

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

CAMILE ARÊDES MORAES

**HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA
APLICADAS À EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

JUIZ DE FORA, JF – BRASIL.
AGOSTO DE 2015

CAMILE ARÊDES MORAES

**HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA
APLICADAS À EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: PROFESSOR IVO CHAVES DA SILVA JUNIOR, D.SC.

JUIZ DE FORA, JF – BRASIL.
AGOSTO DE 2015

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Moraes, Camile.

HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA
APLICADAS À EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA / Camile Arêdes Moraes. – 2015.

120 f. : il.

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

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade
de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

1. Ecolocalização. 2. Heurística Construtiva. 3. Planejamento Estático.
Junior, Ivo Chaves da Silva, orient.

**HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADA
APLICADAS À EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

CAMILE ARÊDES MORAES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE 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.

Aprovada por:

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

Prof. Edmarcio Antônio Belati, D.Sc - UFABC

Prof. André Luís Marques Marcato, D.Sc - UFJF

JUIZ DE FORA, JF – BRASIL.
AGOSTO DE 2015

Aos meus queridos pais,
Antônio e Maria do Carmo,
Às minhas irmãs,
Venância e Mariana
com muito carinho.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Professor Ivo Chaves da Silva Junior, pela excelência na orientação e dedicação dispensadas para a realização deste trabalho. Além disso, sou grata pelos ensinamentos, contribuições e segurança transmitidos, fatores fundamentais para minha formação profissional. Sobretudo, por ser um grande exemplo de competência, dignidade e humanidade. Seguir os ensinamentos de alguém assim, tornou a jornada satisfatória e menos árdua.

À Isabela Miranda de Mendonça, pelos conselhos, incentivos e ensinamentos transmitidos durante o curso de pós-graduação.

Ao LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência) da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, pela disponibilidade de utilização dos recursos computacionais.

Ao PPEE (Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica) da Universidade Federal de Juiz de Fora, pela realização de um sonho.

Aos amigos Candida Meneghin, Igor Delgado, Ricardo Viol, Tamiris Gomes e Sara Munck, pelos comentários, sugestões e discussões científicas durante o trabalho. Também, por todo o suporte emocional e companheirismo.

A todos os professores e colegas do curso de pós-graduação que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Aos meus pais Antônio e Maria do Carmo, às minhas irmãs Venância e Mariana e ao meu namorado Daniel, agradeço o incentivo e o apoio dispensados durante todo curso de pós-graduação, por todo amor e carinho.

"Aqueles que se sentem satisfeitos
sentem-se e nada fazem.
Os insatisfeitos são os únicos
benfeitores do mundo"
Walter S. Landor

RESUMO

O problema referente à expansão estática de sistemas de transmissão de energia elétrica consiste em determinar, entre um conjunto predefinido de circuitos candidatos à expansão, aqueles que devem ser construídos de forma a minimizar os custos de operação (déficit) e de investimentos no sistema de transmissão, suprindo a demanda prevista para um horizonte de planejamento.

Este é um problema de otimização de difícil solução e que apresenta algumas particularidades, tais como: (i) região de solução não convexa, ou seja, com várias soluções factíveis, o que leva grande parte dos algoritmos a convergirem em direção de uma solução ótima local; (ii) a natureza combinatória do processo de planejamento que, normalmente, conduz ao fenômeno da explosão combinatória referente às alternativas de investimento, resultando em um elevado esforço computacional; (iii) a existência de sistemas elétricos não conexos (ilhados).

Estas particularidades ilustram as principais dificuldades na elaboração de algoritmos rápidos, eficientes e robustos para a resolução do problema estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Diante do quadro descrito acima, o presente trabalho propõe uma estratégia de resolução baseada em duas etapas: (a) Inicialmente é feito uso de um algoritmo heurístico construtivo, a partir do qual se objetiva uma solução inicial factível para o problema; (b) Conhecida essa solução inicial, a mesma é repassada ao processo de otimização multimodal, sendo este baseado no fenômeno da ecolocalização.

A ecolocalização é um método de otimização multimodal recente quando é comparado com os demais métodos multimodais bioinspirados, sendo a sua aplicação incipiente na área de sistemas elétricos de potência e, portanto, sua utilização uma motivação.

Os resultados obtidos indicam que a estratégia de resolução proposta proporciona um aumento da eficiência do processo de otimização multimodal pela busca da otimalidade, uma vez que a solução ótima passa a ser obtida em um número menor de iterações do processo de busca bioinspirado.

PALAVRAS CHAVE: Ecolocalização, Heurística Construtiva, Otimização, Planejamento Estático, Expansão de Sistemas de Transmissão.

ABSTRACT

The static transmission expansion planning of electrical systems problem consists in determining, among a pre-defined set of candidate expansion circuits, the ones that must be built to minimize the operational costs (deficit) and investment costs in the electrical networks thus meeting the forecast demand in a given planning horizon.

This hard-solution optimization problem presents some particular characteristics, such as: (i) non-convex solution region, which means a large number of feasible solutions leading most of the algorithms, used in this situation, to converge to a local optimum; (ii) the combinatorial nature of the planning process which usually leads to the combinatorial explosion related to investment alternatives, resulting in a high computational effort; (iii) the existence of islanded electrical systems. These features illustrate the main difficulties in the development of fast, efficient and robust algorithms to solve the static planning of the transmission expansion of electrical systems.

Considering this problem, this work proposes a two-step resolution strategy: (a) Initially, a constructive heuristic algorithm is used in order to obtain a feasible initial solution for the problem; (B) Since this initial solution is known, it is transferred to the multimodal optimization process, based on the echolocation phenomenon.

The echolocation is a recent multimodal optimization method when compared with other bioinspired multimodal methods and its application on electric power systems is still incipient so, its utilization may be a motivation.

The obtained results indicate that the proposed solution strategy provides increased efficiency for the multimodal optimization process by the search for optimality, since the optimal solution can be obtained in a small number of iterations of bioinspired search process.

KEYWORDS: Bat Algorithm, Constructive Heuristic, Optimization, Planning Static, Expansion Transmission Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema Elétrico de Potência.....	16
Figura 2	Sistema Tutorial.....	42
Figura 3	Sistema Tutorial Iteração I.....	45
Figura 4	Sistema Tutorial Iteração II.....	46
Figura 5	Sistema Tutorial Iteração III.....	47
Figura 6	Sistema Tutorial Iteração IV.....	48
Figura 7	Esquema de Ecolocalização de Morcegos.....	50
Figura 8	Fluxograma Ecolocalização de Morcegos I. Etapa 1: Novas Posições; Etapa 2: Avaliação.....	51
Figura 9	Fluxograma Ecolocalização de Morcegos-Etapa 1.....	52
Figura 10	Fluxograma Ecolocalização de Morcegos-Etapa 2.....	54
Figura 11	Ilustrativo da Heurística de Mínimo Corte de Carga.....	59
Figura 12	Pseudocódigo – Algoritmo Bioinspirado- BA.....	60
Figura 13	Relação entre o Ecolocalização e FPOL.....	62
Figura 14	Esquemático da Metodologia Utilizada.....	63
Figura 15	Sistema Garver.....	65
Figura 16	Gráfico da Convergência do Sistema Garver CR utilizando Ecolocalização de Morcegos.....	68
Figura 17	Gráfico de convergência de Garver CR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.....	69
Figura 18	Gráfico da Convergência do Sistema Garver SR utilizando Ecolocalização de Morcegos.....	72
Figura 19	Gráfico de convergência de Garver SR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.....	73
Figura 20	Ilustração do Sistema Sul Equivalente do Brasil.....	76
Figura 21	Gráfico de convergência do Sistema Sul CR com uso da Meta-heurística da Ecolocalização de Morcegos.....	79
Figura 22	Gráfico de convergência do Sistema Sul CR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.....	80
Figura 23	Gráfico de convergência do Sistema Sul SR com uso da meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	84

Figura 24	Gráfico de convergência do Sistema Sul SR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.....	85
Figura 25	Ilustrativo do Sistema IEEE 24 barras.....	88
Figura 26	Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G0 com uso da Ecolocalização de Morcegos.....	90
Figura 27	Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G0 com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.....	91
Figura 28	Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G1 com uso da Ecolocalização de Morcegos.....	94
Figura 29	Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G1 com uso da Heurística e da Ecolocalização de Morcegos.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados de Barra do Sistema Tutorial.....	43
Tabela 2	Dados da Linha Existente do Sistema Tutorial.....	43
Tabela 3	Dados das Linhas Fictícias do Sistema Tutorial.....	43
Tabela 4	Dados das Linhas Candidatas a Expansão do Sistema Tutorial..	43
Tabela 5	Plano de Expansão Garver CR para a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.....	67
Tabela 6	Plano de Expansão Garver CR para Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	67
Tabela 7	Otimalidade – Garver CR.....	69
Tabela 8	Comparação entre as Metodologias para o sistema Garver CR...	70
Tabela 9	Plano de Expansão Sistema Garver SR para a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.....	71
Tabela 10	Plano de Expansão Sistema Garver SR para a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	72
Tabela 11	Otimalidade – Garver SR.....	74
Tabela 12	Comparação entre as Metodologias para o sistema Garver SR.....	75
Tabela 13	Plano de expansão do Sistema Sul CR utilizando a Heurística construtiva de Mínimo Corte de Carga.....	77
Tabela 14	Plano de expansão do Sistema Sul CR utilizando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	78
Tabela 15	Otimalidade – Sul CR.....	81
Tabela 16	Comparação entre as Metodologias para o sistema Sul CR.....	81
Tabela 17	Sistema Sul SR usando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.....	82
Tabela 18	Sistema Sul SR usando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	83
Tabela 19	Otimalidade – SUL-SR.....	85
Tabela 20	Comparação entre as Metodologias para o sistema Sul SR.....	86

Tabela 21	Sistema IEEE 24-G0 usando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.....	89
Tabela 22	Sistema IEEE 24-G0 usando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	89
Tabela 23	Otimalidade – IEEE-G0.....	91
Tabela 24	Comparação entre as Metodologias para o sistema IEEE 24 Barras - G0.....	92
Tabela 25	Sistema IEEE 24-G1 usando a Heurística de Mínimo Corte de Carga.....	93
Tabela 26	Sistema IEEE 24-G1 usando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.....	94
Tabela 27	Sistema IEEE 24-G1 usando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e Ecolocalização de Morcegos.....	95
Tabela 28	Otimalidade – IEEE-G1.....	96
Tabela 29	Comparação entre as Metodologias para o sistema IEEE 24 Barras - G1.....	97

SUMÁRIO

Capítulo I.....	16
Introdução.....	16
I.1 Considerações Iniciais.....	16
I.2 Revisão Bibliográfica.....	21
I.3 Objetivo da Dissertação.....	26
I.4 Principais Contribuições da Dissertação.....	27
I.5 Publicações Decorrentes da Dissertação.....	28
I.6 Organização da Dissertação.....	28
Capítulo II.....	30
Formulação Matemática para o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica.....	30
II.1 Introdução.....	30
II.2 Formulação do Problema.....	31
II.2.1 Função Objetivo (FOB).....	33
II.2.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa.....	34
II.2.3 Restrições de Canalização de Fluxo de Potência Ativa.....	34
II.2.4 Restrições de Canalização de Geração Potência Ativa.....	34
II.2.5 Restrições de Fluxo de Potência Ativa.....	35
II.2.6 Restrições do Parâmetro de Expansão (PE).....	35
II.3 Conclusões Parciais.....	35
Capítulo III.....	37
Algoritmos Heurísticos Construtivos.....	37
III.1 Considerações Iniciais.....	37
III.2 Heurística Construtiva aplicada ao Problema da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica.....	38
III.3 Indicador de Sensibilidade.....	39
III.4 Principais Algoritmos Heurísticos Construtivos.....	39
III.4.1 Algoritmo de Garver.....	39
III.4.2 Algoritmo de Mínimo Esforço.....	40
III.4.3 Algoritmo de Villanasa-Garver.....	40
III.4.4 Algoritmo de Mínimo Corte de Carga.....	41
III.5 Exemplo - Sistema Tutorial.....	44
III.6 Conclusões Parciais.....	50
Capítulo IV.....	51
Otimização Bioinspirada.....	50
IV.1 Introdução.....	51
IV.2 Ecolocalização.....	51
IV.3 Algoritmo de Otimização BioInspirado.....	52
IV.4 Variantes do BA.....	58
IV.5 Conclusões Parciais.....	59
Capítulo V.....	60
Metodologia Proposta.....	60
V.1 Introdução.....	60
V.2 Estratégia de Resolução.....	60
V.3 Conclusões Parciais.....	65
Capítulo VI.....	66

Estudo de Casos.....	66
VI.1 Introdução.....	66
VI.2 Sistema de Garver.....	67
VI.2.1 Caso 1: Sistema de Garver com Redespacho de Geração	68
VI.2.2 Caso 2: Sistema de Garver sem Redespacho de Geração	72
VI.3 Sistema Sul Equivalente	77
VI.3.1 Caso 3: Sistema sul equivalente com redespacho de geração	78
VI.3.2 Caso 4: Sistema Sul Equivalente sem Redespacho de Geração.....	83
VI.4 Sistema IEEE 24 Barras	87
VI.4.1 Caso 5: Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G0.	88
VI.4.2 Caso 6: Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G1	92
VI.5 Aspectos Computacionais	97
VI.6 Conclusões Parciais.....	98
Capítulo VII.....	101
Conclusões.....	101
VII.1 Considerações Gerais	101
VII.2 Conclusões.....	101
VII.3 Desenvolvimentos Futuros	102
Apêndice A.....	104
Dados dos Sistemas de Transmissão	104
A.1 Considerações Iniciais	104
A.2 Sistema de Garver.....	104
A.3 Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil	105
A.4 Sistema IEEE 24 barras	110
Referências Bibliográficas.....	113

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

Uma das áreas mais tradicionais da Engenharia Elétrica é a que se refere aos sistemas de Energia. Esta trata do fornecimento da energia e é dividida em quatro setores: geração, transmissão, distribuição e comercialização.

A geração de energia elétrica no Brasil é basicamente hidroelétrica, isto se deve ao grande potencial das bacias hidráulicas que o país possui, enquanto que a geração da grande maioria dos países tem como base as termoelétricas em suas matrizes energéticas. Esse aspecto peculiar torna o Brasil um dos países com a matriz energética mais renovável e limpa do mundo.

A seguir na Figura 1, é apresentada uma ilustração para representar o Sistema Elétrico de Potência (SEP).

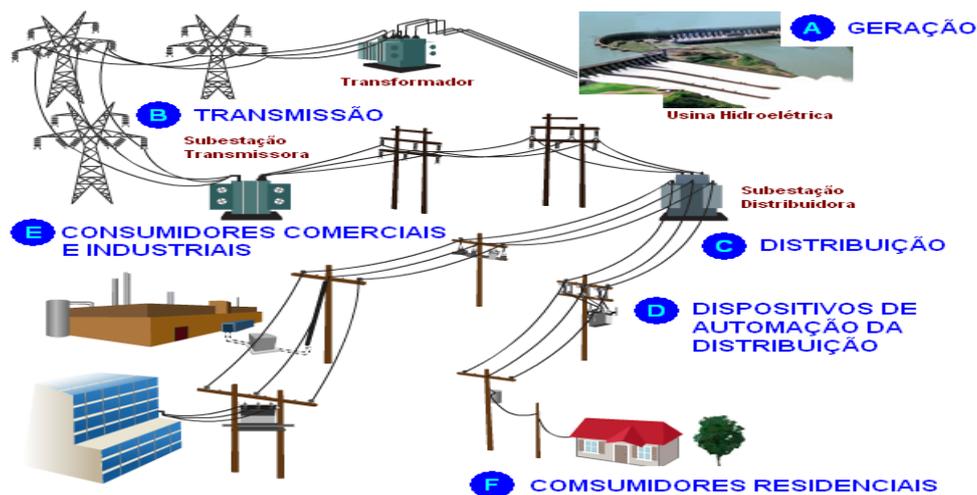


Figura 1: Sistema Elétrico de Potência. Fonte: <http://www.treinamentonr10.com>

Capítulo I – Introdução

O SEP tem como função essencial o fornecimento de energia elétrica com a qualidade adequada e no momento em que for solicitada por seus usuários.

Essa necessidade de fornecer energia elétrica de forma cada vez mais eficiente vem transformando o modo com que os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são planejados e operados.

O setor da transmissão de energia está dentro os setores previamente citados e preza por entregar a potência gerada aos consumidores, bem como prover, eficientemente, a interligação entre áreas do SEP.

Devido à vasta dimensão do sistema energético brasileiro e por este ser basicamente hidrelétrico, o planejamento da expansão da transmissão torna-se bastante complexo, haja vista o elevado número de variáveis de decisão, as inúmeras incertezas envolvidas no processo e a necessidade de contornar a sazonalidade dos períodos chuvosos e secos.

Neste contexto abordado, a análise do planejamento energético divide-se em planejamento de longo, médio e curto prazo.

Essencialmente, os planejamentos de longo e médio prazo visam otimizar os fluxos anuais dos cursos de água do sistema, ao passo que, o planejamento de curto prazo otimiza a operação do sistema a cada hora.

Desde há algum tempo observa-se a necessidade da expansão dos sistemas de transmissão, decorrente da expressiva elevação anual da demanda de energia, bem como um cenário característico no qual as usinas hidrelétricas provedoras de energia são, usualmente, localizadas distantes dos centros consumidores. Consequentemente, para que a energia chegue até esses consumidores é necessário que haja um sistema de transmissão robusto e eficiente. Portanto, diante desses fatores previamente descritos, é justificável avançar para o desenvolvimento de novas tecnologias de planejamento da expansão da transmissão, a fim de que antes da etapa da execução dessa expansão haja um estudo elaborado de como fazê-la da melhor maneira possível.

Espera-se, de acordo com as novas estimativas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as quais contemplam o período até 2021, que o crescimento médio anual da demanda total de eletricidade será de 4,5% ao ano no período, passando de 472 mil Gigawatts (GW) em 2011 para 736 mil GW em 2021. [1]

O planejamento da expansão do sistema de transmissão inicia-se justamente com o estabelecimento das prerrogativas dos panoramas de crescimento do consumo de

Capítulo I – Introdução

energia demandado pela sociedade e alicerçado em um histórico de previsões. Consoante, verifica-se a eventual necessidade de ampliar e fortalecer a rede.

No caso das condições de atendimento serem insatisfatórias, deve-se propor um plano que tenha coerência entre o fornecimento de energia à carga e as instalações de novos equipamentos no sistema. Para integrar esses novos equipamentos ao sistema de forma a manter as condições técnicas e operacionais (dentre outras, o custo) adequadas, é preciso planejar a alocação desses reforços sobre o sistema de transmissão.

Tal planejamento encontra um desafio ao ser efetivado com o menor custo possível, e os agentes deste planejamento devem optar quando (ponto dinâmico) e onde (ponto estático) aplicarem os recursos financeiros objetivando a manutenção da confiabilidade do SEP.

No planejamento estático, o objetivo é determinar "onde" e "quais" reforços deverão ser construídos de forma a atender uma previsão de demanda. Basicamente, esse planejamento pode ser modelado como um problema de minimização dos custos de expansão e de déficit, sujeito a um conjunto de restrições econômicas, técnicas e de confiabilidade. Em sua modelagem, a grande maioria dos trabalhos publicados na literatura específica faz uso do modelo de fluxo de carga CC, por ser uma boa aproximação e para evitar agregar maiores dificuldades a um problema já complexo. Para tratar o planejamento da expansão de forma estática, foram propostos modelos baseados em programação matemática, heurísticos e meta-heurísticos.

Já o planejamento dinâmico consiste na minimização dos valores presentes de todos os investimentos ao longo do horizonte de planejamento. O maior interesse do planejamento dinâmico é determinar "quando" cada reforço deve entrar na rede. A consideração temporal faz o problema crescer de forma exponencial, levando os modelos dinâmicos a exigir grande esforço computacional.

Resumidamente, o planejamento da expansão está entrelaçado com a seleção de unidades geradoras e quando essas devem atuar de forma conveniente e com as melhores rotas de transmissão e distribuição de energia.

Portanto, técnicas de otimização devem ser implantadas para que se aproxime ao máximo do custo menos oneroso, desempenhando o objetivo e preservando atendimento da demanda em um horizonte de planejamento.

Neste trabalho será abordado o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão (PEEST), que se configura em um problema de otimização complexo e de grande porte [2]. O projeto consiste em apontar, dentro de um conjunto preestabelecido

de circuitos candidatos à expansão, quais estão aptos a minimizar os custos de operação, sem que haja déficit (falta) de energia e de capital investido no sistema elétrico, atendendo à demanda prevista para um horizonte de planejamento [3]. Esse é um problema de otimização de difícil solução, que apresenta algumas particularidades:

- (i) Região de solução não convexa, o que leva grande parte dos algoritmos a convergirem para uma solução ótima local;
- (ii) A natureza combinatória do processo de planejamento, culminando em um elevado esforço computacional;
- (iii) Problema de programação não linear inteira mista (PNLIM), o que reitera a difícil solução do mesmo.

Esses pormenores configuram alguns entraves primordiais na elaboração de algoritmos rápidos e eficientes para a resolução do problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. [4]

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

- (i) Algoritmos Heurísticos Construtivos: São algoritmos robustos que tentam construir a solução iterativamente e apresentam pouco esforço computacional. No entanto, raramente encontram a solução ótima global. Englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável. [3], [4], [5], [6] e [7];
- (ii) Algoritmos de Otimização Clássica: Usam técnicas de decomposição matemática e geralmente encontram soluções ótimas globais de sistema, mas em sistemas de maior porte estes algoritmos podem apresentar grande esforço computacional e problemas de convergência. [3], [8], [9] e [10].
- (iii) Meta-heurísticas: Encontram soluções ótimas de sistemas de maior porte, através da combinação de escolhas aleatórias e conhecimento histórico dos resultados anteriores adquiridos, evitando-se o esforço

Capítulo I – Introdução

computacional exaustivo, esse esforço exacerbado é penalizado em algumas rotinas. [3], [11], [12], [13], [14] e [15].

