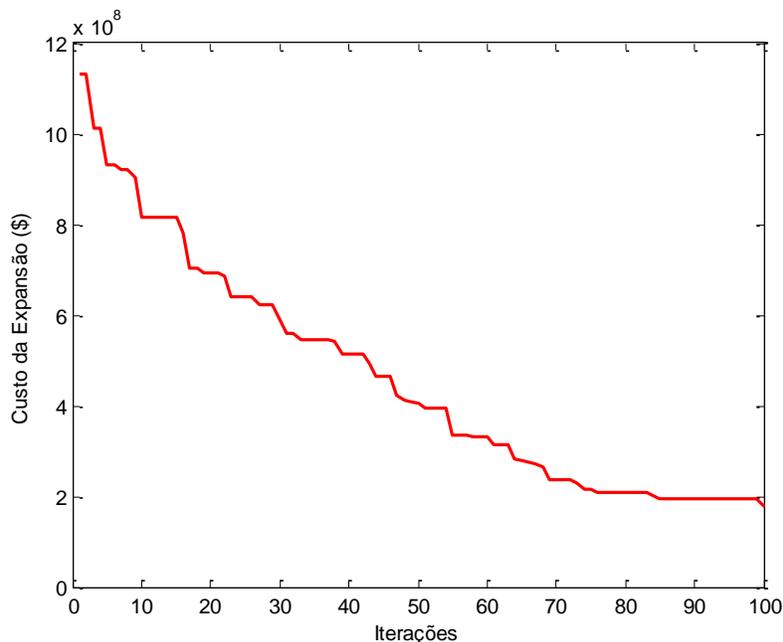


Figura IV. 24 - Convergência do Sistema Sul sem Redespacho via CFPA

É possível observar, através do gráfico da Figura IV.24, que o processo de busca via CFPA ainda apresentava evolução no momento em que foi interrompido pelo critério de parada previamente estabelecido (número máximo de iterações igual a 100). Em virtude disso, excepcionalmente para o sistema Sul sem redespacho de geração, considerou-se estender o número de iterações até o valor máximo de 500, no intuito de investigar se o processo continua evoluindo até o valor ótimo conhecido ou se acaba por sofrer estagnação em algum ponto ótimo local.

Os resultados apresentados através da Tabela IV.16 e Figura IV.25 mostram que, com a adoção desta flexibilização do número máximo de iterações, o CFPA foi capaz de manter a evolução no processo de busca e determinar, após 252 iterações, o plano de obras mais econômico para o sistema em análise, com custo total de investimento no sistema de US\$ 154.420.000,00 [12] [15].

Tabela IV. 16 - Plano Final de Expansão para o Sistema Sul sem Redespacho via CFPA – 500 iterações

Rotas Seleccionadas	Número de Circuitos Construídos
05-06	2
19-25	1
20-21	1
24-25	2
26-29	3
28-30	1
29-30	2
31-32	1
42-43	2
46-06	1

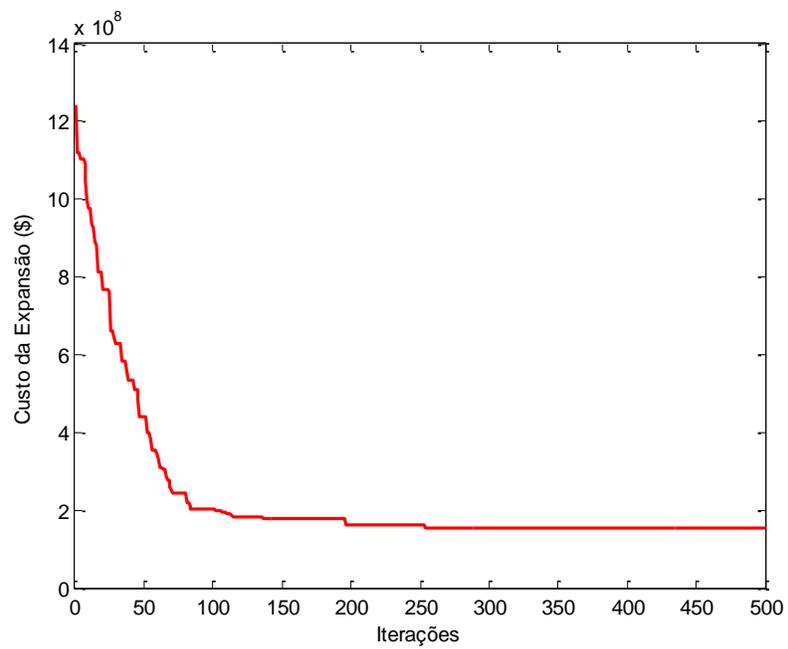


Figura IV. 25 - Convergência do Sistema Sul sem Redespacho via CFPA – 500 iterações