Neste estudo será efetuada uma estratégia de resolução para o PEEST, conciliando a utilização de uma heurística construtiva e uma meta-heurística.

A associação dessas duas metodologias foi motivada através do estudo de suas características. As heurísticas construtivas prezam por realizarem a busca de uma solução de qualidade de forma iterativa, realizada passo a passo, no entanto não existe garantia de que a solução obtida é de fato a ótima. Já as meta-heurísticas são processos de otimização global, os quais realizam a exploração do espaço de busca de uma forma mais abrangente e possuem a opção de inicialização a partir de um ótimo local, sendo esses fatores não verificados para as heurísticas construtivas. Portanto, ao se conhecer essas características intrínsecas de cada método, pode-se realizar a ligação entre estes, elaborando processos em que a heurística construtiva gere boas condições iniciais às meta-heurísticas, na tentativa de realizar uma busca pela solução de forma mais eficiente.

Para realizar esse trabalho é proposta a utilização de um algoritmo heurístico de mínimo corte de carga, o qual realiza uma etapa primária encontrando uma solução inicial factível e de qualidade que será utilizada pela meta-heurística Ecolocalização de Morcegos, que realiza um processo de otimização global e mais abrangente do espaço de busca do problema e fornece o plano de expansão final dos sistemas de transmissão de energia elétrica.

I.2 Revisão Bibliográfica

O fluxo de potência é uma dentre as ferramentas utilizadas para auxiliar os pesquisadores na simulação do problema de planejamento da expansão da transmissão.

A maioria dos problemas do nosso cotidiano pode ser representada, de forma satisfatória, através de um modelo matemático, o qual assessora os processos simulação, análise e entendimento dos dados experimentais.

Conseqüentemente, há um grande interesse no desenvolvimento, implementação e exploração de modelos matemáticos, mesmo que esses apresentem algumas dificuldades, tais como: diversos formatos, dimensões e níveis de complexidade, todos atuam com o processo de decisão.

A fim de se estudar o planejamento da transmissão é feita a adesão de uma modelagem matemática para este problema, a modelagem em específico escolhida nesse estudo é composta de uma função objetivo e também por um conjunto de restrições, tais fatores relacionam-se a um aglomerado de variáveis de decisão através de um grupo de equações e inequações algébricas.

Nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica existem diversos problemas que envolvem o processo de otimização. Usualmente, a meta é minimizar os custos de investimento e de operação do sistema.

Normalmente, à medida que são implementadas melhorias no modelo matemático do problema real, a técnica de solução torna-se mais complexa e robusta. Desta forma, deve existir uma congruência entre a modelagem matemática adotada e a técnica de solução utilizada, objetivando obter o máximo de aproveitamento dos recursos computacionais.

Um dos primeiros trabalhos publicados sobre o planejamento da expansão dos sistemas de transmissão datam de 1970. Trata-se do trabalho de Garver [16], que modelou o problema com um fluxo de potência aplicando um algoritmo de programação linear para explicar as rotas candidatas expansão e evidenciou a rede pelo modelo de transportes. Tratou-se de um modelo relaxado, pois tem a peculiaridade de somente satisfazer a primeira lei de Kirchhoff.

Em [17] tomou-se conhecimento dos métodos iterativos para o planejamento da transmissão, um algoritmo heurístico construtivo que utiliza modelo CC, denominado algoritmo de mínimo esforço. Este modelo é baseado no acoplamento entre os fluxos de

potência ativa e as aberturas angulares. As rotas candidatas à expansão eram postas em ordem através de um índice de “Mínimo Esforço”, o qual apresenta uma análise da sensibilidade com relação às susceptâncias dos circuitos na indicação dos caminhos de investimento na transmissão.

Sequencialmente, em 1985 foi explanado, por Villanasa et al [18], um modelo que expõe duas redes elétricas sobrepostas, a fim de resolver o planejamento da expansão dos sistemas de transmissão, mesclando o modelo CC com modelo de transportes. À medida que o modelo linearizado calcula o fluxo de potência nos circuitos existentes ou reais, o modelo de transportes faz jus aos circuitos artificiais ou fictícios.

Mais adiante, em 1985, Pereira e Pinto [19] sugeriram um algoritmo heurístico construtivo, o algoritmo de "Mínimo Corte de Carga", possibilitando estudar o circuito e adicionando a minimização ao corte de carga ao sistema através do uso de geradores artificiais para contornar os problemas de operação do sistema.

Em sistemas mais complexos torna-se necessário obter soluções de qualidade superior utilizando métodos de busca mais elaborados, denominados meta-heurísticas. A facilidade de se trabalhar com problemas não convexos e tratar incertezas na solução do planejamento da expansão da transmissão dos sistemas de energia elétrica contribuíram para a utilização desta técnica.

Com o trabalho de Romero, Gallego e Monticelli em [20], que tem como proposta a aproximação para o planejamento da expansão da transmissão baseado na técnica de Recozimento Simulado ("*Simulated Annealing*"), deu-se o início ao uso das técnicas meta-heurísticas. Tal método obteve resultados eficientes quando aplicados aos sistemas de pequeno porte nos quais as soluções ótimas eram conhecidas e mostrou-se promitente no sistema de grande porte, obtendo soluções atraentes com custo reduzido quando comparado às soluções conhecidas anteriormente. Simultaneamente [21], observa-se uma nova estratégia, esta possibilitou que soluções fossem obtidas em um tempo computacional menor, influenciando nas propriedades de convergência do Recozimento Simulado Sequencial.

Cortes-Carmona et al [22] fez valer a mesma técnica para resolver o problema de planejamento da transmissão. Desenvolveu um algoritmo híbrido sobre o qual realiza-se uma busca local de custo reduzido que apura a solução encontrada em cada nível de temperatura e que permite um processamento mais rápido. Essa metodologia possibilitou um melhor desempenho do método, encontrando resultados favoráveis em um curto tempo de processamento.

É apresentado em [23] uma comparação de desempenho das meta-heurísticas a fim de solucionar o problema de planejamento da expansão da transmissão multiestágio em sistemas de potência. A metodologia proposta inclui a busca para a solução de menor custo, levando em conta investimentos e custos operacionais relacionados com as perdas ôhmicas de transmissão. O desempenho das meta-heurísticas foi avaliado através de um índice que mede a qualidade das melhores sequências encontradas. Estudos de caso sobre um sistema pequeno e em uma rede de subtransmissão real são apresentados e discutidos.

Já em [24] abordam-se várias ferramentas de planejamento da expansão da transmissão baseados em métodos de solução. São estes os métodos:

- Métodos Matemáticos de Otimização: Programação linear, Otimização dinâmica discreta, Programação linear inteira mista, "*Branch and bound*", decomposição de "*Benders*".
- Métodos heurísticos e Meta-heurísticas: Algoritmo heurístico construtivo, Busca Tabu, "*Expert system*", Algoritmo Genético, Colônia de Formigas e Enxame de Partículas.

Em [25] propõe-se uma versão de implementação paralela de otimização por enxame de partículas para resolver o planejamento da expansão da transmissão usando o modelo DC. A fim de reduzir o tempo de processamento, o primeiro artigo importante para resolver o problema utilizando processamento paralelo foi publicado em [21] em 1997. Apresenta-se uma implementação paralela da versão local do PSO no *solver* comercial MATLAB para resolver problema. Os resultados mostram que, com o processamento paralelo, o problema pode ser resolvido de forma mais rápida e robusta. A atual tecnologia de processador multicore permite a implementação de processamento paralelo e com isso tem-se a obtenção de economia de tempo de computação de mais de 300% em comparação a versão de série do mesmo algoritmo.

Em função da necessidade adicional imposta pela inserção de fontes renováveis no planejamento de redes elétricas, em [26] introduz-se novos modelos e procedimentos para a obtenção de redes mais robustas e flexíveis. Na metodologia, um algoritmo computacional, com um novo conjunto de indicadores de desempenho é apresentado com base no conceito de fluxo de potência cronológico (CPF).

Rathore et al [27] apresenta a aplicação de um algoritmo de otimização baseado na busca de população chamado MOX a fim de resolver o problema de planejamento da expansão da rede de transmissão estática usando modelo DC, para minimizar o custo de investimento de transmissão. Os resultados indicam que o algoritmo proposto pode obter um custo mínimo de investimento para os sistemas IEEE 24 barras e IEEE 25 barras.

A técnica Colônia de Abelhas foi aplicada em [28], para resolver o problema de planejamento da expansão, sendo esse de natureza altamente complexa. Ademais, em sistemas maiores a análise torna-se mais difícil. Com base no modelo de DC, o algoritmo de busca artificial "*Bee Colony*" (ABC) foi usado para resolver o problema estático a fim de minimizar o custo de investimento na transmissão. A capacidade do método proposto foi testada nos sistemas Garver, IEEE 24 e IEEE 25 barras e os resultados indicam que é possível obter o custo mínimo de investimento para os sistemas.

Em [29], propõe-se um algoritmo de busca "*Harmony Search*" ou harmônica recursiva (HS) para resolver o problema de planejamento da expansão da transmissão em ambiente desregulamentado considerando restrições de segurança. A modificação do método HS recursiva em comparação com o algoritmo HS tradicional inclui: i) a introdução de uma largura de banda variável na consideração de memória e as fases de ajuste no passo de improvisação do algoritmo e ii) a possibilidade de reiniciar o algoritmo após o número máximo de improvisação é alcançada mantendo as melhores soluções do algoritmo de execução anterior. Desta forma, a probabilidade de encontrar a melhor solução para o problema é altamente aumentada sem sobrecarregar o tempo de computação do algoritmo.

Já em [30], apresentam-se vários problemas de otimização matemática que podem ser resolvidos de forma eficaz por algoritmos meta-heurísticos. A vantagem desses algoritmos é que executam processos de busca iterativa e realizam, com eficiência, prospecção e exploração no espaço de busca. Neste contexto, os três algoritmos meta-heurísticos a seguir (respectivamente: vagalume, morcego e busca cuco) foram utilizados para encontrar as melhores soluções. "*Firefly*" é inspirado pelo comportamento dos vaga-lumes; "*Bat Algorithm (BA)*" baseia-se no comportamento de ecolocalização desempenhado pelos morcegos; enquanto em "*Cuckoo Search*", um padrão corresponde a um ninho e, similarmente, cada atributo individual do padrão corresponde a um cuco-ovo.

Capítulo I – Introdução

Em [31], são explicitadas duas metodologias para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. A primeira delas é uma apresentação de um algoritmo baseado em meta-heurística, “*Particle Swarm optimization*” (PSO), como ferramenta para resolver o problema estático. Nesta proposta são usados os modelos matemáticos de transporte e CC. A segunda proposta apresenta o problema considerando múltiplos cenários de geração usando o modelo linear disjuntivo. Este modelo foi implementado via linguagem *A Modelling Language for Mathematical* (AMPL) e resolvido usando o *solver* comercial CPLEX. Os resultados mostraram a eficiência e utilidade das duas metodologias propostas.

Em [32], aborda-se o impacto da integração da geração energia eólica no problema de expansão da transmissão estática. Para resolver este problema estocástico, de otimização não linear e de região de solução não convexa, utilizou uma nova meta-heurística, o algoritmo de otimização proposto é inspirado no Gás Browniano em Movimento, onde cada posição da molécula significa uma possível solução ótima do problema de otimização proposto. O fluxo de potência DC sem consideração das perdas é usado para representar a rede e a incorporação do modelo de vento para mostrar custo do impacto da integração eólica nesse problema. A função objetivo principal é de minimizar o custo total do sistema: custo do investimento em linha de transmissão, custo de combustível dos geradores e custo de energia eólica. São testados os seguintes sistemas: Garver, IEEE 24 e 25 barras.

Aghaei et al [33] descreve um novo modelo probabilístico para o problema planejamento de expansão da geração e transmissão, considerando critérios de confiabilidade. Tais critérios são representados por geradores ou paralisações aleatórias de linhas. O modelo resultante considera os custos de instalação e operação, bem como o custo de energia esperada não fornecida para determinar, de forma ideal, a localização e o número de novas unidades geradoras e circuitos na rede, a capacidade de geração de energia para as unidades e o ângulo de fase da tensão em cada nó. Além disso, formulações lineares eficientes foram introduzidas neste trabalho para lidar com a natureza não linear do problema. Para validar a metodologia foram utilizados os seguintes sistemas: 6 Barras, IEEE 24 e 118 Barras.

Em [34] apresenta-se uma nova abordagem dinâmica no problema de planejamento da expansão em sistemas de potência. A coordenação entre a expansão do sistema de geração e expansão do sistema de transmissão foi formulada como um problema de programação linear inteira mista. Em seguida, foi demonstrado que esse

modelo não pode ser resolvido eficientemente pelos métodos de solução tradicionais. Uma vez que o termo “não linear” vem da multiplicação de uma variável binária por uma contínua, a decomposição *Benders* foi empregada para converter a formulação não linear em uma programação linear inteira mista (PLIM) no problema mestre, e uma programação linear (PL) no subproblema. Além disso, diferentes tempos de construção foram considerados para diferentes instalações de transmissão e geração. Uma vez que esse método de planejamento dinâmico é uma versão atualizada de um modelo estático, os resultados de ambos os métodos foram também comparados.

Torres e Castro [35] resolveram o problema de Expansão da Transmissão (TEP) utilizando o modelo da rede de corrente alternada CA que é uma importante tendência. Este problema é extremamente difícil de resolver devido à sua natureza combinatória e não linear, conseqüentemente, poucas pesquisas abordaram essa modelagem. No presente trabalho, uma aplicação especializada da Evolução Diferencial melhorada é usada resolver o problema da TEP na sua forma estática, utilizando o modelo de CA e uma compensação de energia reativa. O objetivo principal da pesquisa é viabilizar o uso da rede modelo CA para o TEP. Algumas comparações são realizadas com o PSO a fim de demonstrar os bons resultados alcançados. Testes em sistemas reais são usadas para apresentar os resultados desta nova abordagem.

Apresentaram-se vários métodos encontrados na literatura para a solução do problema de planejamento da expansão dos sistemas de transmissão. Todos os trabalhos observados começaram com a utilização de métodos matemáticos de otimização que obtiveram soluções boas, mas com elevado tempo computacional. Com o intuito de otimizar a convergência dos algoritmos, técnicas meta-heurísticas foram utilizadas; mesmo não garantindo a solução ótima global, apresentam boas soluções quando trabalham com problemas não convexos. Os métodos heurísticos construtivos são alternativos para a solução do problema, possuem baixo tempo computacional e desta forma são viáveis ao se trabalhar com sistemas de grande porte.

I.3 Objetivo da Dissertação

Considerando o baixo esforço computacional, a robustez e o fato de que muitas propriedades e resultados dos algoritmos baseados em heurísticas construtivas encontram grande aplicabilidade no desenvolvimento de algoritmos mais complexos,

esta dissertação tem como objetivo verificar a eficiência do processo de otimização bioinspirado através das soluções iniciais.

Para tanto, faz-se uso de uma estratégia de resolução para o problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica através de duas etapas: (i) Na primeira etapa, fazendo uso do algoritmo heurístico construtivo de mínimo corte de carga, a meta é a obtenção de uma solução ótima local factível. Essa informação é importante para qualquer método de busca multimodal, pois sabe-se que partir de soluções ótimas locais de boa qualidade faz com que o processo de busca se torne mais eficiente; (ii) Na segunda etapa, a solução ótima local obtida pela heurística construtiva é repassada ao processo de busca multimodal bioinspirado no fenômeno da ecolocalização, "*Bat Algorithm*", o qual tem o objetivo de encontrar o planejamento mais econômico para expansão do sistema de transmissão em estudo.

A motivação está no fato de que as soluções iniciais dos métodos de busca multimodais são em sua concepção geradas de forma aleatória e essa inicialização tem papel relevante tanto na qualidade da solução final obtida, quanto no número de iterações necessárias para obtenção da otimalidade.

I.4 Principais Contribuições da Dissertação

As principais contribuições desta dissertação podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Aplicação do processo de otimização multimodal bioinspirado no fenômeno da ecolocalização, aliada ao problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Durante a pesquisa não foi encontrada na literatura especializada nenhum trabalho que tenha empregado a referida técnica ao problema estudado na presente pesquisa.
- Utilização de uma heurística construtiva, de fácil implementação e, principalmente, de baixo esforço computacional, com o objetivo de inicializar o processo de otimização multimodal de forma mais inteligente (menos aleatória) e, conseqüentemente, melhorar a eficiência do processo de busca.

I.5 Publicações Decorrentes da Dissertação

- **MORAES, C. A.**; SILVA JUNIOR, I. C.; MENDONCA, I. M.; MARCATO, A. L. M. PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ECOLOCALIZAÇÃO. SBPO-SIMPOSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2014, SALVADOR. SOBRAPO, 2014.
- **MORAES, C. A.**; SILVA JUNIOR, I. C.; MENDONCA, I. M.; DIAS, B. H.; OLIVEIRA, L. W. PLANEJAMENTO ESTÁTICO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ECOLOCALIZAÇÃO. CBA-CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2014, BELO HORIZONTE. CBA, 2014.
- ZANGIROLAMI, MONICA; CALIAN, ANA; **MORAES, C. A.**; SILVA JUNIOR, I. C.; DIAS, B. H.; OLIVEIRA, L. W. "*TRANSMISSION SYSTEM EXPANSION PLANNING USING BAT ALGORITHM WITH CONSTRUCTIVE HEURISTIC*". ARTIGO SUBMETIDO AO "*THE XI LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*" - CLAGTEE 2015.

I.6 Organização da Dissertação

Além deste Capítulo, esta dissertação contém mais seis capítulos e um apêndice.

No Capítulo II apresenta-se a formulação matemática do planejamento estático da expansão de sistemas elétricos de transmissão de energia elétrica (PEEST).

No Capítulo III é feita uma explicação sobre os algoritmos Heurísticos Construtivos e suas principais características, sendo apresentados alguns dos métodos mais abordados e dando ênfase ao utilizado nesse trabalho, que é a Heurística de Mínimo Corte de Carga.

Capítulo I – Introdução

No Capítulo IV são expostos conceitos sobre as meta-heurísticas, apontando principalmente aquela abordada nesse estudo, que é o processo de Ecolocalização baseado no comportamento dos Morcegos.

No Capítulo V pretende-se abordar as metodologias utilizadas neste trabalho, com finalidade de explicar as mesmas e como essas se correlacionam.

No Capítulo VI são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação do algoritmo proposto. Para tanto, será utilizado o sistema acadêmico de Garver, o sistema IEEE 24 Barras e um sistema real envolvendo as malhas equivalentes da região Sul do Brasil.

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

O Apêndice A mostra os dados dos sistemas elétricos utilizados nesta dissertação.

Capítulo II

Formulação Matemática para o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

II.1 Introdução

O Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão (PEEST) é classificado como um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), no qual se deve encontrar um plano de expansão ótimo, isto é, devem ser especificados os reforços que serão instalados na rede básica a fim de permitir uma operação viável em um horizonte de planejamento especificado.

Uma vez conhecida a configuração inicial, os dados de geração e a demanda do horizonte de planejamento, define-se o plano ótimo de expansão como sendo aquele que atende completamente à demanda, ileso de cortes de carga e com o menor custo de investimento possível associado.

Este é um problema de otimização de difícil solução e que apresenta algumas particularidades, tais como: (i) região de solução não convexa (multimodal), o que leva grande parte dos algoritmos a convergirem em direção de uma solução ótima local; (ii) a natureza combinatória do processo de planejamento que, normalmente, conduz ao fenômeno da explosão combinatória referente às alternativas de investimento, resultando em um elevado esforço computacional; (iii) a existência de sistemas elétricos não conexos (ilhados). Estas particularidades ilustram as principais dificuldades na elaboração de algoritmos rápidos, eficientes e robustos para a resolução do problema estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

II.2 Formulação do Problema

O PEEST é um problema de otimização não linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução envolve a determinação, dentre todos os circuitos candidatos à expansão, daqueles circuitos que devem ser construídos de modo a minimizar o custo total de investimento no sistema de transmissão de energia elétrica, além de um conjunto de restrições que devem ser satisfeitas.

Assim, o problema pode ser formulado como proposto em [36]:

MINIMIZAR Custo de Investimento no Sistema de Transmissão

Sujeito a:

Restrições de Balanço de Potência Ativa;

Restrições do Parâmetro de Expansão;

Restrições de Violação de Fluxo de Potência Ativa;

Restrições de Canalização.

Explicita-se por E o conjunto de circuitos existentes na topologia base de um sistema, C o conjunto de circuitos candidatos à expansão e F o conjunto de circuitos fictícios inseridos na formulação afim de contornar o problema de não conectividade das barras isoladas. São esses os circuitos que compõem a formulação do PEEST.

Seguem as características da função objetivo e das restrições que fazem parte da formulação proposta:

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

s.a

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

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

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

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

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

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

$$f_{ij} = \gamma_{ijFIC} \cdot \varphi_{ij} \quad \forall (i,j) \in F \quad (\text{II.8})$$

$$f_{ij} = PE \cdot \gamma_{ij} \cdot \theta_{ij} \quad \forall (i,j) \in C \quad (\text{II.9})$$

onde:

nr é o número de geradores fictícios;

nc é o número de circuitos candidatos;

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

r_m é a geração da unidade geradora de déficit (MW);

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

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

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

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

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

PE_k é o parâmetro de expansão do circuito candidato k , o qual será do conjunto de valores positivos inteiros ou assumirá valor nulo;

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

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

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

d_i é a demanda na barra i (MW);

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

φ_{ij} é a diferença angular entre as barras $i - j$ nos circuitos fictícios;

γ_{ijFIC} a susceptância dos circuito $i - j$ nos circuitos fictícios;

II.2.1 Função Objetivo (FOB)

A função objetivo, apontada na equação (II.1), atribui à minimização da soma dos custos do déficit de energia e dos investimentos condizentes à expansão do sistema de transmissão. Entretanto, o trabalho enfatiza a minimização da soma dos custos de investimento para a construção de novos circuitos, ou seja, da expansão propriamente dita. Porém, para evitar possíveis inviabilidades, considera-se uma parcela adicional denominada custo do corte de carga. Esta última pode ser interpretada como uma geração fictícia de potência ativa, de alto custo operacional, também conhecida como geração de déficit.

Os geradores fictícios são adicionados em cada barra de carga do sistema e, caso as expansões realizadas não garantam o atendimento à demanda, os geradores fictícios entram em operação garantindo o atendimento a demanda, porém à custos elevados. Ao introduzir esta parcela na função objetivo o problema torna-se sempre possível, no entanto, nem sempre é viável economicamente.

II.2.2 Restrições de Balanço de Potência Ativa

Tradicionalmente, no problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão é utilizado o modelo de fluxo de carga CC [36]. Tal composição baseia-se no acoplamento entre a potência ativa e o ângulo da tensão, viabilizando, com baixo esforço computacional e precisão aceitável, a determinação e a distribuição dos fluxos de potência ativa na rede de transmissão. Este tipo de modelagem é utilizado para estudos de planejamento, bem como para estudos preliminares da operação de sistemas elétricos de potência.

A lei de restrição do balanço de potência é fornecida na equação (II.2), também denominada de equação de atendimento a demanda. Tal lei verifica o estado da rede, além de representar as duas Leis de Kirchhoff, as quais precisam ser satisfeitas de forma coerente para o funcionamento bem sucedido do modelo. Estudos com o sistema brasileiro[37] mostram que os erros na aproximação são relativamente pequenos, entre 2% e 5% em circuitos mais sobrecarregados, de forma a conferir ao estudo boa confiabilidade.

II.2.3 Restrições de Canalização de Fluxo de Potência Ativa

A restrição (II.3) aponta os limites de fluxo de potência ativa nos circuitos existentes e candidatos, caracterizando a capacidade de transporte de fluxo das linhas de transmissão.

II.2.4 Restrições de Canalização de Geração Potência Ativa

As restrições (II.4), (II.5) apontam as restrições de canalização, ou seja, limites inferiores e superiores, dos geradores existentes e artificiais, sendo estes últimos referentes aos eventuais cortes de carga existentes no sistema, ou seja, os geradores de déficit.

II.2.5 Restrições de Fluxo de Potência Ativa

A formulação sugerida é composta por três tipos de circuitos: (i) circuitos existentes na topologia base; (ii) dos circuitos fictícios; (iii) dos candidatos à expansão; dados pelas equações (II.7), (II.8) e (II.9), respectivamente. Pode-se notar que quando um circuito candidato é adicionado à topologia existente, isto é: $PE_{ij} = 1$, a equação (II.9) fica idêntica à equação (II.7) e, portanto, o circuito candidato passa a fazer parte da topologia existente.

II.2.6 Restrições do Parâmetro de Expansão (PE)

O problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão baseia-se em determinar entre um conjunto de circuitos candidatos à expansão quais circuitos devem ser construídos de modo a otimizar os recursos financeiros disponíveis. Esta determinação de construir ou não os circuitos é efetuada pelo parâmetro de expansão. Conclui-se então, que o parâmetro de expansão PE_{ij} será sempre um valor pertencente ao grupo dos números inteiros positivos apontando a construção de uma linha candidata à topologia base, ou caso seja nulo, esse fato atestará que a linha candidata a que se relaciona não será construída. [38]

Desta forma, o parâmetro de expansão corresponde a uma variável discreta no problema de planejamento.

II.3 Conclusões Parciais

Neste capítulo pretendeu-se apresentar e esclarecer a formulação matemática do problema de expansão estática da transmissão de energia elétrica.

É possível classificar esse problema como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Essa caracterização nos permite concluir que este problema possui características não lineares e também engloba variáveis contínuas e discretas.

A caracterização anteriormente mencionada revela, dentre outras já citadas, um agravante para lidar com esse problema que é justamente o fato de esse possuir

variáveis discretas, as quais são mais peculiares em termos de modelagem matemática do que quando comparadas às variáveis contínuas, que são livres para poderem assumir quaisquer valores em quaisquer intervalos.

Há também o fato de esse problema ser originalmente não linear, sendo a não linearidade outro agravante em termos de modelagem matemática. Contudo, para solucionar essa dificuldade específica utilizou-se uma linearização do modelo, o que é uma prática bastante contundente em meio à literatura especializada, já que os resultados do fluxo de potência ativa encontrados pela metodologia linear aproximam-se da não linear.

Capítulo III

Algoritmos Heurísticos Construtivos

III.1 Considerações Iniciais

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica é um problema de programação inteira de difícil solução, especialmente para sistemas elétricos de grande porte, devido ao grande número de alternativas de expansão. Portanto, frequentemente, heurísticas tem sido empregadas, pois permitem obter soluções que, geralmente, são de boa qualidade em um tempo computacional aceitável.

Diante do panorama descrito acima, pode-se verificar na literatura a existência de várias técnicas e algoritmos computacionalmente eficientes, mas que não garantem a otimalidade da solução de problemas de programação inteira [39]. Tais algoritmos são denominados de heurísticos ou aproximados.

Etimologicamente, a palavra heurística é derivada do grego “*heuriskein*”, cujo significado é descobrir ou encontrar. Em otimização, a interpretação dessa palavra agrega um novo significado e possui um atenuante, pois se refere a um método de busca de soluções em que não existe qualquer compromisso com o sucesso de encontro da solução ótima [38]. Os algoritmos heurísticos são robustos e encontram, geralmente, soluções de boa qualidade com pouco esforço computacional. Porém, raramente, encontram as soluções ótimas globais, principalmente, em relação aos sistemas reais ou de grande porte. [16].

III.2 Heurística Construtiva aplicada ao Problema da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

Um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC), para o problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, tem a essência de ser um procedimento realizado passo a passo, em que para cada passo é acrescentado um ou inúmeros circuitos candidatos para realização da expansão da topologia base do sistema elétrico em análise.

O circuito a ser adicionado na topologia base é determinado através de um indicador de sensibilidade ou de desempenho. Portanto, o algoritmo parte de uma topologia base (circuitos já existentes) e uma previsão de demanda futura. Em cada passo de resolução adiciona-se um circuito candidato, via indicador de sensibilidade, e a topologia base vai sendo atualizada. O processo encerra-se quando o sistema elétrico, com a topologia base atualizada, passa a operar adequadamente, isto é, as unidades geradoras conseguem atender à demanda futura prevista para um possível horizonte de planejamento. A seguir, pontuam-se as características desses algoritmos, os quais prezam por serem [40]:

- Robustos e de fácil entendimento;
- Apresentam baixos esforços computacionais;
- Algumas características, propriedades e resultados desses podem ser utilizados para elaboração de algoritmos mais complexos.

A substancial distinção entre os diversos algoritmos heurísticos construtivos existentes na literatura encontra-se nos indicadores de sensibilidade e na modelagem do fluxo de carga utilizada.

III.3 Indicador de Sensibilidade

Um indicador de sensibilidade é uma medida que relaciona direta ou indiretamente a variação da função objetivo devido as alterações de algum outro parâmetro do sistema elétrico [41]. As seguintes características são peculiares de um indicador de sensibilidade [42]:

- Identifica os caminhos mais atrativos à expansão dos circuitos;
- É um indicador de caráter local, isto é, identifica a melhor estratégia para a configuração corrente não sendo capaz de identificar a melhor estratégia global para a topologia inicial (base) do sistema em análise

III.4 Principais Algoritmos Heurísticos Construtivos

A seguir, pretende-se apresentar um breve resumo dos principais algoritmos heurísticos construtivos utilizados na resolução do problema estático de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. No entanto, o maior destaque será dado para a heurística construtiva de Mínimo Corte de Carga, a qual será utilizada na estratégia de resolução apresentada nesta dissertação.

III.4.1 Algoritmo de Garver

O algoritmo heurístico construtivo proposto por Garver [16], no início da década de 70, foi o primeiro a ser utilizado na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

O algoritmo de Garver iniciou a fase dos heurísticos construtivos com o objetivo de encontrar soluções de boa qualidade e não, necessariamente, a solução ótima global. Sendo assim, Garver propôs a utilização de uma modelagem de fluxo de carga relaxada, atualmente conhecida como “Modelo de Transporte”, como a maneira mais apropriada para a resolução de problemas de planejamento, ao invés do uso de modelos mais exatos.

III.4.2 Algoritmo de Mínimo Esforço

Diante dos resultados alcançados por Garver, surgiram trabalhos propondo a utilização da modelagem CC no desenvolvimento de algoritmos heurísticos construtivos para o problema em questão. O modelo CC quando comparado com o modelo de transporte é uma representação mais adequada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, uma vez que na modelagem CC todos os circuitos do sistema elétrico devem obedecer às duas leis de Kirchhoff. Desta forma, foi proposto na década de oitenta o algoritmo de mínimo esforço [17]. Este algoritmo heurístico construtivo utiliza a modelagem de fluxo de carga CC e faz uso de um índice de sensibilidade na indicação dos caminhos de investimento no sistema de transmissão de energia elétrica.

III.4.3 Algoritmo de Villanasa-Garver

O algoritmo de Villanasa-Garver [18] foi proposto em 1985 e faz uso de duas redes elétricas superpostas com a finalidade de resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. A primeira rede elétrica representa os circuitos existentes na topologia corrente e a segunda corresponde aos circuitos fictícios existentes em todos os caminhos possíveis à expansão. O funcionamento do algoritmo consiste no fato de que o sistema elétrico deve ser capaz de operar adequadamente fazendo uso somente dos circuitos existentes na topologia corrente, isto é, sem o uso dos circuitos fictícios. Os circuitos fictícios só devem ser utilizados quando a topologia corrente for insuficiente para atender as restrições operativas do sistema elétrico.

Os circuitos presentes na topologia corrente devem satisfazer às duas leis de Kirchhoff e às restrições de fluxo de potência ativa. Já os circuitos pertencentes à rede fictícia devem satisfazer apenas à primeira lei de Kirchhoff. Esta modelagem foi denominada de “Híbrida”, pois uma parte de rede elétrica é representada pela modelagem CC e a outra pelo modelo de transporte.

III.4.4 Algoritmo de Mínimo Corte de Carga

A Heurística de Mínimo Corte de Carga será utilizada neste trabalho como um algoritmo capaz de fornecer uma solução inicial factível e de qualidade, a qual será entregue ao algoritmo de ecolocalização de morcegos, que também é empregado neste estudo e será mais tardiamente abordado de forma mais detalhada.

Portanto, essa heurística será a mais explorada dentre as demais nesse capítulo.

O algoritmo de mínimo corte de carga foi proposto em [19]. Este algoritmo é muito parecido com o algoritmo de mínimo esforço, pois utiliza o modelo de fluxo de carga CC e índices de sensibilidade como indicadores das rotas de expansão. Entretanto, no algoritmo de mínimo esforço os problemas de operação foram contornados permitindo que os circuitos sejam sobrecarregados e no algoritmo de mínimo corte de carga estas sobrecargas não são permitidas, uma vez que os circuitos devem permanecer dentro de limites de capacidade. Assim, tem-se a seguinte formulação:

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

s.a

$$B\theta + g + r = d \quad (\text{III.2})$$

$$|f_{ij}| \leq \bar{f}_{ij} \quad (\text{III.3})$$

$$|\phi_{ij}| \leq 10 \cdot \bar{\theta}_{ij} \quad (\text{III.4})$$

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

$$0 \leq r \leq \bar{r} \quad (\text{III.6})$$

$$\bar{\theta}_{ij} = \frac{\bar{f}_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad (\text{III.7})$$

θ irrestrito

onde:

r_i é o gerador artificial disposto em cada barra de carga do sistema. Um valor diferente de zero para esse gerador indica que há corte de carga no sistema.

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

B é a matriz de susceptância nodal;

θ é o vetor referente aos ângulos de potência;

g é o vetor referente a geração de potência ativa;

- r é o vetor referente aos geradores artificiais de potência ativa;
- d é o vetor de demanda do sistema elétrico;
- f_{ij} é o fluxo de potência ativa no circuito $i - j$;
- $\bar{\theta}_{ij}$ é a diferença angular máxima permitida entre as barras $i - j$;
- \bar{f}_{ij} é o limite de capacidade do circuito $i - j$;
- ϕ_{ij} é a diferença angular permitida ao circuito fictício $i - j$;
- \bar{g} é o limite máximo de geração de potência ativa;
- \bar{r} é o limite máximo do corte de carga.

As restrições funcionais (III.3) e (III.4) correspondem, respectivamente, às restrições de fluxo de potência ativa dos circuitos correntes e às restrições angulares referentes aos circuitos fictícios.

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

$$f_{ij} = \gamma_{ij} \cdot \theta_{ij} \quad (\text{III.8})$$

onde:

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

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

Para cada restrição do problema de otimização (III.1) associa-se um multiplicador de Lagrange (λ). Assim, o indicador de sensibilidade do algoritmo de mínimo corte de carga (IS_{ij}^{mcc}) é dado pela seguinte expressão:

$$IS_{ij}^{mcc} = -(\theta_{ij}) \cdot (\lambda_{ij}) \quad (\text{III.9})$$

onde:

λ_{ij} é a diferença entre os multiplicadores de Lagrange referentes às equações

de balanço de potência (III.2) das barras $i - j$.

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

Devido à modelagem utilizada, aparecem os mesmos problemas relacionados com a existência de sistema elétricos não conexos. Entretanto, com as restrições de violação de fluxo inseridas ao problema de otimização, uma nova condição deve ser imposta na representação dos circuitos fictícios. Além desses circuitos possuírem valores muito pequenos de susceptância, devem ter uma capacidade de transmissão muito maior do que a capacidade de um circuito candidato. Para isto, os circuitos fictícios devem ter aberturas angulares maiores que as máximas permitidas aos circuitos candidatos, isto é, $\phi_{ij} \gg \bar{\theta}_{ij}$. Esta condição garante que as diferenças angulares entre os laços artificiais não modifiquem as aberturas angulares dos circuitos existentes na topologia corrente. O algoritmo de mínimo esforço pode ser resumido nas seguintes etapas:

ALGORITMO DE MÍNIMO CORTE DE CARGA

- I. Adotar a topologia base como topologia corrente;
- II. Resolver o problema de programação linear para a topologia corrente. Se a solução não indicar cortes de carga no sistema, foi encontrada uma topologia factível, logo, passe para a etapa IV. Caso contrário, siga para a próxima etapa;
- III. Calcular os índices de sensibilidade (IS^{mcc}), equação (III.9), para todos os caminhos possíveis de expansão e adicionar a topologia corrente o circuito cujo caminho apresenta o maior valor absoluto de IS^{mcc} . Voltar à etapa anterior;
- IV. Ordenar os circuitos adicionados em ordem decrescente de custo e, definitivamente, eliminar do plano de expansão aqueles, que uma vez simulada a saída, não produzam cortes de carga no sistema elétrico.

III.5 Exemplo - Sistema Tutorial

Esse sistema tutorial explanado a seguir será resolvido passo a passo através da metodologia heurística construtiva de Mínimo Corte de carga [19].

Como forma didática de exemplificar a metodologia mencionada, utilizou-se um sistema elétrico tutorial composto por três barras, conforme Figura 2. Dentre as barras que compõem este pequeno sistema, existem duas barras de carga e uma barra de geração. Em cada uma das barras de carga existe um gerador artificial, o qual aponta a existência de déficit ou não no sistema.

Este sistema, demonstrado na Figura 2, tem como característica ser não conexo e apresenta uma barra isolada e um único circuito, entre as barras 1-3, na topologia base. As Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam os dados do sistema tutorial aqui apresentado.

Os eventuais problemas de operação do sistema elétrico são contornados através de dois geradores fictícios (r_2 e r_3), inseridos nas barras de carga. Eles representam os possíveis cortes de carga no sistema e, com a utilização de um circuitos fictícios, devem ter valores de susceptância bem menores que a dos circuitos existentes. Representam-se essas susceptâncias dentro de uma rede fictícia com valores de susceptâncias $n_{12} = n_{13} = n_{23} = 0,001$, mas esses também devem apresentar abertura angular máxima permitida a um circuito normal, neste estudo utilizará abertura angular máxima de $|\theta_i - \theta_j| \leq 10\overline{\theta}_{ij}$.

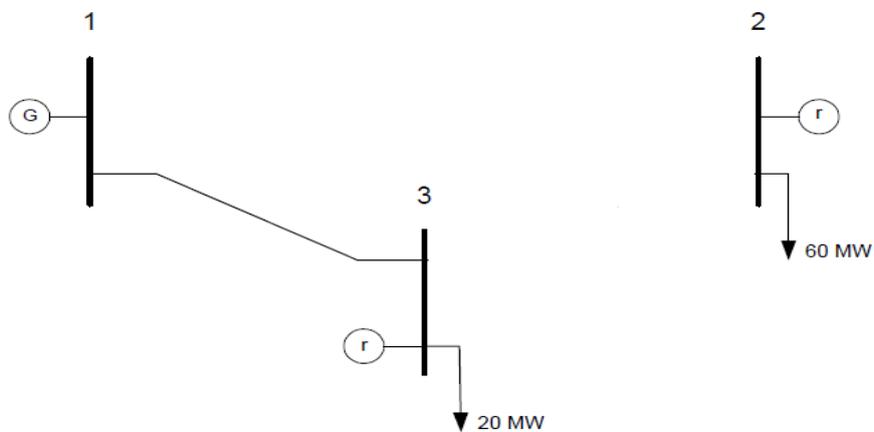


Figura 2: Sistema Tutorial.

Tabela 1: Dados de Barra do Sistema Tutorial.

Barra	Capacidade de Geração(MW)	Geração Atual (MW)	Carga (MW)
1	120	80	0
2	0	0	60
3	0	0	20

Tabela 2: Dados de Linha Existente do Sistema Tutorial.

Linha	Linhas Existentes	Reatância (pu)	Capacidade (MW)	Custo 10^3 \$
1-3	1	2	40	2

Tabela 3: Dados das Linhas Fictícias do Sistema Tutorial.

Linha	Linha Fictícia	Reatância (pu)	Capacidade (MW)	Custo 10^3 \$
1-2	1	3	35	3
2-3	1	2	40	2

Tabela 4: Dados das Linhas Candidatas a Expansão do Sistema Tutorial.

Linha	Linhas Existentes	Reatância (pu)	Capacidade (MW)	Custo 10^3 \$
1-2	0	3	35	3
1-3	1	2	40	2
2-3	1	2	40	2

Assim, a formulação matemática do problema assume a seguinte forma:

$$\text{minimize } w = r_2 \text{ e } r_3$$

s.a

$$-\left(\frac{1}{2} + x_{12} + x_{13}\right)\theta_1 + x_{12}\theta_2 + \left(\frac{1}{2} + x_{13}\right)\theta_3 + g_1 = 0$$

$$x_{12}\theta_1 - (x_{12} + x_{23})\theta_2 + x_{23}\theta_2 + r_2 = 60$$

$$\left(\frac{1}{2} + x_{13}\right)\theta_1 + x_{23}\theta_2 - \left(\frac{1}{2} + x_{13} + x_{23}\right)\theta_3 + r_3 = 20$$

$$|\theta_1 - \theta_2| \leq 1050$$

$$|\theta_1 - \theta_3| \leq 80$$

$$|\theta_2 - \theta_3| \leq 800$$

$$0 \leq g_1 \leq 80$$

$$0 \leq r_2 \leq 60$$

$$0 \leq r_3 \leq 20$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ irrestritos

O algoritmo de mínimo corte de carga resolve o sistema através das seguintes iterações:

Primeira Iteração:

Passo I

A configuração base é com $n_{12} = n_{13} = n_{23} = 0,001$, isto é, $x_{12} = n_{12}\gamma_{12} = 0,001\left(\frac{1}{3}\right) = 0,0003$ e $x_{13} = x_{23} = 0,0005$

Passo II

Após usar um algoritmo de PL para resolver o sistema III são obtidas as soluções e os indicadores de sensibilidade. Foi detectado o corte de carga na barra 2, então, é preciso utilizar o maior índice de sensibilidade para habilitar a construção da linha.