- 3ª Análise: Otimização via CFPA e Informações Heurísticas

Os resultados do AHC [9] foram utilizados nessa análise para subsidiar a busca pelo plano de expansão ótimo via CFPA. A Tabela IV.17 apresenta o conjunto das rotas mais relevantes à expansão do sistema Sul sem redespacho de geração. Neste caso, a utilização prévia do AHC culminou na redução do conjunto de rotas em 58%, passando de 79 para apenas 33 caminhos. Assim, o número de combinações de investimento caiu de $4^{79} \approx 3,6 * 10^{47}$ para $4^{33} \approx 7,3 * 10^{19}$.

Além da importante redução do conjunto de caminhos candidatos, a solução de melhor qualidade obtida pelo AHC foi utilizada na inicialização da população de indivíduos do FPA, proporcionando um ponto de partida mais adequado para o processo de busca multimodal.

Tabela IV. 17 - Conjunto Reduzido de Rotas (AHC) para o Sistema Sul sem Redespacho

Rotas Selecionadas pelo AHC
2-3, 2-5, <u>5-6</u> , 5-8, 13-18, 14-15, 16-28, 18-20, 19-21, <u>19-25</u> , <u>20-21</u> , 20-23, 21-25, <u>24-25</u> , 25-32, <u>26-29</u> , 27-29, 27-38, <u>28-30</u> , 28-31, 28-41, 28-43, <u>29-30</u> , <u>31-32</u> , 31-41, 32-41, 32-43, 40-41, 40-45, 41-43, <u>42-43</u> , 46-3 e <u>46-06</u>

A estratégia adotada propiciou uma exploração mais inteligente e eficaz do espaço de busca, levando o CFPA à obtenção do plano de expansão ótimo conhecido na literatura, mesmo considerando apenas 100 iterações no processo. A solução proposta é a mesma apresentada na Tabela IV.16 e tem um custo total de US\$ 154.420.000,00 em investimento no sistema de transmissão.

A Figura IV.26 mostra o gráfico de convergência do processo iterativo, onde se verifica que a solução ótima foi obtida na 52ª iteração.