Passo III

Neste caso, o caminho 2-3 possui o maior indicador de sensibilidade. Assim, adiciona-se ao sistema um circuito no caminho 2-3, conforme observado na Figura 3, para obter a nova configuração corrente. Portanto, agora há os seguintes novos valores: $n_{12} = n_{13} = 0,001$ e $n_{23} = 1$, isto é,

$$x_{12} = n_{12} \gamma_{12} = 0,001 \left(\frac{1}{3}\right) = 0,0003 \text{ e } x_{13} = 0 \text{ e } x_{23} = 0,5$$

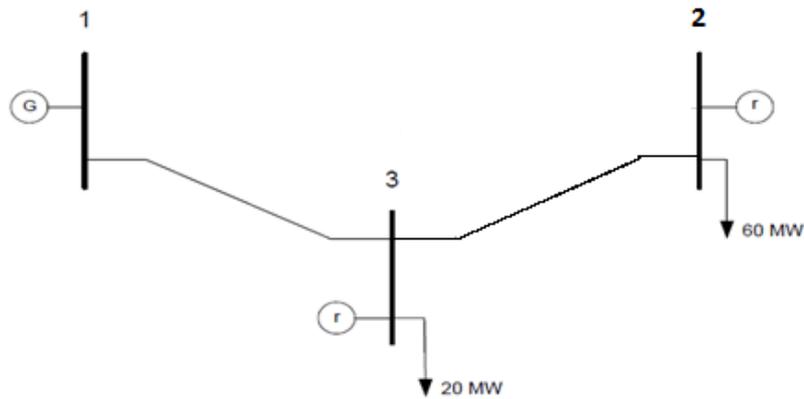


Figura 3: Sistema Tutorial Iteração I.

Segunda Iteração:

Passo II:

Deve-se resolver o sistema III, mas deve-se levar em conta que a seguinte restrição angular teve o limite modificado: $|\theta_2 - \theta_3| \leq 80$. Assim, soluciona-se a PL e obtém-se as soluções e os indicadores de sensibilidade.

Foi detectado o corte de carga nas barras 2 e 3, então é preciso utilizar o maior índice de sensibilidade para habilitar a construção da linha.

Passo III

Neste caso, o caminho 1-2 possui o maior indicador de sensibilidade. Assim, adiciona-se ao sistema um circuito no caminho 1-2, como observa-se na Figura 4, para obter a nova configuração corrente. Portanto, agora temos os seguintes novos valores: $n_{12} = 1$, $n_{13} = 0$ e $n_{23} = 1$, isto é, $x_{12} = n_{12} \gamma_{12} = 1 \left(\frac{1}{3}\right) = 0,3333$ e $x_{13} = 0$ e $x_{23} = 0,5$

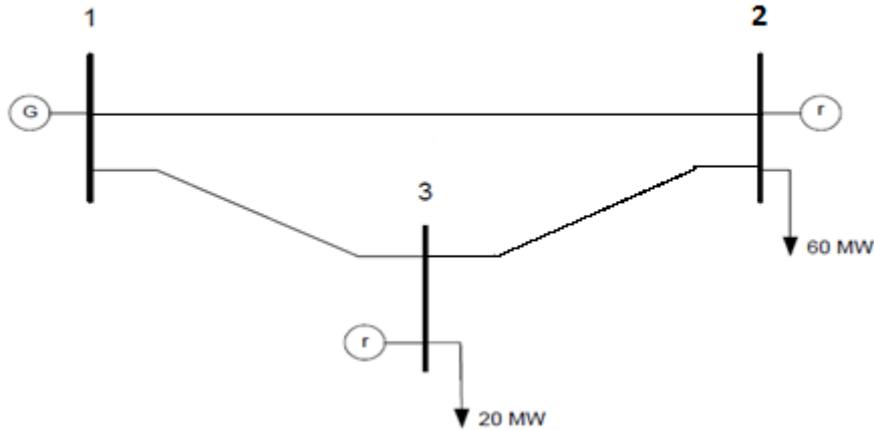


Figura 4: Sistema Tutorial Iteração II.

Terceira Iteração:

Passo II

Deve-se resolver o sistema III mas levando em conta que a seguinte restrição angular teve o limite modificado: $|\theta_1 - \theta_2| \leq 105$ e $|\theta_2 - \theta_3| \leq 80$. Assim, soluciona-se a PL e obtém-se as soluções e os indicadores de sensibilidade.

Foi detectado o corte de carga na barra 2, portanto, é preciso utilizar o maior índice de sensibilidade para habilitar a construção da linha.

Passo III

Neste caso, o caminho 1-2 possui o maior indicador de sensibilidade. Assim, adiciona-se ao sistema um circuito no caminho 1-2, conforme ilustrado na Figura 5, para obter a nova configuração corrente. Logo, agora há os seguintes novos valores:

$$n_{12} = 2, n_{13} = 0 \text{ e } n_{23} = 1, \text{ isto é, } x_{12} = n_{12} \gamma_{12} = 2\left(\frac{1}{3}\right) = 0,6666 \text{ e } x_{13} = 0 \text{ e } x_{23} = 1$$

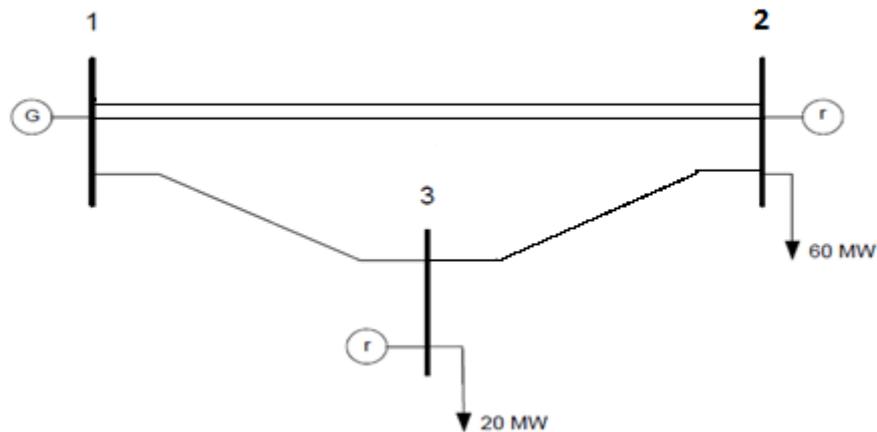


Figura 5: Sistema Tutorial Iteração III.

Quarta Iteração

Passo II

Deve-se resolver o sistema III, porém, deve-se assumir que a seguinte restrição angular teve o limite modificado: $|\theta_1 - \theta_2| \leq 105$ e $|\theta_2 - \theta_3| \leq 80$. Assim, soluciona-se a PL e obtém-se as soluções e os indicadores de sensibilidade.

Não foi detectado o corte de carga em todas as barras do sistema, então termina-se as iterações com um custo de investimento associado igual a \$8.000,00. Em seguida realiza-se o passo IV.

Passo IV

Simulando a saída de cada um dos circuitos obtidos adicionados anteriormente, pode-se verificar que a retirada da linha 2-3 não produz corte de carga, portanto, uma vez retirada a linha 2-3, tem-se a configuração final com um custo associado de \$6.000,00. A configuração final pode ser observada através da Figura 6.

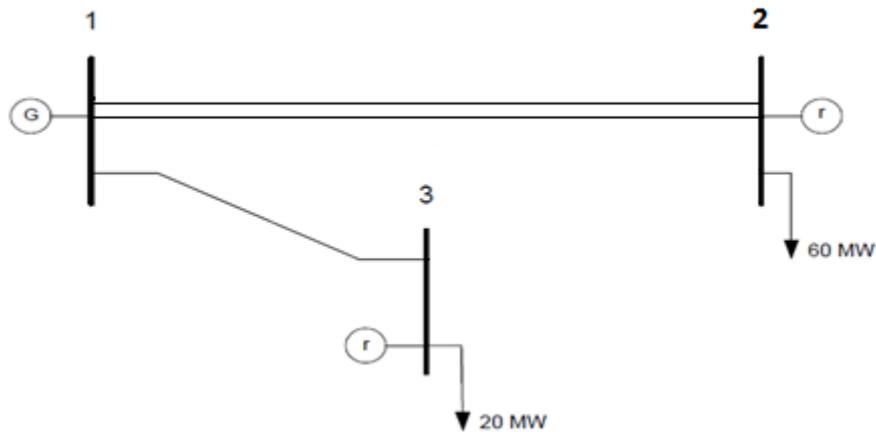


Figura 6: Sistema Tutorial Iteração IV.

III.6 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentado um resumo dos principais algoritmos heurísticos construtivos existentes na literatura.

Apesar de em muitos casos não serem encontradas soluções ótimas globais contempladas na literatura específica, os heurísticos construtivos são algoritmos extremamente relevantes pela facilidade de compreensão, implementação, baixo esforço computacional e, em muitos casos, são empregados como geradores de topologias factíveis e de qualidade para a inicialização de algoritmos multimodais de maior robustez, uma vez que a eficiência da busca no espaço de soluções é função dessas soluções iniciais factíveis.

Capítulo IV

Otimização Bioinspirada

IV.1 Introdução

Inúmeros pesquisadores, nos últimos anos, têm desenvolvido novas abordagens para problemas de otimização, tendo como inspiração os mecanismos de adaptação biológica existentes na natureza. Desta forma, foram desenvolvidos algoritmos inspirados na teoria da evolução das espécies, na observação de colônias de insetos buscando alimento, no funcionamento dos sistemas imunológicos dos mamíferos defendendo o organismo contra invasores, entre outros. Esses algoritmos têm apresentado grande eficiência na resolução de inúmeros problemas não só de engenharia, mas de outras áreas de conhecimento. Atualmente, muitos algoritmos bioinspirados fazem parte do conjunto de ferramentas que se associam a um grande número de projetos de alta tecnologia [12], [43], [44]. A seguir será descrito, em detalhes, o processo de otimização bioinspirado no fenômeno da ecolocalização observado no comportamento dos morcegos, "*Bat Algorithm (BA)*"[42], uma vez que é o processo de otimização multimodal utilizado nesta dissertação para resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

IV.2 Ecolocalização

Além da audição passiva, a maioria dos morcegos possui uma audição ativa, também conhecida como ecolocalização, que será abrangida nesse trabalho. Esse sentido funciona da seguinte maneira: O morcego emite ondas sonoras ultrassônicas, ou seja, com frequência muito alta (pelas narinas ou pela boca, dependendo da espécie). Essas ondas atingem obstáculos no ambiente e voltam na forma de ecos, que são perceptíveis aos morcegos. Com base no tempo em que os ecos demoraram a voltar, nas direções de onde vieram e nas direções de onde nenhum eco veio, os morcegos sentem se há obstáculos no caminho, suas distâncias, formas e velocidades relativas entre eles.

Esse sentido também é chamado de "biosonar", pois foi a partir dele que o sonar de navios e o aparelho de ultrassom médico foram desenvolvidos.

A seguir, na Figura 7, existe uma ilustração do esquema de Ecolocalização de Morcegos.

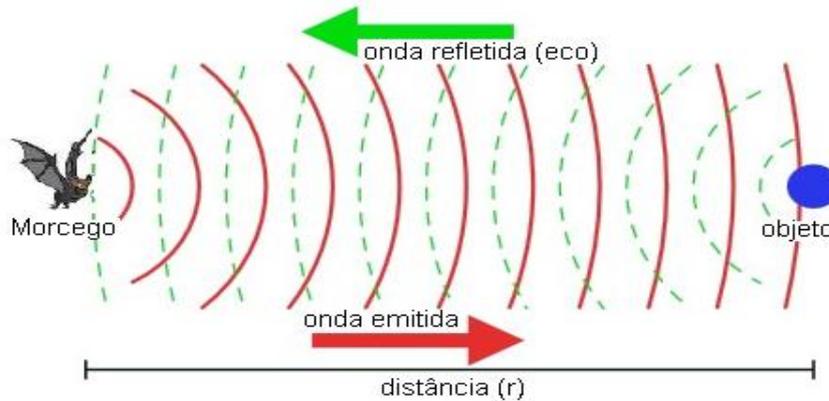


Figura 7: Esquema de Ecolocalização de Morcegos. Fonte: Wikipedia.

IV.3 Algoritmo de Otimização BioInspirado

O "*Bat Algorithm*" é um algoritmo bioinspirado no fenômeno da ecolocalização observado no comportamento dos morcegos na procura por alimentos e locomoção (desvio de obstáculos). O BA é uma técnica de otimização recente, 2010, sendo desenvolvida por Xin-She Yang [42], professor da Universidade de Cambridge.

O algoritmo proposto em [42] tem como base as seguintes premissas:

1. As populações de morcegos virtuais fazem uso da ecolocalização para mensurar distâncias e são sensíveis a diferença entre o alimento/presa ou barreiras/obstáculos e o espaço delimitado pela sua localização;
2. Os morcegos virtuais voam aleatoriamente com velocidade v_i , posição x_i e com uma frequência f_i , variando a taxa de emissão de pulso r_i e a amplitude sonora A_i para procurar alimento.
3. À medida que o morcego virtual se aproxima da presa, a amplitude de volume do pulso emitido A_i diminui e a taxa de emissão de pulso r_i aumenta.

A Figura 8 apresenta o fluxograma básico do algoritmo inspirado no fenômeno da ecolocalização.

Inicialmente, é gerada uma população virtual de morcegos. Essa população inicial representa as soluções iniciais do problema de otimização.

Cada morcego virtual possui sua taxa de emissão de pulso r_i , volume emitido A_i , velocidade v_i , posição x_i e frequência f_i , os quais são inicializados aleatoriamente.

Consequente, as soluções, também caracterizadas como a posição de cada morcego são analisadas e classificadas, verificando seus valores de função objetivo e então é criada uma lista de aptidões de cada morcego, a fim de se atribuir a posição x^* para o indivíduo que apresentou a melhor valor de função objetivo da lista.

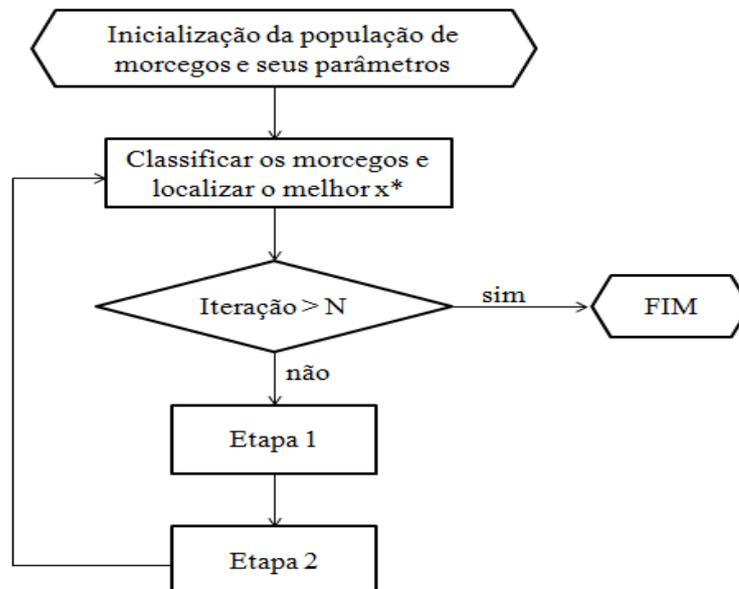


Figura 8: Fluxograma Ecolocalização de Morcegos. Etapa 1: Novas Posições; Etapa 2: Avaliação.

O passo seguinte consiste na inicialização do processo de busca bioinspirado. Primeiramente, verifica-se o critério de convergência do processo de otimização, o qual é concebido através do número máximo de iterações. Caso não seja a última iteração dá-se início a Etapa 1.

No início da Etapa 1 novas posições (diferentes das iniciais que foram ranqueadas em uma lista previamente), as quais denominam-se posições temporárias, são realocadas para cada morcego da população, em seguida inicia-se a Etapa 2, onde as novas

posições passam por avaliação. Após isso, novamente, os morcegos serão ordenados em uma lista e o processo é repetido.

Na Etapa 1, representada na Figura 9, as equações (IV.1), (IV.2) e (IV.3) são atualizadas a cada iteração, desta forma tem-se inúmeras atualizações para frequência, velocidade e posição no espaço ao longo do processo. Cada morcego virtual está associado com uma velocidade (v) e uma localização (x) na iteração t .

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (IV.1)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x^* - x_i^{t-1})f_i \quad (IV.2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (IV.3)$$

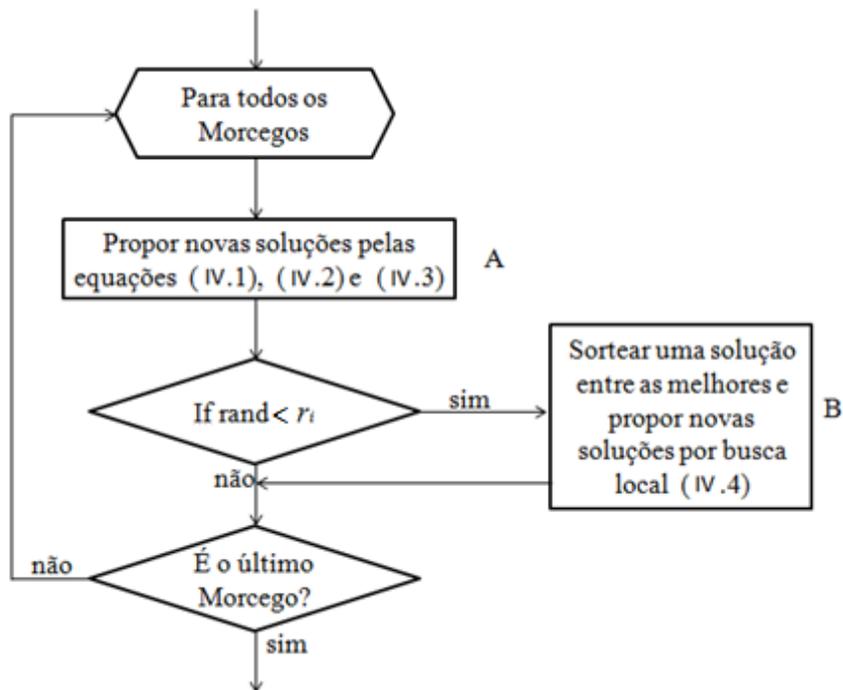


Figura 9: Fluxograma Ecolocalização de Morcegos – Etapa 1.

Para a equação IV.1 observa-se o ajuste da frequência da onda sonora emitida. O método de ecolocalização de morcegos pode ser efetuado utilizando os comprimentos de onda ou frequências da onda sonora para a sua implementação. Observa-se que neste

estudo usou-se a frequência, e a mesma está compreendida entre um intervalo:

$$f_{max} < f_i < f_{min}.$$

Inicialmente, a cada morcego será aleatoriamente atribuído a uma frequência que está compreendida no intervalo $[f_{min}, f_{max}]$. Também observa-se na equação IV.1 a existência de um escalar β , este está compreendido em um intervalo $[0,1]$.

Depois de efetuado os cálculos e efetivado a atualização da frequência, é possível atualizar a velocidade de cada indivíduo na equação IV.2. Essa velocidade relaciona-se com a frequência obtida na iteração atual e com os parâmetros de velocidade e posição obtidos na iteração imediatamente anterior.

Finalmente, com os dados atualizados de frequência e velocidade é possível determinar uma nova posição temporária aos indivíduos da população virtual de morcegos, feito na equação IV.3, a qual contempla a velocidade da iteração atual e a posição obtida na iteração imediatamente anterior para todos os indivíduos.

Em seguida é feito um teste, em que verificam-se as taxas de emissão de pulso emitidas por cada indivíduo. Tal procedimento consiste em comparar a taxa de emissão r_i com um escalar aleatório, no caso uma função randômica (rand). Se o escalar for inferior à taxa de emissão do pulso r_i , pode ser interpretado que o morcego está longe da presa, ou seja, distante de x^* . Quando se depara com tal evento, o que decorre é uma busca local, representada pela equação IV.4, funcionando da seguinte maneira: sorteia-se uma solução entre as bem sucedidas e por meio de ínfimos deslocamentos obtém-se uma nova solução temporária para o morcego- i , através de tal lei matemática:

$$x_{novo} = x_{velho} + \epsilon A^t \tag{IV.4}$$

Sendo o ϵ denominado operador de mutação não uniforme, pertencente ao intervalo $[-1,1]$, trata-se de um vetor aleatório de mesma dimensão de x_i , e A^t é a média das amplitudes de volumes sonoros emitidos de todos os morcegos em uma iteração t .

Como mencionado anteriormente, essa etapa consiste em um teste para os indivíduos da população virtual, objetivando verificar se eles estão próximos a melhor posição x^* , e somente entram nessa etapa, aqueles indivíduos que são considerados

longínquos a essa melhor posição e, portanto, esses têm a possibilidade de atualizar novamente a sua posição temporária com a equação IV.4.

Pode-se então concluir que é desejável que o número de indivíduos da população de morcegos que compõem essa busca local seja pequena, pois, dessa forma fica implícito que a maioria está próxima de x^* . Essa etapa é uma tentativa de tornar a busca mais refinada.

Em seguida, obtidas todas as soluções temporárias advindas da Etapa 1, segue-se para a Etapa 2 ilustrada pela Figura 10.

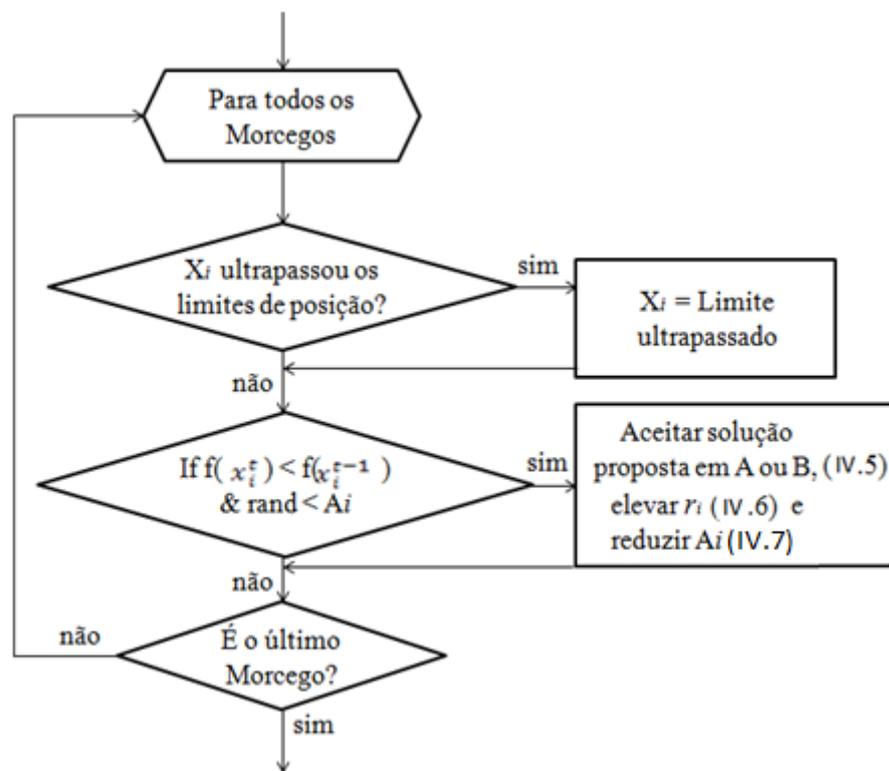


Figura 10: Fluxograma Ecolocalização de Morcegos – Etapa 2.

Dentro desta etapa, o primeiro passo e prioritário é verificar se há ou não transgressão do espaço de busca pelas soluções temporárias previstas pela Etapa 1, caso exista, corrige-se essas violações trazendo o indivíduo transgressor para dentro do limites. Após isso analisam-se duas proposições para que as propostas advindas da Etapa 1 sejam de fato aderidas.

- Ratificar se a solução temporária é melhor que a obtida anteriormente, por exemplo, se caso estiver na primeira iteração, irão ser confrontados os valores da função objetivo obtida pelas posições iniciais geradas aleatoriamente com os valores de função objetivo gerados pelas posições temporárias gerados na Etapa 1;
- Confrontar o volume do pulso A_i com o valor da função randômica (rand). Caso seja verificado um valor randômico menor do que o volume de pulso A_i , será concluído que o morcego- i (localizado em x_i) está próximo de sua presa (posição x^*).

Verificadas e reiteradas essas condições, atualizam-se as posições dos morcegos, bem como as suas taxas de emissão de pulso r_i e volumes dos pulsos emitidos A_i . Conforme explanado nas premissas que integram o algoritmo, existe um acréscimo na taxa de emissão consoante a um decréscimo de volume do pulso emitido e verifica-se matematicamente tal a seguir, nas equações (IV.5) , (IV.6) e (IV.7) :

$$x_i^t = \text{round } x_{temp} \quad (IV.5)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - e^{\gamma \cdot tempo}] \quad (IV.6)$$

$$A_i^{t+1} = \alpha(A_i^t) \quad (IV.7)$$

$$0 < \alpha < 1 \quad (IV.8)$$

$$\gamma > 1 \quad (IV.9)$$

Sendo α e γ constantes positivas delimitadas nas equações (IV.8) e (IV.9).

Dessa forma, finda a etapa 2: verificação e avaliação das posições temporárias. Se essas posições temporárias forem aceitas como melhores, elas passarão agora a ser as soluções iniciais passadas para o início do processo de busca bioinspirada, que repetirá

essas etapas descritas até que se atinja o número máximo de iterações designadas no processo.

IV.4 Variantes do BA

O algoritmo padrão ecolocalização de morcego tem muitas vantagens, e uma dessas utilidades é que ele pode proporcionar a convergência muito rápida em um estágio inicial. Isso o torna o algoritmo eficiente para aplicações, tais como, problemas que envolvem classificações de melhores rotas dentre outros, quando é necessária uma solução rápida.

A fim de melhorar o desempenho, muitos métodos e estratégias têm sido elaborados para aumentar a diversidade da solução e, portanto, melhorar o desempenho, o que produziu algumas boas variantes do algoritmo de morcego.

A partir de um levantamento bibliográfico, encontram-se as seguintes variantes algoritmo baseadas no fenômeno de Ecolocalização realizado por morcegos[45]:

Lógica “*Fuzzy Bat Algorithm*” (FLBA): Khan et al. [46] apresentou uma variante por introduzir a lógica fuzzy no algoritmo BA, chamaram sua variante difusa.

Algoritmo “*Bat Multiobjective*” (MOBA): Yang [47] estendeu BA para lidar com otimização multiobjetivo, que demonstrou a sua eficácia para resolver alguns benchmarks de design em engenharia.

“*K-Means Bat Algorithm*” (KMBA): Komarasamy e Wahi [48] apresentou uma combinação de K-médias e algoritmo de bat (KMBA) para agrupamento eficiente.

“*Chaotic Bat Algorithm*” (CBA): Lin et al. [49] apresentaram um algoritmo de BA caótico usando L'evy vôos e mapas caóticos para realizar estimativa de parâmetros na dinâmica sistemas biológicos.

Algoritmo “*Bat Binary*” (BBA): Nakamura et al. [50] desenvolveram uma versão discreta algoritmo de morcego para resolver classificações e problemas de seleção de atributos.

“*Differential Operator and L'evy Bat Algorithm*” (DLBA): Xie et al.[51] apresentou uma variante do algoritmo de BA usando operador diferencial e vôos L'evy para resolver problemas de otimização de função.

“*Improvement Bat Algorithm*” (IBA): Jamil et al. [52] estendeu o algoritmo BA com uma boa combinação de L'evy vôos e variações sutis de amplitude de volume e

taxas de emissão de pulso. Eles testaram a IBA contra mais de 70 funções de teste diferentes e provaram ser muito eficientes.

Existem também outras melhorias e variantes do algoritmo, por exemplo, Wang et al. [53] utilizaram mutação para aumentar a diversidade de soluções.

Além disso, Wang e Guo [54] fizeram o algoritmo híbrido do morcego com busca harmônica e produziram um algoritmo de morcego híbrido para otimização numérica de solucionar benchmarks.

Por outro lado, Fister Jr et al. (2013) [55] incorporou “*quaternions*” em algoritmo de morcego e apresentou um algoritmo “*Bat Quaterniões*” (QBA) para geometria e otimização de grande escala problemas computacionais com largas rotações. Pode-se esperar que mais variantes ainda estão sob investigação ativa.

IV.5 Conclusões Parciais

Nesse capítulo objetivou-se apresentar o algoritmo baseado no fenômeno de Ecolocalização realizado por Morcegos.

Provavelmente, muitos algoritmos metaheurísticos destacam-se em meio a literatura específica e demonstram-se mais eficientes para determinadas aplicações mas, geralmente, o algoritmo de morcego tem a vantagem da simplicidade, possui poucos parâmetros para inicialização: taxa de emissão de pulso r_i , volume emitido A_i , velocidade v_i , posição x_i e frequência f_i .

Pode-se destacar também outra vantagem do algoritmo, que é o controle de parâmetro. Muitos algoritmos metaheurísticos utilizam parâmetros fixos, ao passo que o BA utiliza parâmetros que podem ser programados para variar, são esses valores os parâmetros (A_i e r_i). Isso insere uma maneira de mudar automaticamente as posições dos indivíduos a fim de explorar melhor o espaço de busca e refinar esse processo.

Capítulo V

Metodologia Proposta

V.1 Introdução

Nesse capítulo será apresentada a estratégia de resolução indicada nesta dissertação para a resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tanto, fez-se uso de uma heurística construtiva com a finalidade de aumentar a eficiência do processo de busca bioinspirado no fenômeno da ecolocalização. A motivação desta proposta está no fato de que as soluções iniciais dos métodos de busca multimodais são em sua concepção geradas de forma aleatória e essa inicialização tem papel relevante tanto na qualidade da solução final obtida, quanto no número de iterações necessários para obtenção da otimalidade.

V.2 Estratégia de Resolução

Considerando o baixo esforço computacional, a robustez e o fato de que muitas propriedades e resultados dos algoritmos baseados em heurísticas construtivas encontram grande aplicabilidade no desenvolvimento de algoritmos mais complexos, fez-se uso de uma estratégia de resolução para o problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica através de duas etapas: (i) Na primeira etapa, faz-se uso do algoritmo heurístico construtivo de mínimo corte de carga. Nesse primeiro percurso, o objetivo é a obtenção de uma solução ótima local factível, vide Figura 11. Essa informação é importante para qualquer método de busca multimodal, pois sabe-se que partir de soluções ótimas locais de boa qualidade torna o processo de busca mais eficiente. Detalhes sobre a heurística aqui empregada foram apresentadas no capítulo III; (ii) Na segunda etapa, a solução ótima local obtida pela heurística construtiva é repassada ao processo de busca multimodal bioinspirado no fenômeno da ecolocalização, “*Bat Algorithm*”, o qual tem o objetivo de encontrar o planejamento mais econômico para expansão do sistema de transmissão em estudo.

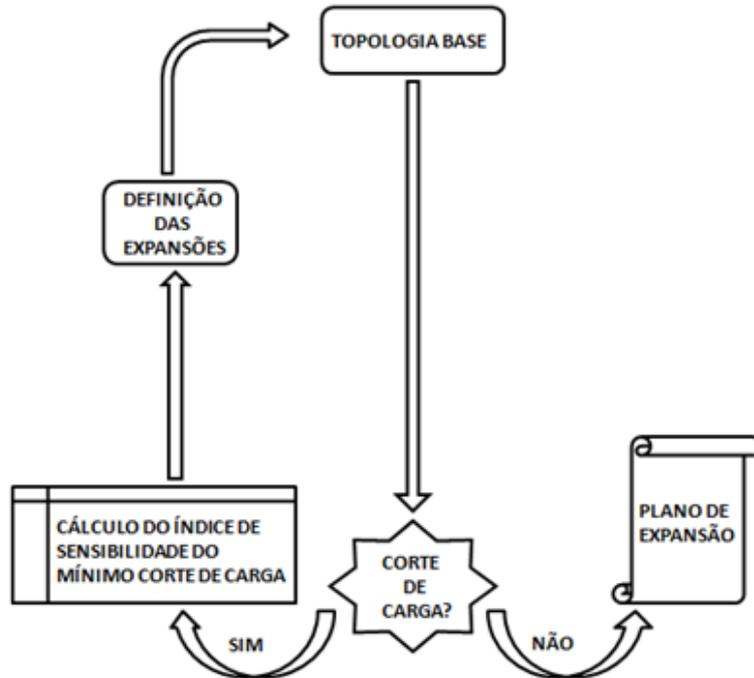


Figura 11: Fluxograma da Heurística de Mínimo Corte de Carga.

Conhecido o resultado fornecido pela heurística construtiva utilizada, parte-se para a obtenção do plano final de expansão através do processo de otimização bioinspirado, “*Bat Algorithm*”, vide Figura 12.

Inicialmente, todos os morcegos (h) são inicializados através dos seguintes parâmetros: (a) Taxa de Pulso; (b) Velocidade; (c) Amplitude; (d) Frequência; (e) Posição aleatória.

Definidos os parâmetros acima mencionados, parte-se para a avaliação da população de morcegos virtuais (linha 3, Figura 12). Essa avaliação corresponde ao valor numérico da função objetivo, Equação (II.1), para cada um dos morcegos virtuais existentes na análise (soluções do problema de otimização).

Diante da avaliação de toda a população, é possível determinar a posição do melhor morcego, melhor solução (linha 4, Figura 12).

Após essa etapa, parte-se efetivamente para o processo de busca bioinspirado. Para tanto, a frequência de cada morcego virtual é atualizada (linha 7, Figura 12), sendo ela mesma utilizada para determinar a nova velocidade (linha 8, Figura 12) e, conseqüentemente, a nova posição (solução) temporária de cada morcego virtual (linha 9, Figura 12). Destaca-se que a posição temporária é função da melhor posição encontrada até o instante t .

```

1:Parâmetros:  $\eta, \alpha, \lambda$ 
2:Inicialização dos Morcegos  $x_i^t$ 
3:Avaliação dos Morcegos  $f(x_i^t)$ 
4:Atualiza Melhor Morcego  $x_i^t$ 
5:Enquanto o Critério de Parada não for Atingido Faça
6:Loop 1:  $\eta$ 
7:  $f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta$ ,  $\beta \in [0,1]$ 
8:  $v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_i^t)f_i$ 
9:  $x_{temp} = v_i^{t+1} + x_i^t$ 
10: Se  $rand < r_t$ ,  $rand \in [0,1]$ , então
11:  $x_{temp} = round(x_i^t + \varepsilon.média(A))$ ,  $\varepsilon \in [-1,1]$ 
12: fim(linha 10)
13: Se  $rand < A_i$  ou  $f(x_{temp}) \leq f(x_i)$ ,  $rand \in [0,1]$ , então
14:  $x_i^t = round(x_{temp})$ 
15: se  $x_i^t > x_i^{\max}$ 
16:  $x_i^t = x_i^{\max}$ 
17: fim(linha 15)
18: se  $x_i^t < x_i^{\min}$ 
19:  $x_i^t = x_i^{\min}$ 
20: fim(linha 18)
21:  $r_t^{t+1} = 1 - \exp(-\lambda t)$ 
22:  $A_i^{t+1} = \alpha A_i^t$ 
23: fim(linha13)
24: Atualiza Melhor Morcego  $x_i^t$ 
25: fim(linha6)
26: fim(linha 5)

```

Figura 12: Pseudocódigo – Algoritmo Bioinspirado- BA. Fonte: *Nature Inspired Metaheuristic Algorithms, Second Edition*.

Determinada a posição temporária, parte-se para a etapa de busca local (linha 10, Figura 12). Nessa nova etapa, uma componente aleatória é inserida podendo ser usada tanto para exploração, quanto para intensificação, dependendo do tamanho do passo. Assim, o valor da posição temporária é atualizada pela busca local sem considerar o valor da velocidade e da posição anterior (linha 11, Figura 12). Como o problema em estudo é discreto, ou seja, as soluções finais são números inteiros positivos, optou-se por arredondar a solução temporária contínua obtida.

Conhecida a solução temporária, seja obtida pela atualização da posição e velocidade ou pelo processo de busca local surge uma pergunta: a solução deve ou não deve ser aderida? Se a condição (linha 13, Figura 12) for verdadeira, a solução temporária é aceita e, se for o caso, colocada dentro dos limites superiores (linha 15,

Figura 12) ou inferiores (linha 18, Figura 12). Além disso, um aumento da taxa de pulso é considerado, sendo que para t tendendo ao infinito a taxa de emissão de pulsos tende ao valor unitário (linha 21, Figura 12). Ou seja, com o passar do tempo a busca local se intensifica. Outro parâmetro atualizado é a amplitude. Para controlar a diminuição gradual da amplitude foi utilizado o método geométrico, no qual a amplitude decresce através de uma taxa de diminuição alfa (linha 22, Figura 12). Para valores altos de amplitude tem-se uma probabilidade maior de aceitar novas soluções. Para valores de amplitudes baixos, uma solução de qualidade ruim é raramente aceita. Como critério de parada, foi utilizado o número máximo de iterações. Além do que foi descrito acima, os seguintes pontos merecem destaque:

- A solução originada pela heurística construtiva (Plano de Expansão, vide Figura 11) é utilizada como uma das soluções iniciais do processo de otimização bioinspirado (as demais soluções são geradas de forma aleatória). Como se trata de um problema (PEEST) de otimização não convexo, com vários pontos de mínimos, é evidente que o ponto de partida do processo de otimização tem grande influência tanto na qualidade (custo de investimento) da solução final obtida como na eficiência do processo de busca.
- Cada morcego virtual representa uma possível configuração/plano de expansão para o sistema de transmissão em estudo. Ou seja, cada morcego virtual é representado por um vetor (denominado de vetor Parâmetros de Expansão-PE) de dimensão igual ao número de rotas candidatas à expansão contendo números discretos (arredondados) de expansões de cada uma das rotas candidatas existentes. Esse arredondamento se faz necessário, uma vez que as equações de velocidade e deslocamento do processo de otimização (linhas 8 e 9 do pseudocódigo) podem gerar valores contínuos.
- Conhecidos os vetores PEs, os mesmos são repassados para um Fluxo de Potência Ótimo Linear (FPOL) de modo a verificar a viabilidade das soluções (existência de corte de carga ou não) e o FPOL retorna o custo total de expansão de cada vetor PE analisado, vide exemplo Figura 13. O FPOL foi desenvolvido no *solver* MATLAB utilizando a função

LINPROG, a qual fez uso do método de pontos interiores como técnica de resolução.

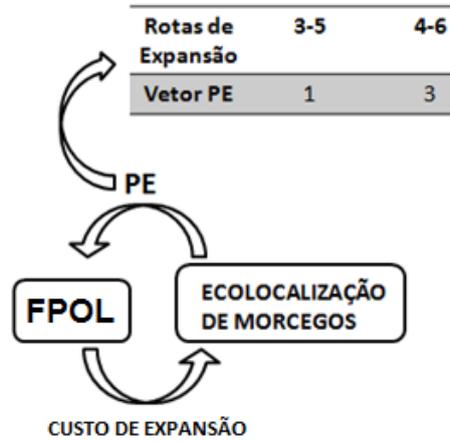


Figura 13: Relação entre a Ecolocalização e FPOL.

A Figura 14 apresenta o fluxograma geral da metodologia proposta, dividida em blocos, para a resolução do PEEST.

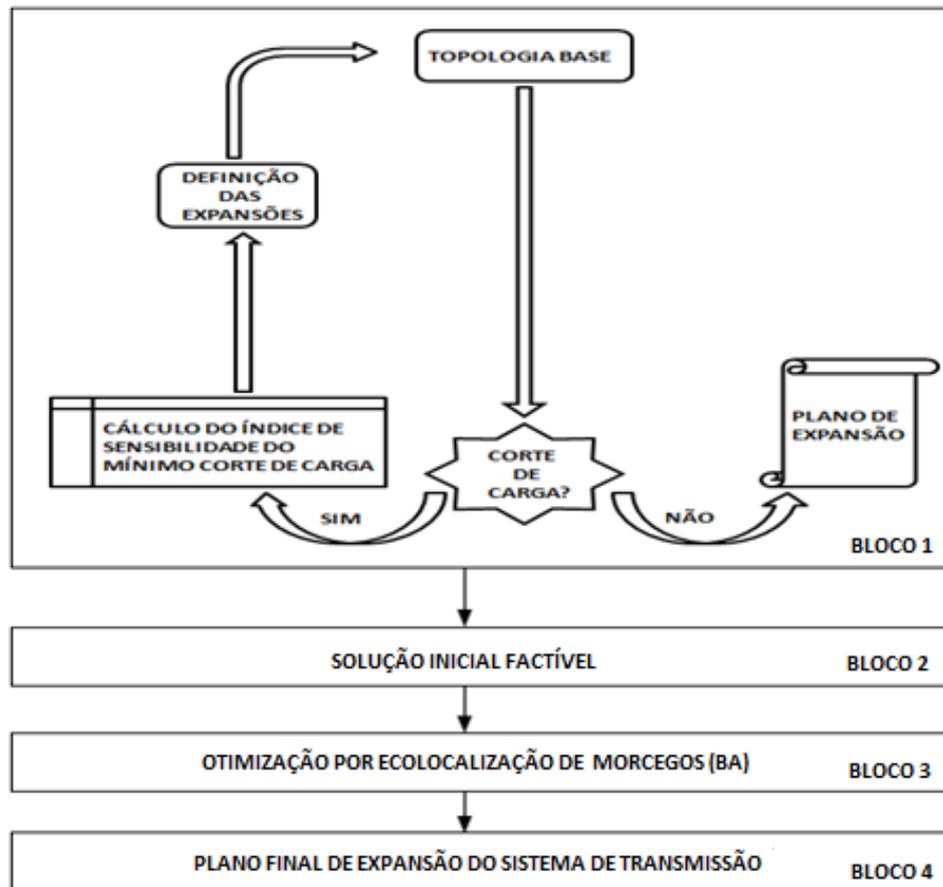


Figura 14: Fluxograma Geral da Metodologia Proposta.

V.3 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta, de forma a elucidar cada uma das técnicas de otimização utilizadas e como essas correlacionam-se para obtenção do resultado final desse estudo, que é justamente a obtenção de um plano final de expansão para o planejamento estático da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica.

Capítulo VI

Estudo de Casos

VI.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é explicitar os resultados obtidos pela estratégia proposta para a solução de problemas de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão.

Conseqüentemente, serão utilizados como sistemas testes para aferição da estratégia proposta: (i) o sistema acadêmico criado por Garver; (ii) o sistema composto de 24 barras, denominado IEEE 24 barras; (iii) o sistema real equivalente a região Sul do Brasil.

Para cada sistema serão feitas as seguintes análises:

A) Resultado do sistema utilizando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga;

B) Resultado do sistema utilizando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos;

C) Resultado do sistema utilizando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos;

D) Análise realizada visando identificar a obtenção da otimalidade dos sistemas pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação. Para tal fim, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e o processo de ecolocalização. Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas

Os resultados apresentados serão comparados com os resultados obtidos pelos principais algoritmos heurísticos construtivos existentes na literatura, de modo a verificar o desempenho da metodologia proposta.

Os dados de todos os sistemas citados neste capítulo estão contidos no Apêndice A.

VI.2 Sistema de Garver

Este sistema, proposto inicialmente por Garver [16], é bastante conhecido na literatura sendo formado por 6 barras, 6 circuitos existentes na topologia base, 15 caminhos candidatos à expansão e uma demanda prevista para o horizonte de planejamento de 760MW.

Este sistema proposto por Garver, apesar de ser de pequeno porte, consegue ilustrar as principais dificuldades encontradas na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, pois é um sistema não conexo. A seguir, na Figura 15, segue o ilustrativo do Sistema Garver.