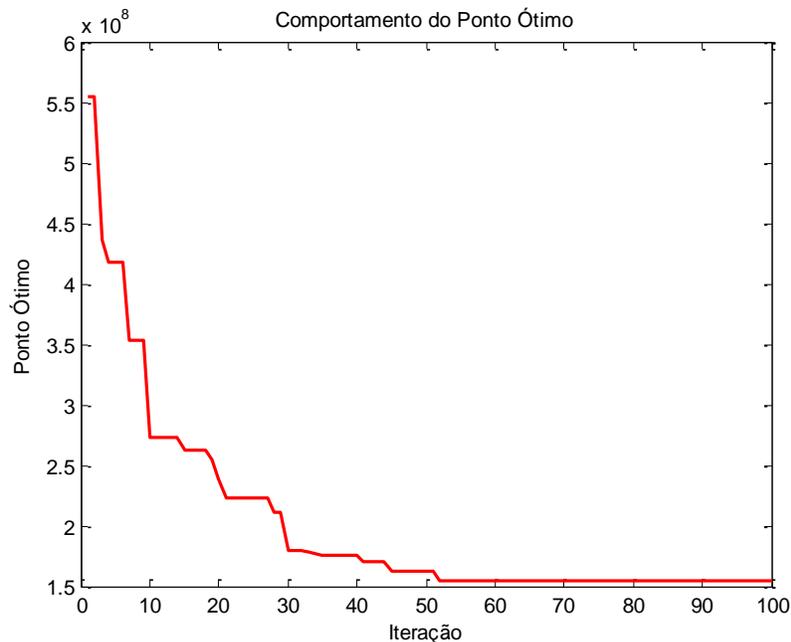


Figura IV. 26 - Convergência do Sistema Sul sem Redespacho via CFPA e AHC

Por se tratar de uma técnica Metaheurística, a metodologia proposta neste trabalho não garante que o ótimo global seja obtido em todas as simulações realizadas. Sendo assim, de forma a se identificar a obtenção da otimalidade, cada sistema foi simulado 50 vezes e calculou-se o percentual de vezes que a solução ótima global foi encontrada. Neste ponto, destaca-se que esta análise foi realizada apenas no caso padrão das simulações, que consideram número máximo de iterações igual a 100.

Os valores encontrados são apresentados nas Tabelas IV.18 a IV.24. Além do percentual de sucesso, ou otimalidade, outros importantes parâmetros são fornecidos, tais como o melhor valor obtido, o pior, e a média das soluções. Estas informações permitem uma comparação mais fiel e abrangente entre as três simulações utilizadas na resolução do problema de planejamento.

Tabela IV. 18 - Resumo dos Resultados - Sistema Garver com Redespacho

Algoritmo Utilizado	Sistema Garver com Redespacho			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	110.000	110.000	110.000	100
CFPA	110.000	110.000	110.000	100
CFPA + AHC	110.000	110.000	110.000	100

Tabela IV. 19 - Resumo dos Resultados - Sistema Garver sem Redespacho

Algoritmo Utilizado	Sistema Garver sem Redespacho			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	200.000	203.000	280.000	94
CFPA	200.000	201.600	280.000	98
CFPA + AHC	200.000	200.000	200.000	100

Tabela IV. 20 - Resumo dos Resultados - Sistema IEEE 24 Barras (G0)

Algoritmo Utilizado	Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G0			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	152.000	162.120	236.000	60
CFPA	152.000	158.880	220.000	76
CFPA + AHC	152.000	152.000	152.000	100

Tabela IV. 21 - Resumo dos Resultados - Sistema IEEE 24 Barras (G1)

Algoritmo Utilizado	Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G1			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	370.000	449.260	554.000	16
CFPA	370.000	429.800	514.000	22
CFPA + AHC	370.000	370.000	370.000	100

Tabela IV. 22 - Resumo dos Resultados - Sistema IEEE 24 Barras (G2)

Algoritmo Utilizado	Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G2			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	403.000	473.000	610.000	0
CFPA	392.000	453.840	582.000	18
CFPA + AHC	392.000	396.160	472.000	94

Tabela IV. 23 - Resumo dos Resultados - Sistema Sul com Redespacho

Algoritmo Utilizado	Sistema Sul com Redespacho			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	70.289	91.104	113.503	6
CFPA	70.289	83.296	102.112	14
CFPA + AHC	70.289	73.962	83.047	66

Tabela IV. 24 - Resumo dos Resultados - Sistema Sul sem Redespacho

Algoritmo Utilizado	Sistema Sul sem Redespacho			
	Melhor Solução (milhões de dólares)	Média das Soluções (milhões de dólares)	Pior Solução (milhões de dólares)	Percentual de Acerto (%)
FPA	181.371	234.897	355.989	0
CFPA	177.632	209.569	308.708	0
CFPA + AHC	154.420	164.389	208.027	50

IV.6- Conclusões Parciais

No presente capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta no problema de planejamento da expansão estática da rede de transmissão. Para validação do algoritmo proposto foram utilizados alguns dos sistemas mais conhecidos e difundidos na literatura especializada: Sistema Garver, Sistema IEEE 24 Barras e Sistema Sul Equivalente.

Os resultados apresentados apontam para um aumento da eficiência ao se incorporar o operador de seleção clonal no FPA, dando origem ao CFPA. Como pode ser observado nas Tabelas IV.18 a IV.24, o percentual de obtenção da solução ótima aumenta, ao passo que o valor médio das soluções encontradas se reduz. Apesar disso, o CFPA por si só ainda apresenta limitações, não tendo sido capaz, por exemplo, de determinar o plano ótimo de expansão para o sistema Sul sem redespacho de geração quando se considera o número máximo de iterações igual a 100.