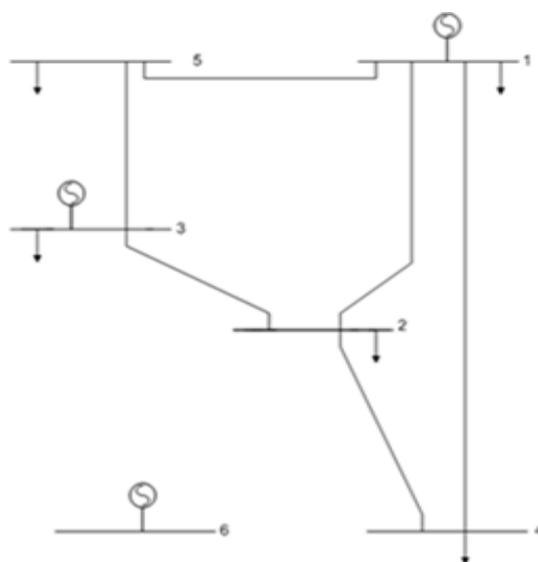


Figura 15: Sistema Garver.

Este sistema proposto por Garver, apesar de ser de pequeno porte, já ilustra as principais dificuldades encontradas na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, pois é um sistema não conexo. Para atestar os resultados obtidos pela metodologia proposta serão feitas duas análises em relação ao sistema de Garver. Na primeira análise, será permitido o redespacho das unidades geradoras e, no segundo caso, as unidades geradoras terão os despachos predeterminados.

VI.2.1 Caso 1: Sistema de Garver com Redespacho de Geração - Garver CR

Este sistema apresenta um número total de $4^{15} = 1.10^9$ combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente a explosão combinatórias das alternativas de investimento na transmissão.

Para esta primeira análise, com o redespacho de geração, adotou-se os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de três expansões por caminho candidato; (iii) um número máximo de 100 iterações; (iv) um número de 200 morcegos virtuais constituintes da população artificial; (v) amplitude de volume sonoro de 0,1 e taxa de emissão de pulsos igual a 0,5.

A. 1ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

Neste caso foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, ou seja, 15 rotas candidatas, vide apêndice A.

Nesta simulação foi utilizado o algoritmo heurístico construtivo a fim de selecionar as rotas relevantes à expansão.

A Tabela 5 apresenta as rotas do plano final de expansão obtido pela metodologia proposta para o sistema de Garver com redespacho de geração. A convergência foi obtida com 16 iterações e em 1,097 segundos.

O plano de expansão encontrado pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga contempla cinco rotas adicionais a topologia base com um custo de US\$169.000.000,00.

Tabela 5: Plano de Expansão Garver CR para a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

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

B. 2ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Para esse mesmo caso em análise, o resultado demonstra as seguintes expansões representadas na tabela 6. Utilizou-se somente a Ecolocalização de Morcegos, com um custo de investimento de US\$110.000.000, construindo três novas linhas. Veja a seguir:

Tabela 6: Plano de Expansão Garver CR para a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

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

Na Figura 16, pode-se observar o gráfico da convergência para tal procedimento em análise. O resultado foi obtido em 215,9851 segundos, na nonagésima primeira iteração.

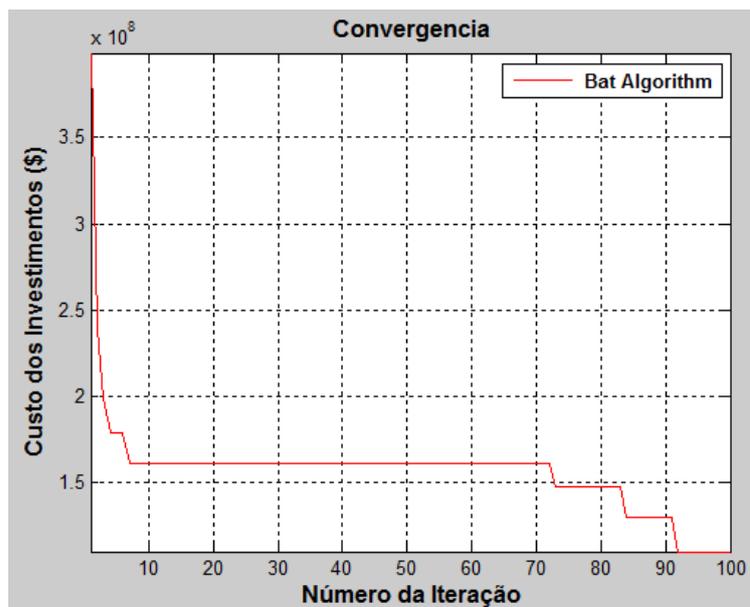


Figura 16: Gráfico da Convergência do Sistema Garver CR utilizando Ecolocalização de Morcegos.

C. 3ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão com uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Essa simulação faz uso da metodologia da Heurística de Mínimo Corte de Carga como um procedimento que fornece uma solução inicial para o Ecolocalização de Morcegos atuar e, assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca.

O plano final de expansão obtido para o sistema de Garver com redespacho de geração, considerando a solução inicial selecionada pelo AHC é o mesmo apresentado na Tabela 6, com um custo total de investimento de US\$110.000.000,00, acrescentando três novas linhas a topologia original.

A Figura 17 apresenta o gráfico de convergência do processo de busca bioinspirado, em que se pode concluir que a solução ótima foi encontrada na décima iteração. O tempo de processamento para esse caso foi 220,5317 segundos.

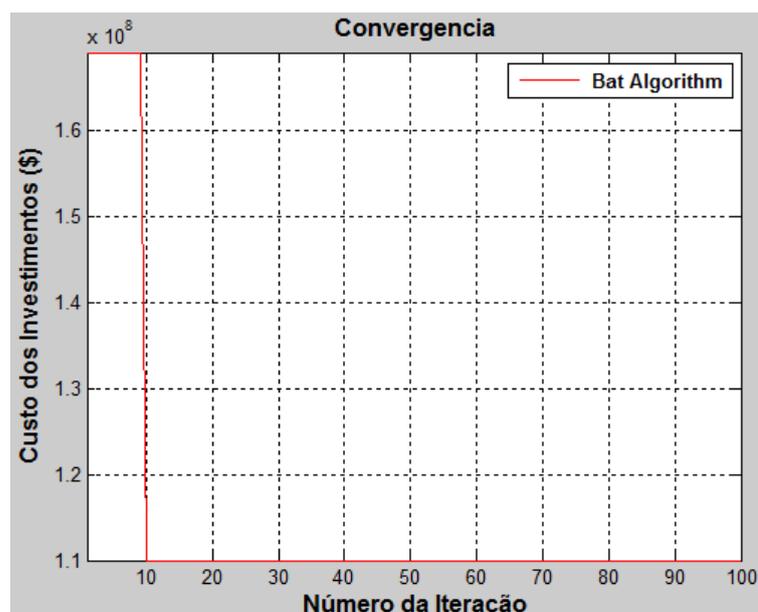


Figura 17: Gráfico de convergência de Garver CR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.

D. 4ª Simulação: Otimalidade do Sistema Garver CR

Uma nova análise foi realizada visando identificar a obtenção da otimalidade do sistema Garver CR pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação.

Para tanto, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e do processo de ecolocalização.

Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas, vide Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Otimalidade – Garver CR.

METODOLOGIA	OTIMALIDADE(%)
Ecolocalização	40%
Ecolocalização+AHC	58%

Diante dos resultados apresentados, Tabela 7, pode-se verificar que a estratégia de inicialização do processo de ecolocalização pela heurística construtiva proporcionou um aumento da eficiência do processo de busca pela otimalidade.

A seguir, na Tabela 8, pretende-se realizar uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão, obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura: Particle Swarm Optimization PSO[4], Greedy Randomized Adaptive Search Procedure GRASP [56], Hybrid Simulated Annealing (HSA) [57], Scatter Search (SS) [58] e Branch-and-Bound (B&B) [59].

Tabela 8: Comparação entre as Metodologias para o sistema Garver CR.

ALGORITMOS DE SOLUÇÃO	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (em milhões de dólares)
PSO	110
GRASP	110
HSA	110
SS	110
B&B	110
PROPOSTO	110

VI.2.2 Caso 2: Sistema de Garver sem Redespacho de Geração - Garver SR

Sem redespacho de geração, o problema de planejamento torna-se mais difícil, uma vez que as unidades geradoras têm seus despachos de potência predeterminados.

Nesse caso, o número total de combinações possíveis de investimento para a expansão é da ordem de 5^{15} ou $3 \cdot 10^{10}$.

Para esse fim, foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de quatro expansões por caminho candidato; (iii) um número máximo de 100 iterações; (iv) um número de 200 morcegos virtuais constituintes da população artificial; (v) amplitude de volume sonoro de 0,1 e taxa de emissão de pulsos igual a 0,5.

A. 1ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

O algoritmo heurístico construtivo de mínimo corte de carga encontrou as seguintes soluções demonstradas na Tabela 9 a seguir, com acréscimo de 9 linhas novas a topologia base do sistema. A convergência foi obtida com 13 iterações e em 1,7349 segundos.

O plano de expansão encontrado pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga contempla cinco rotas adicionais a topologia base, com um custo de US\$394.000.000,00.

Tabela 9: Plano de Expansão Sistema Garver SR para a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

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

B. 2ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

O algoritmo de Ecolocalização de Morcegos encontrou as seguintes soluções demonstradas na Tabela 10. O plano de expansão apresentado na Tabela 10, tem um custo de investimento na transmissão de US\$200.000.000, com a construção de 7 novos circuitos.

Tabela 10: Plano de Expansão Sistema Garver SR para a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

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

A seguir, na Figura 18, pode-se observar o gráfico da convergência para tal procedimento em análise. Esse resultado foi obtido em 1086,9536 segundos e na iteração número 88.

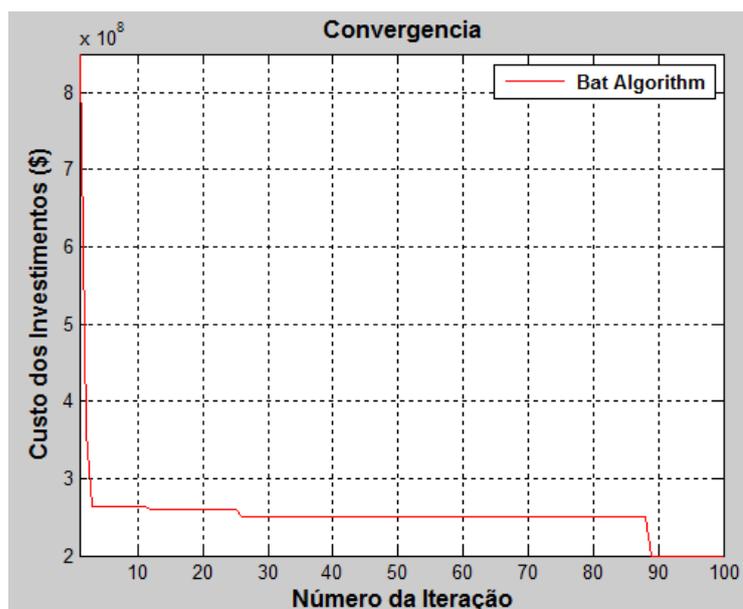


Figura 18: Gráfico da Convergência do Sistema Garver SR utilizando Ecolocalização de Morcegos.

C. 3ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão com uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Essa simulação faz uso da metodologia da Heurística de Mínimo Corte de Carga como um procedimento que fornece uma solução inicial para o Ecolocalização de Morcegos atuar e, assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca.

O algoritmo heurístico construtivo de mínimo corte de carga junto ao Ecolocalização de Morcegos encontrou o mesmo plano de expansão demonstrado na tabela 10.

O plano de expansão encontrado pela metodologia tem um custo de investimento na transmissão de *US\$ 200.000.000*, com a construção de 7 novos circuitos.

O resultado foi obtido com um tempo de processamento de 1042,0245 segundos e na trigésima segunda iteração.

A seguir na Figura 19, demonstra-se o processo de convergência do algoritmo.

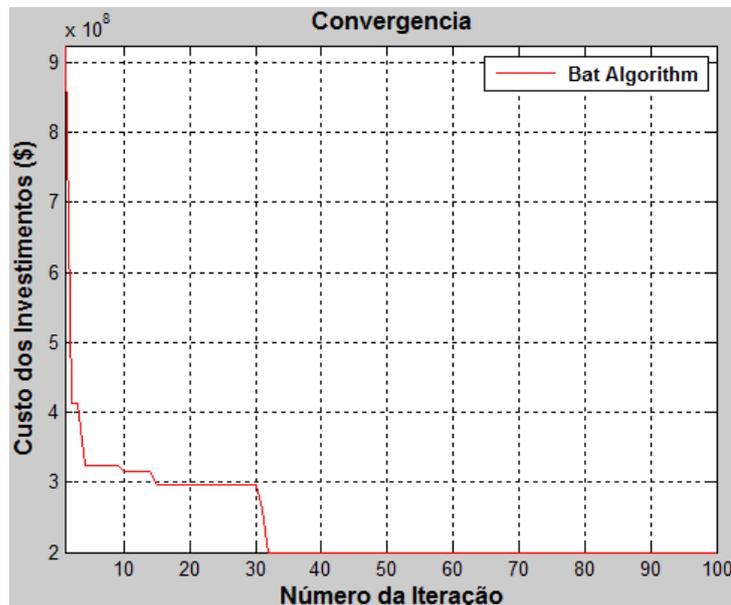


Figura 19: Gráfico de convergência de Garver SR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.

D. 4ª Simulação: Otimalidade do Sistema Garver SR

Novamente, uma análise foi realizada visando identificar a obtenção da otimalidade do sistema Garver SR pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação.

Para tanto, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e do processo de ecolocalização.

Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas, vide Tabela 11 abaixo.

Tabela 11: Otimalidade – Garver SR.

METODOLOGIA	OTIMALIDADE(%)
Ecolocalização	26%
Ecolocalização+AHC	40%

Diante dos resultados apresentados, Tabela 11, pode-se verificar que a estratégia de inicialização do processo de ecolocalização pela heurística construtiva proporcionou um aumento da eficiência do processo de busca pela otimalidade.

A seguir, na Tabela 12, pretende-se realizar uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura: Particle Swarm Optimization PSO[4], Greedy Randomized Adaptive Search Procedure GRASP [56], Hybrid Simulated Annealing (HSA) [57], Scatter Search (SS) [58] e Branch-and-Bound (B&B) [59].

Tabela 12: Comparação entre as Metodologias para o sistema Garver SR.

ALGORITMOS DE SOLUÇÃO	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (em milhões de dólares)
PSO	200
GRASP	200
HSA	200
SS	200
B&B	200
PROPOSTO	200

VI.3 Sistema Sul Equivalente

Este sistema real é formado originalmente por 46 barras, das quais 11 barras estão isoladas, 66 circuitos existentes na topologia base, 79 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 6880 MW. Vide Figura 20.

Tal sistema foi proposto inicialmente em [17] e vem sendo muito utilizado para validar os resultados de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão.

Novamente, serão consideradas duas situações, em cuja primeira análise será permitido o redespacho das unidades geradoras e na segunda, as unidades geradoras terão os despachos de potência predeterminados.

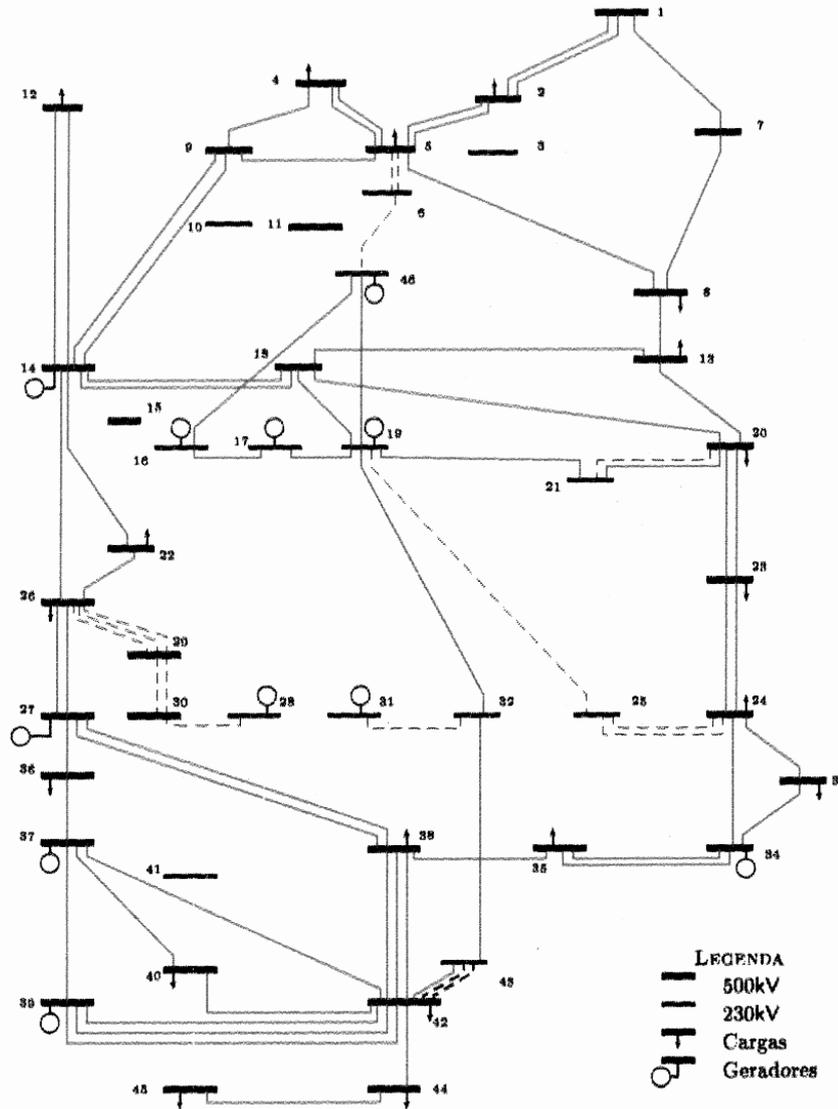


Figura 20: Ilustração do Sistema Sul Equivalente do Brasil.

VI.3.1 Caso 3: Sistema Sul equivalente com Redespacho de Geração - Sul CR

Para este caso tem-se um número total de 3^{79} ; 5.10^{37} combinações possíveis de investimento, ilustrando novamente a dificuldade da obtenção do ponto de mínimo global.

Para este caso, foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de duas expansões por caminho candidato; (iii) um número máximo de 100 iterações;

(iv) um número de 200 morcegos virtuais constituintes da população artificial; (v) amplitude de volume sonoro de 0,1 e taxa de emissão de pulsos igual a 0,5.

A. 1ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

A Tabela 13 apresenta o plano de expansão obtido pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga para o sistema Sul Equivalente com redespacho de geração.

Para esse plano de Expansão observa-se uma adição de 8 novos circuitos contemplando um custo de expansão de US\$90.748.000,00, em um tempo de processamento de 7,39 segundos, com 23 iterações.

Tabela 13: Plano de expansão do Sistema Sul CR utilizando a Heurística construtiva de Mínimo Corte de Carga.

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
20-21	1
42-43	1
18-20	1
46-06	1
21-25	1
05-06	2
24-25	1

B. 2ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

A Tabela 14 apresenta o plano de expansão obtido pela Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos para o Sistema Sul Equivalente considerando o redespacho de geração.

Tabela 14: Plano de expansão do Sistema Sul CR utilizando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

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

A solução ótima para esse experimento corresponde a um custo de investimento de US\$ 70.289.000, obtido com 642,7246 segundos na 97ª iteração.

Na Figura 21, pode-se observar o gráfico da convergência para tal procedimento em análise.

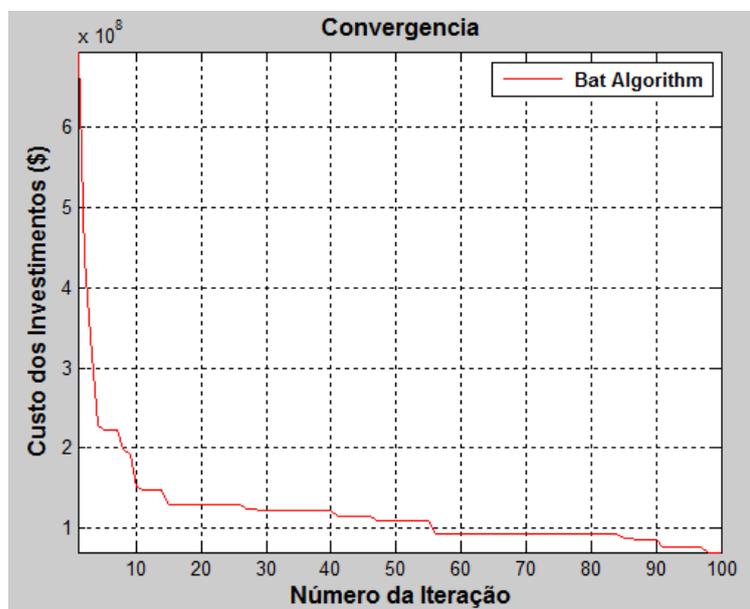


Figura 21: Gráfico de convergência do Sistema Sul CR com uso da Meta-heurística da Ecolocalização de Morcegos.

C. 3ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão com uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Essa simulação faz uso da metodologia da Heurística de Mínimo Corte de Carga como um procedimento que fornece uma solução inicial para o Ecolocalização de Morcegos atuar e, assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca.

O plano de expansão obtido pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e a meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos para o sistema Sul Equivalente com redespacho de geração é o mesmo apresentado na Tabela 14.

Na Figura 22 pode-se observar o gráfico da convergência para tal procedimento em análise.

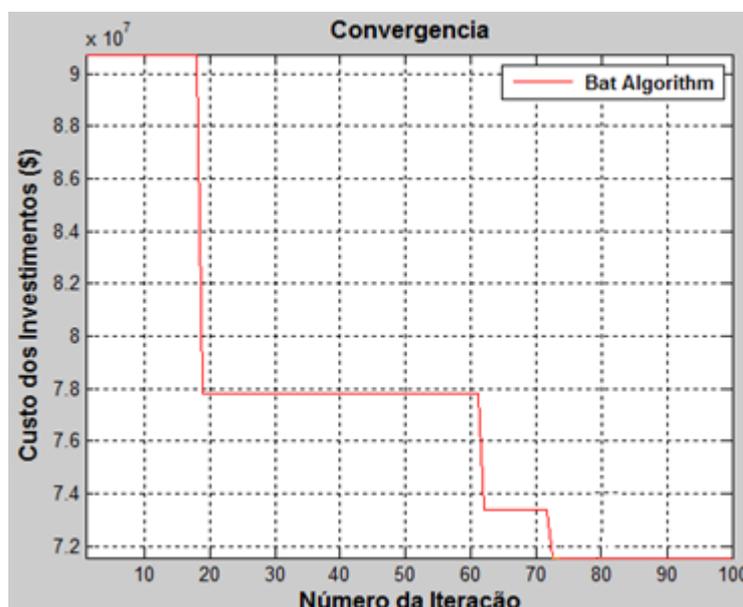


Figura 22: Gráfico de convergência do Sistema Sul CR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.

A solução ótima para este caso corresponde a um custo de investimento de US\$70.289.000, obtido com 541,1228 segundos na 73ª iteração.

D. 4ª Simulação: Otimalidade do Sistema Sul CR

Novamente, uma análise foi realizada visando identificar a obtenção da otimalidade do sistema sul CR pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação.

Para tanto, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e do processo de ecolocalização.

Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas, vide Tabela 15 abaixo.

Tabela 15: Otimalidade – Sul CR.

METODOLOGIA	OTIMALIDADE(%)
Ecolocalização	24%
Ecolocalização+AHC	42%

Diante dos resultados apresentados, Tabela 15, pode-se verificar que a estratégia de inicialização do processo de ecolocalização pela heurística construtiva proporcionou um aumento da eficiência do processo de busca pela otimalidade.

A seguir, na Tabela 16, pretende-se realizar uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura: Particle Swarm Optimization PSO [4], Meta-heurísticas [15], Decomposição de Benders [60] e Branch-and-Bound (B&B) [59].

Tabela 16: Comparação entre as Metodologias para o sistema Sul CR.

ALGORITMOS DE SOLUÇÃO	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (em milhões de dólares)
PSO	70,289
META-HEURÍSTICAS	70,870
DECOMP. BENDERS	70,289
B&B	70,289
PROPOSTO	70,289

VI.3.2 Caso 4: Sistema Sul Equivalente sem Redespacho de Geração - Sul SR

A melhor solução para este caso foi inicialmente publicada em [17] por Romero e Monticelli como sendo o plano de expansão ótimo global. O custo total deste plano de expansão é de US\$154.420.000, que corresponde à adição de 16 novos circuitos a topologia base.

Para este caso, foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de três expansões por caminho candidato; (iii) um número máximo de 100 iterações; (iv) um número de 200 morcegos virtuais constituintes da população artificial; (v) amplitude de volume sonoro de 0,1 e taxa de emissão de pulsos igual a 0,5.

A. 1ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

A topologia proposta pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga para o sistema Sul Equivalente sem redespacho de geração é mostrada na Tabela 17.

Tabela 17: Sistema Sul SR usando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS	CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
18-20	1	27-29	1
19-25	1	05-06	2
20-21	1	31-41	1
42-43	2	40-41	1
46-06	1	16-28	1
24-25	2	17-19	1

A solução ótima para este caso corresponde a um custo de investimento de US\$206.293.000,00, com um tempo de processamento de 45,74 segundos, com 58 iterações.

B. 2ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

A topologia proposta pela Meta-heurística Ecolocalização de Morcegos para o sistema Sul Equivalente sem redespacho de geração é mostrada na Tabela 18.

Tabela 18: Sistema Sul SR usando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

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

A solução ótima para este caso corresponde a um custo de investimento de US\$154.420.000,00, obtido com 612,7854 segundos, com 96 iterações.

A seguir, na Figura 23, o processo de convergência do método.

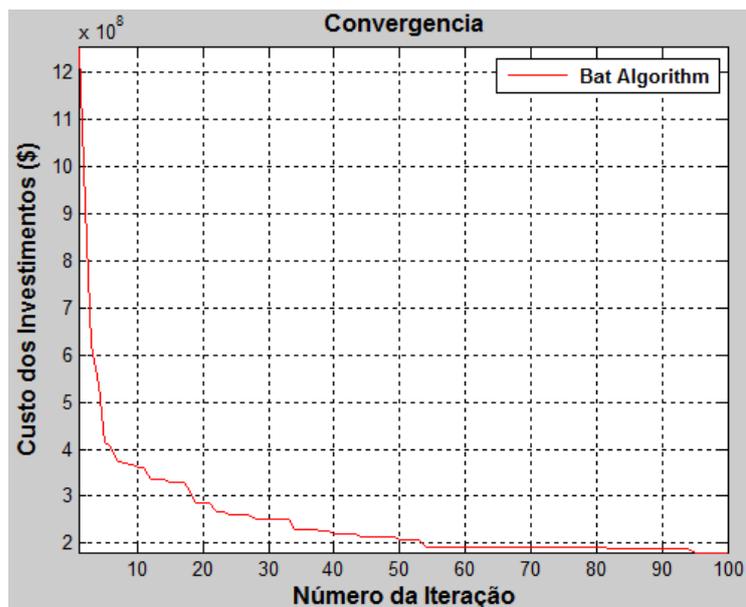


Figura 23: Gráfico de convergência do Sistema Sul SR com uso da meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

C. 3ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão com uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Essa simulação faz uso da metodologia da Heurística de Mínimo Corte de Carga como um procedimento que fornece uma solução inicial para o Ecolocalização de Morcegos atuar e, assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca.

O plano de expansão obtido pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos para o sistema Sul Equivalente sem redespacho de geração é o mesmo apresentado na Tabela 18.

A solução ótima global obtida para este caso corresponde a um custo de investimento de US\$154.420.000,00, obtido com 555,6621 segundos na 62ª iteração.

A seguir, na Figura 24, o gráfico da convergência da simulação.

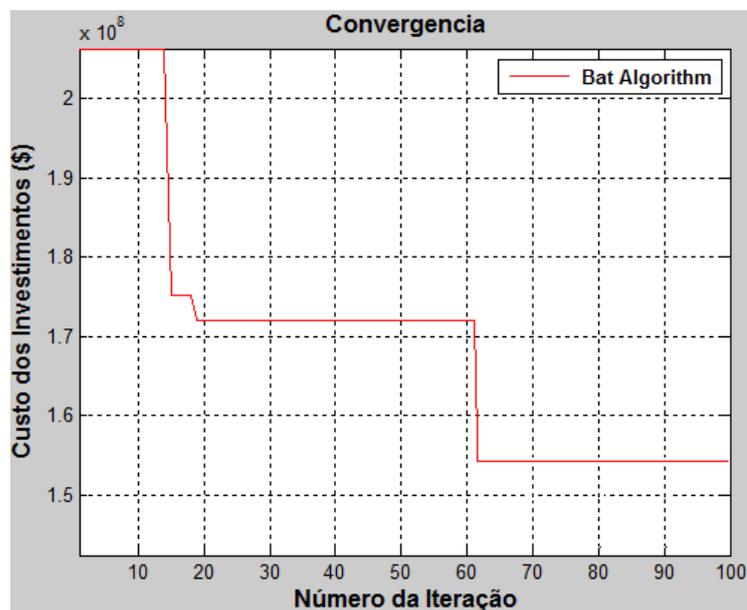


Figura 24: Gráfico de convergência do Sistema Sul SR com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.

D. 4ª Simulação: Otimalidade do Sistema Sul SR

Visando identificar a obtenção da otimalidade do sistema Sul Equivalente SR pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação. Para tanto, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e do processo de ecolocalização.

Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas, vide Tabela 19 abaixo.

Tabela 19: Otimalidade – SUL-SR.

METODOLOGIA	OTIMALIDADE(%)
Ecolocalização	20%
Ecolocalização+AHC	40%

Diante dos resultados apresentados, vide Tabela 19, pode-se verificar que a estratégia de inicialização do processo de ecolocalização pela heurística construtiva proporcionou um aumento da eficiência do processo de busca pela otimalidade.

A seguir, na Tabela 20, pretende-se realizar uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos por alguns algoritmos existentes na literatura: Particle Swarm Optimization PSO [4], Decomposição de Benders [60] e Branch-and-Bound (B&B) [59].

Tabela 20: Comparação entre as Metodologias para o sistema Sul SR.

ALGORITMOS DE SOLUÇÃO	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (em milhões de dólares)
PSO	154,420
DECOMP. DE BENDERS	154,420
B&B	154,420
PROPOSTO	154,420

VI.4 Sistema IEEE 24 Barras

O sistema IEEE 24 barras [61], apresentado na Figura 25, possui 38 circuitos existentes na topologia base, 41 caminhos candidatos a expansão e uma demanda prevista de 8550 MW.

Este sistema vem sendo bastante empregado para legitimar os resultados de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Os cenários G0, G1 e G3 sem redespacho de geração são os mais utilizados. O cenário G0 apresenta uma geração de 10215 MW, G1 e G3 apresentam uma geração de 8550 MW, para os três cenários as unidades de geração são localizados em diferentes barras, os dados podem ser verificados no Apêndice A.

Esse sistema ilustrado na Figura 24 é amplamente difundido na comunidade científica, sendo ainda utilizado para pesquisa em trabalhos recentes [31]. Por causa da repercussão dos estudos efetuados com esse sistema na área de pesquisa a que se propõe esse trabalho aqui efetuado, o sistema em questão também preza por ser objetivo de estudo desta proposta.

Assim, será validado o desempenho da metodologia proposta, através do histórico de resultados existentes na literatura específica para este sistema.

Para este caso tem-se um número total de 4^{41} combinações possíveis de investimento, demonstrando a dificuldade da obtenção do ponto de mínimo global. Para esse caso, foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância (ϵ) de 1MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de três expansões por caminho candidato; (iii) um número máximo de 100 iterações; (iv) um número de 200 morcegos virtuais constituintes da população artificial; (v) amplitude de volume sonoro de 0,1 e taxa de emissão de pulsos igual a 0,5.

A seguir, estão novamente dispostas as três simulações realizadas para cada um dos dois cenários (G0 e G1) do sistema IEEE 24 barras sem redespacho.

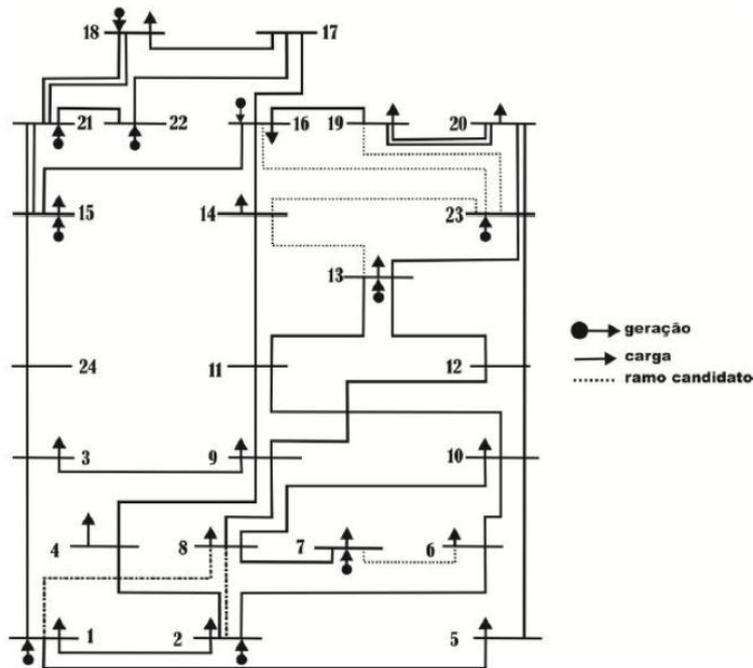


Figura 25: Ilustrativo do Sistema IEEE 24 barras.

VI.4.1 Caso 5: Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G0.

Para esse caso a melhor solução encontrada na bibliografia específica é através do plano de expansão que contempla o custo de US\$152.000.000,00.

A. 1ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

A topologia proposta pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga para o sistema IEEE 24 barras - Cenário G0 é mostrada na Tabela 21.

A solução ótima obtida para esse caso corresponde a um custo de investimento de US\$208.000.000,00, com um tempo de processamento de 4,4 segundos, com 28 iterações.

Tabela 21: Sistema IEEE 24-G0 usando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
10-12	1
07-08	1
14-16	1
06-10	1
03-24	1
01-05	1

B. 2ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

A topologia proposta pela Meta-heurística Ecolocalização de Morcegos para o sistema IEEE 24 barras - Cenário G0 é mostrada na Tabela 22.

A solução ótima para essa simulação corresponde a um custo de investimento de US\$152.000.000,00, obtido com 517,4568 segundos, com 57 iterações. A seguir, na Figura 26, é apresentado o processo de convergência da metodologia.

Tabela 22: Sistema IEEE 24-G0 usando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
10-12	1
07-08	2
14-16	1
06-10	1

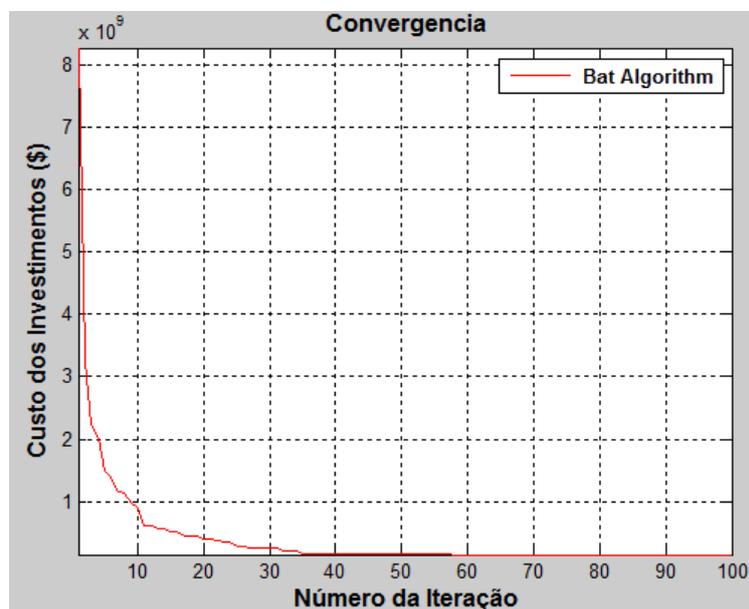


Figura 26: Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G0 com uso da Ecolocalização de Morcegos.

C. 3ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão com uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Essa simulação faz uso da metodologia da Heurística de Mínimo Corte de Carga como um procedimento que fornece uma solução inicial para o Ecolocalização de Morcegos atuar e, assim, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca.

O plano de expansão obtido pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos para o sistema IEEE 24 barras - Cenário G0 é o mesmo apresentado na Tabela 22.

A solução ótima global para essa experiência corresponde a um custo de investimento de US\$152.000.000,00, obtido com 420.8909 segundos na 22ª iteração. A seguir, na figura 27, o gráfico da convergência da simulação.

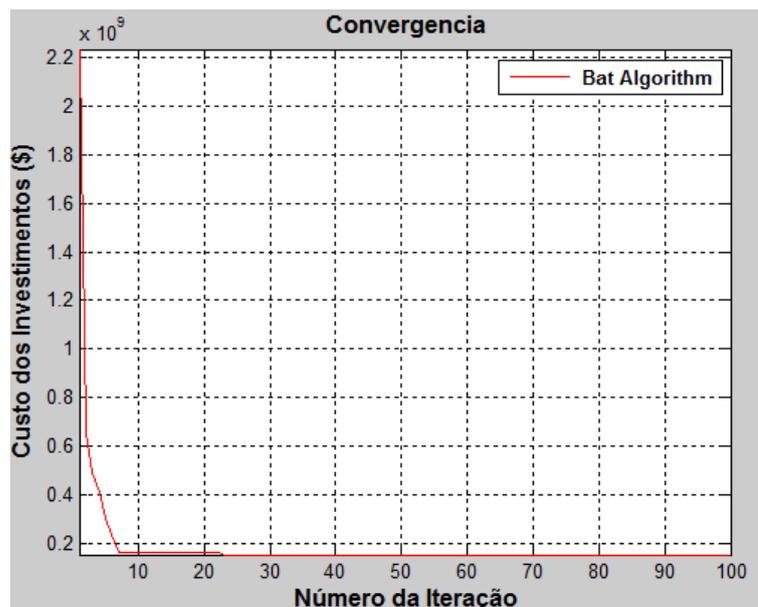


Figura 27: Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G0 com uso da Heurística Construtiva e da Ecolocalização de Morcegos.

D. 4ª Simulação: Otimalidade do Sistema IEEE 24 barras –Cenário G0

Propõe-se identificar a obtenção da otimalidade do sistema IEEE24 barras -G0 pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação. Para tal objetivo, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e do processo de ecolocalização.

Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas, vide Tabela 23.

Diante dos resultados apresentados, Tabela 23, pode-se verificar que a estratégia de inicialização do processo de ecolocalização pela heurística construtiva proporcionou um aumento da eficiência do processo de busca pela otimalidade.

Tabela 23: Otimalidade – IEEE-G0.

METODOLOGIA	OTIMALIDADE(%)
Ecolocalização	20%
Ecolocalização+AHC	56%

A Tabela 24 apresenta uma comparação entre os resultados obtido pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos pelos principais algoritmos existentes na literatura especializada. São estes: Particle Swarm Optimization [4]; Artificial Bee Colony [28]; Harmony Search [61] .

Tabela 24: Comparação entre as Metodologias para o sistema IEEE 24 Barras - G0.

ALGORITMOS DE SOLUÇÃO	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (em milhões de dólares)
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	152
ARTIFICIAL BEE COLONY	152
HARMONY SEARCH	152
PROPOSTO	150

VI.4.2 Caso 6: Sistema IEEE 24 Barras - Cenário G1

Para esse caso a melhor solução encontrada na bibliografia específica[67] é através do plano de expansão que contempla o custo de US\$370.000.000,00.

A. 1ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga.

A topologia proposta pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga para o sistema IEEE 24 barras - Cenário G1 é mostrada na Tabela 25.

A solução ótima obtida para esse caso corresponde a um custo de investimento de US\$438.000.000,00, com um tempo de processamento de 4,17 segundos, com 12 iterações.

Tabela 25: Sistema IEEE 24-G1 usando a Heurística de Mínimo Corte de Carga.

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
07-08	3
06-10	2
02-06	1
08-10	1
09-11	1
09-12	1
02-08	1
13-14	1
10-12	1
17-18	1

B. 2ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão e uso da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

A topologia proposta pela Meta-heurística Ecolocalização de Morcegos para o plano de expansão do sistema IEEE 24 barras - Cenário G1 é mostrada na Tabela 26.

A solução ótima obtida para este caso corresponde a um custo de investimento de US\$423.000.000,00, obtido com 554,52 segundos, com 72 iterações. A seguir, na Figura 28, é apresentado o processo de convergência da metodologia.

Tabela 26: Sistema IEEE 24-G1 usando a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

CAMINHOS SELECIONADOS	NÚMERO DE CIRCUITOS CONSTRUÍDOS
10-12	1
07-08	1
14-16	1
06-10	2
01-05	1
04-09	1
05-10	1
08-10	1
11-13	1
15-16	1
20-23	4

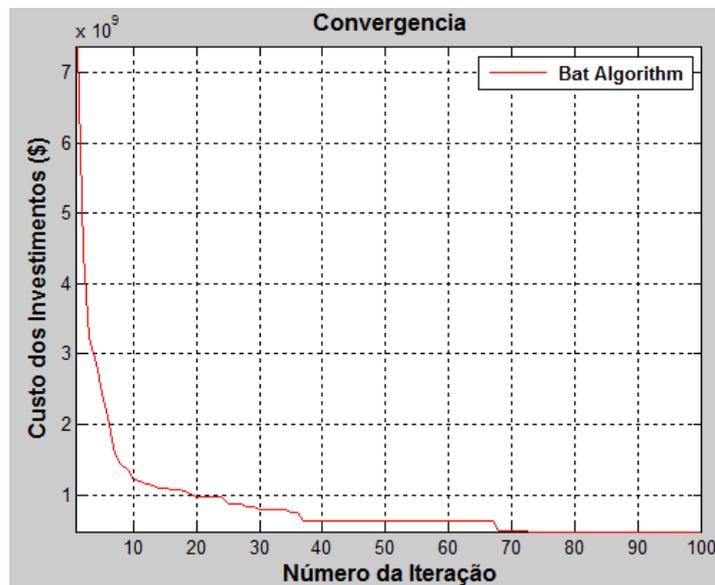


Figura 28: Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G1 com uso da Ecolocalização de Morcegos.

C. 3ª Simulação: Consideração de todas as Rotas Candidatas à Expansão com uso da Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e da Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos.