Diante disso, são notórios os benefícios adquiridos ao se utilizar as informações heurísticas, as quais conferem maior eficiência ao processo de busca multimodal. Este fato se deve à redução das rotas de expansão, o que diminui a explosão combinatorial inerente ao problema e aumenta a eficiência dos indivíduos na obtenção de soluções de melhor qualidade.

Capítulo V

Conclusões

V.1- Considerações Finais

Neste trabalho o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica foi solucionado através da aplicação de otimização bioinspirada combinada com importantes informações heurísticas. A eficiência da metodologia proposta foi avaliada através do sistema acadêmico de Garver, do sistema IEEE 24 Barras e do equivalente da região Sul do Brasil, todos muito conhecidos pela literatura especializada.

O algoritmo bioinspirado empregado no planejamento dos sistemas de transmissão é uma versão modificada do *Flower Pollination Algorithm* (FPA), no qual foi introduzido o conceito do operador de seleção clonal, oriundo do Algoritmo de Seleção Clonal (CLONALG) e, por isso, esta nova versão foi nomeada neste trabalho de *Clonal Flower Pollination Algorithm* (CFPA). A incorporação do operador de seleção clonal tornou possível a criação de uma etapa preliminar ao processo de busca local do FPA. Esta etapa prévia é responsável por realizar uma competição entre os indivíduos da população, de forma que aqueles mais aptos são selecionados e clonados, de acordo com sua afinidade, e

posteriormente participam do processo de busca local. Esta abordagem elimina do processo de busca local aqueles indivíduos que teriam menores chances de sucesso, ao mesmo passo que aumenta a participação daqueles indivíduos mais promissores. Os resultados apresentados mostram que esta proposta é capaz de potencializar o processo de busca local do algoritmo, garantindo soluções de melhor qualidade quando comparadas às obtidas pelo algoritmo padrão do FPA.

Apesar disso, o desempenho do CFPA continua refém da característica combinatorial inerente ao problema de planejamento da expansão da transmissão. A fim de contornar este problema e aumentar a eficiência do processo de busca, fez-se o uso de informações provenientes de um Algoritmo Heurístico Construtivo. Tais informações heurísticas são utilizadas na inicialização do CFPA, garantindo que o processo de busca se inicie de um ponto factível, e também na seleção de um conjunto reduzido das rotas mais relevantes à expansão, reduzindo o espaço de busca e, conseqüentemente, a explosão combinatorial.

De um modo geral, os resultados apresentados revelam um aumento no índice de obtenção da solução ótima global, com conseqüente redução nos valores médios dos custos de expansão para os sistemas, na medida em que se incorpora o operador de seleção clonal no FPA e que se utilizam as informações heurísticas. Diante disso, fica claro que estas propostas atuam no sentido de aumentar a eficiência do FPA no planejamento da expansão dos sistemas de transmissão.

V.2- Propostas para Trabalhos Futuros

Visando dar continuidade ao presente trabalho, algumas propostas para investigação em trabalhos futuros podem ser mencionadas:

- Inclusão das perdas ativas na modelagem matemática do problema e verificação do impacto causado no planejamento da expansão do sistema a partir desta consideração.

- Incorporação do acoplamento temporal das decisões de investimento, dando origem ao planejamento dinâmico da expansão do sistema. Nesta abordagem, além da determinação dos novos circuitos a serem construídos, é interesse também a definição da data de necessidade destas ampliações, de modo a garantir o atendimento à demanda da maneira mais econômica.
- Desenvolvimento de uma metodologia apropriada para gerar planos de expansão que atendam ao critério de segurança N-1, ou seja, para que o sistema dimensionado seja capaz de permanecer operando sem interrupção do fornecimento de energia e sem atingir limites de sobrecarga de equipamentos e instalações mesmo com a indisponibilidade de um elemento (contingência simples).
- Avaliação não linear dos planos de expansão encontrados de forma a verificar os níveis de tensão nos barramentos e o comportamento dos fluxos de potência reativa.

Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Atlas de Energia Elétrica do Brasil”, 3ª Ed. Brasília. Aneel, 2008.
- [2] Borenstein, C. R.; Camargo, C. C. B.; “O Setor Elétrico no Brasil - Dos Desafios do Passado às Alternativas do Futuro”, 1ª Ed. Porto Alegre. Editora Sagra Luzzato, 1997.
- [3] Garver, L. L., “Transmission Network Estimation Using Linear Programming”, IEEE trans. on PAS, Vol. 89, Nº 7, September, 1970, pp.1688-1697.
- [4] Monticelli, A.; Junior, A. S.; Pereira, M. V. F.; Cunha, S. H.; Parker, B. J.; Praca, J. C. G., “Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion”, IEEE trans. on PAS, Vol. 101, Nº 10, October, 1982, pp. 3919-3925.
- [5] Villasana, R.; Garver, L. L.; Salon, S. J, “Transmission Network Planning Using Linear Programming”, IEEE trans. on PAS, Vol. 104, Nº 2, February 1985, pp. 349-356.
- [6] Pereira, M. V. F.; Pinto, L. M. V. G., “Application of Sensitivity Analysis of Local Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning”, IEEE trans. on PAS, Vol 104, Nº 2, February, 1985, pp. 381-389.
- [7] Romero, R.; Rocha, C., “Planificación de Sistemas de Transmisión Usando un Algoritmo Heurístico Constructivo”, XII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Temuco, Chile, 1997.
- [8] Junior, I. C. S. “Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão Utilizando um Novo Algoritmo Heurístico Constructivo”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, 2003.
- [9] Mendonça, I. M., “Identificação de Rotas Relevantes para o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, 2016.

- [10] Pereira, M. V. F.; Pinto, L. M. V. G.; Cunha, S. H. F.; Oliveira, G. C., “*A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning*”, IEEE trans. on PAS, Vol. 104, N° 11, November, 1985, pp. 3074-3083.
- [11] Levi, V.; Calovic, M. S., “*A New Decomposition Based Method for Optimal Expansion Planning of Large Transmission Networks*”, IEEE trans. on PAS, Vol. 6, N° 3, August, 1991, pp. 937-943.
- [12] Romero, R.; Monticelli, A., “*A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning*”, IEEE trans. on Power Systems, Vol. 9, N° 1, February, 1994, pp. 373-379.
- [13] Oliveira, G. C.; Costa, A. P. C.; Binato, S., “*Large Scale Transmission Network Planning Using Optimization and Heuristic Techniques*”, IEEE trans. on PAS, Vol. 10, N° 4, November 1995, pp. 1828-1833.
- [14] Romero, R., Monticelli, A., “*Algoritmo de Branch and Bound Usado no Planejamento de Sistemas de Transmissão*”, XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, Minas Gerais, Setembro de 1998, pp. 1013-1020.
- [15] Binato, S., “*Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes*”, Tese de Doutorado, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.
- [16] Romero, R.; Gallego, R. A.; Monticelli, A., “*Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing*”, IEEE trans. on Power Systems, Vol. 11, N° 1, 1995, pp. 279-283.
- [17] Gallego, R. A.; Alves, A. B.; Monticelli, A.; Romero, R., “*Parallel Simulated Annealing Applied to Long Term Transmission Network Expansion Planning*”, IEEE trans. on PAS, January, 1996, pp. 181-188.
- [18] Rudinick, H.; Palma, R.; Cura, E.; Silva, C., “*Economically Adapted Transmission Systems in Open Access Schemes - Application of Genetic Algorithms*”, IEEE trans. on PAS, Vol. 11, N° 3, August, 1996.
- [19] Romero, R.; Gallego, R. A.; Monticelli, A., “*Transmission System Expansion Planning by an Extended Genetic Algorithm*”, IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, N° 3, Maio 1998, pp. 329-335.
- [20] Gallego, R. A.; Romero, R.; Monticelli, A. J., “*Tabu Search Algorithm for Network Synthesis*”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, N° 2, pp. 490-495, Maio 2000.
- [21] Silva, E. L.; Ortiz, J. A.; Oliveira, G. C.; Binato, S., “*Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach*”, IEEE trans. on Power Systems, Vol. 16, N° 1, February 2001, pp. 62-68.

- [22] Binato, S.; Oliveira, G. C.; Araújo, J. L., “A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning”, IEEE trans.on Power Systems, Vol. 16, N° 2, May 2001, pp. 247-253.
- [23] Kavitha, D.; Swarup, K. S., “Transmission Expansion Planning Using LP-Based Particle Swarm Optimization”, in 2006 IEEE Power India Conference.
- [24] Rezende, L. S., “Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão através de Otimização de Colônia de Formigas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá -UNIFEI, Itajubá, 2006.
- [25] Cortes-Carmona, M.; Palma-Behnke, R.; Moya, O., “Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm”, in 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP, Setembro, 2009, pp. 1-7.
- [26] Eghbal, M.; Saha, T. K.; Hasan, K. N., “Transmission Expansion Planning by Meta-Heuristic Techniques: A Comparison of Shuffled Frog Leaping Algorithm, PSO and GA”, in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8.
- [27] Mendonça, I. M., “Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Enxame de Partículas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, 2012.
- [28] Rathore, C.; Roy, R.; Sharma, U.; Patel, J., “Artificial Bee Colony Algorithm Based Static Transmission Expansion Planning,” International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2013, pp. 1126–1131.
- [29] Resende, A. S., “Particle Swarm Optimization Aplicada ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- [30] Moraes, C. A., “Heurística Construtiva e Otimização Bioinspirada Aplicadas à Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, 2015.
- [31] Karaboga, D., “An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization”, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [32] Chu, S. C.; Tsai, P.; Pan, J. S., “Cat swarm Optimization”. In Q. Yang, & G. Webb (Eds.), Trends in Artificial Intelligence, pp. 854–858, Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [33] Yang, X. S.; Deb, S., “Cuckoo Search via Levy Flights”, In Proceedings of the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, NaBIC, pp. 210–214, 2009.

- [34] Yang, X. S., “*Firefly Algorithms for Multimodal Optimization*”, in: Stochastic Algorithms: Foundations and Applications (Eds O. Watanabe and T. Zeugmann), SAGA, Lecture Notes in Computer Science, 5792, Springer-Verlag, Berlin, pp. 169-178, 2009.
- [35] Yang, X. S., “*A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm*”, in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010) (Eds. J. R. Gonzalez et al.), Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin, 284, Springer, pp. 65-74, 2010.
- [36] Rui, T.; Fong, S.; Xin-She, Y.; Deb, S., “*Wolf Search Algorithm with Ephemeral Memory*”, In Proceedings of the Seventh International Conference on Digital Information Management (ICDIM), pp. 165–172, 2012.
- [37] Yang, X. S., “*Flower Pollination Algorithm for Global Optimization*”, Unconventional Computation and Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7445, pp. 240-249, 2012.
- [38] Diab, N.; El-Sharkawy, E., “*Recent Advances in Flower Pollination Algorithm*”. International Journal of Computer Applications Technology and Research. Vol. 5 – Issue 6, pp. 338 – 346, 2016.
- [39] Jin, X.; Du, H.; He, W.; Jiao, L., “*Optimizing the Weights of Neural Networks Based on Antibody Clonal Simulated Annealing Algorithm*”. In F.L. Yin, J. Wang, & C. Guo (Eds.), Advances in Neural Networks: 3173, pp. 299–304, 2004. Berlin Heidelberg: Springer.
- [40] Gao, S.; Wang, W.; Dai, H.; Li, F.; Tang, Z., “*Improved Clonal Selection Algorithm Combined with Ant Colony Optimization*”, Transactions on Information and Systems, E91D, pp. 1813–1823, 2008.
- [41] Lu, H., “*A Novel Particle Swarm Optimization Method Using Clonal Selection Algorithm*”, In Proceedings of the International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA, pp. 471–474, 2009.
- [42] Ludwig, S. A., “*Clonal Selection Based Genetic Algorithm for Workflow Service Selection*”, In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2012, pp. 1–7.
- [43] Castro, L. N.; Von Zuben, F. J., “*Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle*”. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems, 2001.
- [44] Monticelli, A., “*Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*”, 2ª Ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 1993.
- [45] Parker, B. J.; Watanabe, A.; Schiling, M. T., “*Precisão do Modelo Linearizado de Fluxo de Potência para Simulação do Sistema Brasileiro*”. NT DEST 18/80.

Apêndice A

Dados dos Sistemas de Transmissão

A.1- Considerações Iniciais

Neste apêndice são apresentados os dados referentes aos sistemas de transmissão de energia elétrica utilizados na validação da metodologia proposta. Para cada um dos sistemas, são apresentadas três tabelas. A primeira tabela traz os dados de barra do sistema, contendo informações como geração e carga no barramento. A segunda e a terceira apresentam os dados de linha para os circuitos existentes na topologia base e os candidatos à expansão, respectivamente.

A.2- Sistema Garver

Tabela A. 1 - Dados de Barra - Sistema Garver

Número da Barra	Potência Instalada (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	150	50	80
2	0	0	240
3	360	165	40
4	0	0	160
5	0	0	240
6	600	545	0

Tabela A. 2 - Dados de Linha dos Circuitos Existentes - Sistema Garver

Caminhos	Número de circuitos	Reatância (Ω)	Capacidade do Circuito (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

Tabela A. 3 - Dados de Linha dos Circuitos Candidatos - Sistema Garver

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

A.3- Sistema IEEE 24 Barras

Tabela A. 4 - Dados de Barra - Sistema IEEE 24 Barras

Número da Barra	Potência Instalada (MW)	Geração - G0 (MW)	Geração - G1 (MW)	Geração - G2 (MW)	Carga (MW)
1	576	576	576	465	324
2	576	576	576	576	291
3	0	0	0	0	540
4	0	0	0	0	222
5	0	0	0	0	213
6	0	0	0	0	408
7	900	900	900	722	375
8	0	0	0	0	513
9	0	0	0	0	525
10	0	0	0	0	585
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	1.773	1.773	1.773	1.424	795
14	0	0	0	0	582
15	645	645	645	645	951
16	465	465	465	465	300
17	0	0	0	0	0
18	1.200	1.200	1.200	1.200	999
19	0	0	0	0	543
20	0	0	0	0	384
21	1.200	1.200	1.200	1.200	0
22	900	900	900	900	0
23	1.980	1.980	315	953	0
24	0	0	0	0	0

Tabela A. 5 - Dados de Linha dos Circuitos Existentes - Sistema IEEE 24 Barras

Caminhos	Número de circuitos	Reatância (Ω)	Capacidade do Circuito (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

Tabela A. 6 - Dados de Linha dos Circuitos Candidatos - Sistema IEEE 24 Barras

Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade do Circuito (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.4- Sistema Equivalente Sul

Tabela A. 7 - Dados de Barra - Sistema Sul Equivalente

Número da Barra	Potência Instalada (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0	0	0
2	0	0	443
3	0	0	0
4	0	0	301
5	0	0	238
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	72
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	512
13	0	0	186
14	1.257	944	0
15	0	0	0
16	2.000	1.366	0
17	1.050	1.000	0
18	0	0	0
19	1.670	773	0
20	0	0	1.091
21	0	0	0
22	0	0	82
23	0	0	458
24	0	0	478
25	0	0	0

26	0	0	232
27	220	54	0
28	800	730	0
29	0	0	0
30	0	0	0
31	700	310	0
32	500	450	0
33	0	0	229
34	748	221	0
35	0	0	216
36	0	0	90
37	300	212	0
38	0	0	216
39	600	221	0
40	0	0	262
41	0	0	0
42	0	0	1.607
43	0	0	0
44	0	0	79
45	0	0	87
46	700	599	0

Tabela A. 8 - Dados de Linha dos Circuitos Existentes - Sistema Sul Equivalente

Caminhos	Número de circuitos	Reatância (Ω)	Capacidade do Circuito (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
20-21	1	1.25	600
42-43	1	1.25	600

Tabela A. 9 - Dados de Linha dos Circuitos Candidatos - Sistema Sul Equivalente

Caminhos Candidatos	Reatância (Ω)	Capacidade do Circuito (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
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
2-4	8.82	270	5.97
14-15	3.74	270	2.89
46-10	0.81	2000	10.89
4-11	22.46	240	14.25
5-11	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
2-3	1.25	600	8.17
5-6	1.25	600	8.17
9-10	1.25	600	8.17