Essa simulação faz uso da metodologia da Heurística de Mínimo Corte de Carga como um procedimento que fornece uma solução inicial para o Ecolocalização de Morcegos atuar e, conseqüentemente, proporcionar maior rapidez e eficiência ao processo de busca.

O plano de expansão obtido pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e a Meta-heurística de Ecolocalização de Morcegos para o sistema IEEE 24 barras - Cenário G1 é o apresentado na Tabela 27 a seguir.

Para o plano de expansão obtido nesta simulação, agrega-se um custo de investimento de US\$390.000.000,00, obtido com 476,5469 segundos na 20ª iteração. A Figura 29 apresenta o gráfico da convergência da simulação.

Tabela 27: Sistema IEEE 24-G1 usando a Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga e Ecolocalização de Morcegos.

CAMINHOS SELECIONADOS	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	2

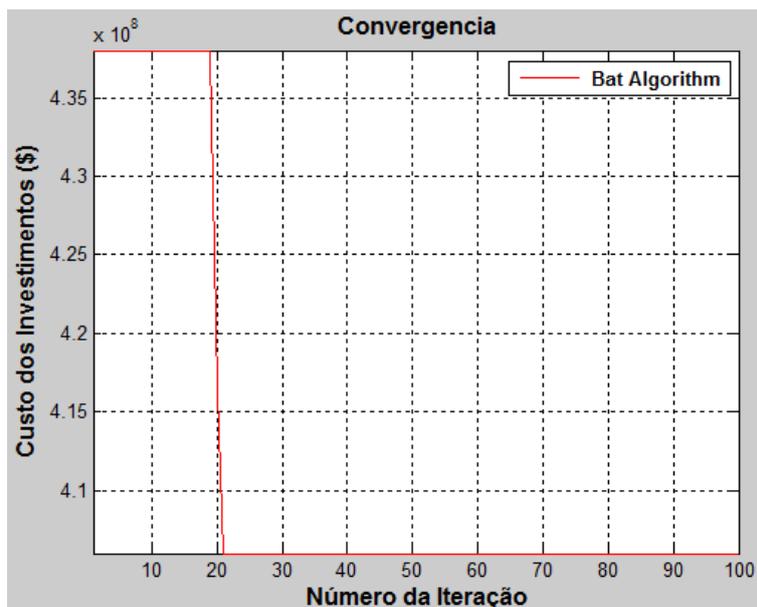


Figura 29: Gráfico de convergência do IEEE 24 barras - Cenário G1 com uso da Heurística de Mínimo Corte de Carga e da Ecolocalização de Morcegos.

D. 4ª Simulação: Otimalidade do Sistema IEEE 24 barras –Cenário G1

Visa-se identificar a obtenção da otimalidade do sistema IEEE24-G1 pelas técnicas de otimização empregadas nesta dissertação. Para tanto, foram realizadas cinquenta simulações nas seguintes condições: (i) utilização apenas do processo de ecolocalização; (ii) utilização da heurística construtiva e do processo de ecolocalização.

Assim, fez-se o cálculo do percentual de vezes em que a solução ótima global foi alcançada para cada uma das condições acima mencionadas, vide Tabela 28 abaixo.

Tabela 28: Otimalidade – IEEE-G1.

METODOLOGIA	OTIMALIDADE(%)
Ecolocalização	0%
Ecolocalização+AHC	0%

Diante dos resultados apresentados, Tabela 28, observa-se que nenhuma das duas metodologias conseguiu encontrar o ótimo global exposto na literatura especializada, que é o custo de investimento de US\$370.000.000,00, então as duas metodologias possuem a porcentagem nula.

Além disso, pode-se verificar para esse caso particular, que a estratégia de inicialização do processo de ecolocalização pela heurística construtiva ainda proporcionou um aumento da eficiência do processo de busca pela otimalidade, já que o custo de expansão encontrado somente pela ecolocalização de morcegos permanece maior que o encontrado pela ecolocalização de morcegos junto a heurística construtiva de mínimo corte de carga.

Embora a metodologia proposta não tenha chegado ao ótimo global apresentado pela literatura especializada, pode-se se afirmar que o resultado obtido está bem próximo do mesmo, apresentando uma diferença percentual de apenas 5,4%.

A Tabela 29 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pela metodologia proposta e os custos de investimento na transmissão obtidos pelos principais algoritmos existentes na literatura especializada. São estes: Particle Swarm Optimization [4]; Artificial Bee Colony [28]; Harmony Search [61], Heurística Construtiva[62] .

Tabela 29: Comparação entre as Metodologias para o sistema IEEE 24 Barras - G1.

ALGORITMOS DE SOLUÇÃO	CUSTO TOTAL DE INVESTIMENTO (em milhões de dólares)
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	390
ARTIFICIAL BEE COLONY	390
HARMONY SEARCH	370
HEURÍSTICA CONSTRUTIVA	438
PROPOSTO	390

VI.5 Aspectos Computacionais

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

VI.6 Conclusões Parciais

Este capítulo ilustrou os resultados obtidos pela metodologia proposta através de um sistema acadêmico de Garver, do sistema real equivalente à região Sul do Brasil e o sistema IEEE 24 barras.

Para cada um destes, com exceção do sistema IEEE 24 barras, foram consideradas duas situações: (i) com redespacho de geração, isto é, permitindo que as unidades geradoras modifiquem seus pontos de operação; (ii) sem redespacho de geração, ou seja, com ponto de operação predeterminado. O IEEE 24 barras considera somente a situação sem redespacho de geração.

Através dos resultados obtidos, pôde-se verificar o bom desempenho da metodologia em destaque em relação aos melhores valores de custos de expansão existentes na literatura, à proporção que a metodologia empregada consegue atingir esse valores na maioria dos casos.

Conseguiu-se objetivar que o uso de uma solução inicial factível e de qualidade, que no caso é fornecida pela Heurística Construtiva de Mínimo Corte de Carga, ajuda efetivamente na melhora do desempenho do algoritmo de Ecolocalização de Morcegos, fazendo com que esse consiga encontrar o mínimo custo global exposto na literatura específica com maior frequência do que quando a meta-heurística atua sozinha.

Também, conseguiu-se demonstrar que o uso da solução inicial fornecida pela Heurística e passada ao Ecolocalização de Morcegos, confere a esse sistema maior eficiência, à medida que é possível alcançar o ótimo contemplado pela literatura específica com um número menor de iterações. Diante desta ótica, um resumo dos resultados obtidos são apresentados através das Tabelas 30, 31, 32 e 33.

Tabela 30: Resultados Sistema Garver.

RESULTADOS GARVER			
SISTEMAS	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÕES	OTIMALIDADE (%)
GARVER-CR-BAT	110	91	40
GARVER-CR-AHC+BAT	110	10	58
GARVER-SR-BAT	200	88	26
GARVER-SR-AHC+BAT	200	32	40

Tabela 31: Resultados Sistema Sul.

RESULTADOS SUL			
SISTEMAS	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÕES	OTIMALIDADE (%)
SUL-CR-BAT	70,289	97	24
SUL-CR-AHC+BAT	70,289	73	42
SUL-SR-BAT	154,420	96	20
SUL-SR-AHC+BAT	154,420	62	40

Tabela 32: Resultados Sistema IEEE24-G0.

RESULTADOS IEEE-24-G0			
SISTEMAS	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÕES	OTIMALIDADE (%)
IEEE24-G0-BAT	152	57	20
IEEE24-G0-AHC+BAT	152	22	56

Tabela 33: Resultados Sistema IEEE24-G1.

RESULTADOS IEEE-24-G1			
SISTEMAS	CUSTO (milhões de dólares)	ITERAÇÕES	OTIMALIDADE (%)
IEEE24-G1-BAT	423	72	0
IEEE24-G1-AHC+BAT	390	20	0

Capítulo VII

Conclusões

VII.1 Considerações Gerais

Nesta dissertação foi proposta a utilização de um algoritmo Heurístico Construtivo de Mínimo Corte de Carga em conjunto com o Ecolocalização de Morcegos para a resolução do problema referente ao planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os resultados alcançados através das simulações realizadas, apontam para uma satisfatória eficiência da metodologia proposta para o problema acima supracitado.

A metodologia proposta conciliou, para os casos estudados, um esforço computacional aceitável aliado à eficiência no processo para a obtenção do ótimo global abordado na literatura especialista.

Este capítulo tem por objetivo sintetizar as principais conclusões sobre os resultados obtidos nesta dissertação, bem como apresentar algumas sugestões para pesquisas e investigações de trabalhos futuros.

VII.2 Conclusões

O estudo e o planejamento da expansão estática de sistemas de transmissão de energia elétrica é, atualmente, uma das opções ao atendimento da demanda crescente ao longo do tempo, principalmente no Brasil, devido ao seu grande potencial hidráulico. O país usa como principal forma de geração de energia elétrica as usinas hidroelétricas, e essas se situam longe dos grandes centros consumidores sendo, portanto, necessário um sistema de transmissão robusto e bem planejado, para não se tanger a custos exorbitantes.

Com o desenvolvimento econômico do país, é comum que a demanda aumente, tornando necessária a criação de novas linhas de transmissão para que se atenda satisfatoriamente essa demanda. Portanto é necessário que exista um planejamento da expansão do sistema de forma a minimizar os custos associados a esse procedimento,

bem como também deseja-se minimizar o déficit de energia, a fim de atender a carga em um horizonte de planejamento.

A questão é que, assim como constatado nos estudos de casos apresentados anteriormente, dependendo da configuração utilizada para expansão das linhas de transmissão, o custo para atendimento da demanda varia bruscamente, logo, é necessário que haja um estudo de otimização visando o planejamento de expansão. Quanto à análise das metodologias e dos resultados pode-se destacar que:

- Em relação ao algoritmo bioinspirado analisado destaca-se o fato do mesmo possuir um número pequeno de parâmetros iniciais, tornando-o mais simples e sem a necessidade de muitos ajustes;

- A utilização da heurística construtiva com o objetivo de iniciar o processo de busca bioinspirado proporcionou a obtenção da solução ótima global em um número menor de iterações e em um número maior de simulações. Este comportamento foi observado, de maneira geral, em todas as simulações realizadas.

- A metodologia proposta mostra-se competitiva em relação às principais técnicas de otimização utilizadas para a resolução do problema em questão, apresentando soluções de qualidade;

VII.3 Desenvolvimentos Futuros

Ainda existem algumas questões importantes que requerem mais investigação, sendo possibilidades de desenvolvimentos futuros, que serão descritos a seguir:

- Os parâmetros de ajuste são importantes para que qualquer meta-heurística funcione corretamente, neste estudo temos: (A_i e r_i). Uma questão importante é o controle deste parâmetro. Em muitos algoritmos, os ajustes dos parâmetros são fixos e estes ajustes não variarão durante as iterações. Pode ser vantajoso e, por vezes, necessário variar os valores dos parâmetros durante o processo de pesquisa iterativa. Como variar ou controlar estes parâmetros é outro problema de otimização, que é passível de mais estudos.

- Pesquisar artifícios que possam acelerar o processo de convergência do método a fim de melhorá-lo, pois objetiva-se aplicar o mesmo para todos os tipos de sistemas, inclusive os mais robustos. Logo, a obtenção da convergência mais rápida possível torna o algoritmo mais atrativo e eficiente para realização de um bom planejamento da expansão dos sistemas de transmissão.

- Implementação das perdas ativas envolvidas no processo de transmissão de energia elétrica.

- Estudar e implementar novas heurísticas construtivas a fim de comparar os resultados dentre essas e verificar qual delas gera uma solução inicial mais eficiente para o algoritmo de Ecolocalização de Morcegos, bem como também é pretendido estudar mais as meta-heurísticas bioinspiradas e testar as suas performances para o planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão.

- Realizar o estudo do Planejamento Dinâmico da Expansão da Transmissão de Energia, de modo a tornar mais completo este trabalho.

- Utilizar a Heurística Construtiva para que em vez de gerar uma solução inicial para o procedimento bioinspirado, aquela gere um plano de expansão a partir do qual serão extraídas as suas rotas, servindo como redução do espaço de busca para a meta-heurística atuar. Trabalhos como [4] conseguiram resultados promissores utilizando essa abordagem.

- Testar a estratégia proposta em sistemas de maior porte, tais como o Sudeste Equivalente Brasileiro e o Colombiano.

Apêndice A

Dados dos Sistemas de Transmissão

A.1 Considerações Iniciais

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

A.2 Sistema de Garver

Níveis de Geração e Carga			
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	150	50	80
2	0.0	0.0	240
3	360	165	40
4	0.0	0.0	160
5	0.0	0.0	240
6	600	545	0.0

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

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

A.3 Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil

Níveis de Geração e Carga			
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
1	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	443.1
3	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	300.7
5	0.0	0.0	238
6	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	72.2
9	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	511.9
13	0.0	0.0	185.8
14	1257	944	0.0
15	0.0	0.0	0.0
16	2000	1366	0.0
17	1050	1000	0.0
18	0.0	0.0	0.0
19	1670	773	0.0
20	0.0	0.0	1091
21	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	81.9

Apêndice A

Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga (MW)
23	0.0	0.0	458.1
24	0.0	0.0	478.2
25	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	231.9
27	220	54	0.0
28	800	730	0.0
29	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0
31	700	310	0.0
32	500	450	0.0
33	0.0	0.0	229.1
34	748	221	0.0
35	0.0	0.0	216.0
36	0.0	0.0	90.1
37	300	212	0.0
38	0.0	0.0	216
39	600	221	0.0
40	0.0	0.0	262.1
41	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.0	1607
43	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	79.1
45	0.0	0.0	86.7
46	700	599	0.0

Circuitos existentes na topologia base

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-7	1	6.16	270
1-2	2	10.65	270
4-9	1	9.24	270
5-9	1	11.73	270
5-8	1	11.32	270
7-8	1	10.23	270
4-5	2	5.66	270
2-5	2	3.24	270
8-13	1	13.48	240
9-14	2	17.56	220
12-14	2	7.40	270
14-18	2	15.14	240
13-18	1	18.05	220
13-20	1	17.03	270
18-20	1	19.97	200
19-21	1	2.78	1500
16-17	1	0.78	2000
17-19	1	0.61	2000

Apêndice A

Circuitos existentes na topologia base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
14-26	1	16.14	220
14-22	1	8.40	270
22-26	1	7.90	270
20-23	2	9.32	270
23-24	2	7.74	270
26-27	2	8.32	270
24-34	1	16.47	220
24-33	1	14.48	240
33-34	1	12.65	270
27-36	1	9.15	270
27-38	2	20.8	200
36-37	1	10.57	270
34-35	2	4.91	270
35-38	1	19.80	200
37-39	1	2.83	270
37-40	1	12.81	270
37-42	1	21.05	200
39-42	3	20.30	200
40-42	1	9.32	270
38-42	3	9.07	270
32-43	1	3.09	1400
42-44	1	12.06	270
44-45	1	18.64	200
19-32	1	1.95	1800
46-19	1	2.22	1800
46-16	1	2.03	1800
18-19	1	1.25	600
20-21	1	1.25	600
42-43	1	1.25	600

Circuitos candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
1-7	6.16	270	4.35
1-2	10.65	270	7.08
4-9	9.24	270	6.22
5-9	11.73	270	7.74
5-8	11.32	270	7.50
7-8	10.23	270	6.83
4-5	5.66	270	4.05
2-5	3.24	270	2.58
8-13	13.48	240	8.80
9-14	17.56	220	11.27
12-14	7.40	270	5.11

Apêndice A

Circuitos candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
14-18	15.14	240	9.80
13-18	18.05	220	11.57
13-20	17.03	270	7.17
18-20	19.97	200	12.74
19-21	2.78	1500	32.64
16-17	0.78	2000	10.51
17-19	0.61	2000	8.72
14-26	16.14	220	10.41
14-22	8.40	270	5.72
22-26	7.90	270	5.41
20-23	9.32	270	6.27
23-24	7.74	270	5.31
26-27	8.32	270	5.66
24-34	16.47	220	10.61
24-33	14.48	240	9.34
33-34	12.65	270	8.28
27-36	9.15	270	6.17
27-38	20.8	200	13.24
36-37	10.57	270	7.02
34-35	4.91	270	3.59
35-38	19.80	200	12.63
37-39	2.83	270	2.33
37-40	12.81	270	8.38
37-42	21.05	200	13.38
39-42	20.30	200	12.93
40-42	9.32	270	6.26
38-42	9.07	270	6.11
32-43	3.09	1400	35.917
42-44	12.06	270	7.93
44-45	18.64	200	11.94
19-32	1.95	1800	23.42
46-19	2.22	1800	26.36
46-16	2.03	1800	24.31
18-19	1.25	600	8.17
20-21	1.25	600	8.17
42-43	1.25	600	8.17
02-04	8.82	270	5.97
14-15	3.74	270	2.89
46-10	0.81	2000	10.89
04-11	22.46	240	14.25
05-11	9.15	270	6.17
46-06	1.28	2000	16.00
46-03	2.03	1800	24.32
16-28	2.22	1800	26.36
16-32	3.11	1400	36.21

Apêndice A

Circuitos candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
17-32	2.32	1700	27.51
19-25	3.25	1400	37.75
21-25	1.74	2000	21.12
25-32	3.19	1400	37.11
31-32	0.46	2000	7.14
28-31	0.53	2000	7.82
28-30	0.58	2000	8.33
27-29	9.98	270	6.67
26-29	5.41	270	3.89
28-41	3.39	1300	39.29
28-43	4.06	1200	47.70
31-41	2.78	1500	32.63
32-41	3.09	1400	35.95
41-43	1.39	2000	17.29
40-45	22.05	180	13.99
15-16	1.25	600	8.17
46-11	1.25	600	8.17
24-25	1.25	600	8.17
29-30	1.25	600	8.17
40-41	1.25	600	8.17
02-03	1.25	600	8.17
05-06	1.25	600	8.17
09-10	1.25	600	8.17

A.4 Sistema IEEE 24 barras

Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Níveis de Geração e Carga			Carga (MW)
		Geração G0 (MW)	Geração G1 (MW)	Geração G3 (MW)	
1	576	576	576	576	324
2	576	576	576	576	291
3	0.0	0.0	0.0	0.0	540
4	0.0	0.0	0.0	0.0	222
5	0.0	0.0	0.0	0.0	213
6	0.0	0.0	0.0	0.0	408
7	900	900	900	900	375
8	0.0	0.0	0.0	0.0	513
9	0.0	0.0	0.0	0.0	525
10	0.0	0.0	0.0	0.0	585
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	1773	1773	1773	1457	795
14	0.0	0.0	0.0	0.0	582
15	645	645	645	645	951
16	465	465	465	282	300
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	1200	1200	1200	603	999
19	0.0	0.0	0.0	0.0	543
20	0.0	0.0	0.0	0.0	384
21	1200	1200	1200	951	0.0
22	900	900	900	900	0.0
23	1980	1980	315	1980	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Apêndice A

Circuitos existentes na topologia base			
Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
01-02	1	1.39	175
01-03	1	21.12	175
01-05	1	8.45	175
02-04	1	12.67	175
02-06	1	19.20	175
03-09	1	11.90	175
03-24	2	8.39	400
04-09	2	10.37	175
05-10	1	8.83	175
06-10	2	6.05	175
07-08	2	6.14	175
08-09	2	16.51	175
08-10	1	16.51	175
09-11	1	8.39	400
09-12	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

Apêndice A

Circuitos candidatos			
Caminhos	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (milhões de dólares)
01-08	13.44	500	35
02-08	12.67	500	33
06-07	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
01-02	1.39	175	3
01-03	21.12	175	55
01-05	8.45	175	22
02-04	12.67	175	33
02-06	19.20	175	50
03-09	11.90	175	31
03-24	8.39	400	50
04-09	10.37	175	27
05-10	8.83	175	23
06-10	6.05	175	16
07-08	6.14	175	16
08-09	16.51	175	43
08-10	16.51	175	43
09-11	8.39	400	50
09-12	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

Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.epe.gov.br/PDEE/Sumario%20PDE%202021.pdf>. Hora de acesso 13:38. Dia de acesso 03/05/2015. Capítulo de Eletricidade/Electricity, parágrafo 1. Página 11.
- [2] DEWANI, B.; DAIGAVANE, M.B.; ZADGAONKAR, A.S. “*A review of various computational intelligence techniques for transmission network expansion planning*”. *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference*.
- [3] TEIVE, R.C.G.; LABPIAN/UFSC, BRAZIL; HAWKEN, A.; LAUGHTON, M.A. “*Knowledge-based system for electrical power networks transmission expansion planning*”. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*.
- [4] MIRANDA DE MENDONÇA, I.; Dissertação de mestrado, “*Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica utilizando Otimização por Enxame de Partículas*”, 2012
- [5] ZEINADDINI MAYMAND, M.; SHAHID BAHONAR; IRAN RASHIDINEAJAD, M.; MOHAMMADIAN, M.; MAHMOUDABADI A.; KHORASANI, H.;RAHMANI, M. “*An application of a modified constructive heuristic algorithm to transmission expansion planning*”. *Power Tech, 2011 IEEE Trondheim*.
- [6] RIDER, M.J.; GARCIA, A.V. “*A constructive heuristic algorithm to short term transmission network expansion planning*”. *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*.
- [7] GALLEGO, L.A.; RIDER, M.J.; ROMERO, R.; GARCIA, A.V. “*A specialized genetic algorithm to solve the short term transmission network expansion planning*.” *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*.

- [8] SOUSA, A.S.; ASADA, E.N. “*Fuzzy Guided Constructive Heuristic Applied to Transmission System Expansion Planning*”. *Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference*.
- [9] DEL VALLE, Y.; DIGMAN, M.; GRAY, A. ; PERKEL, J.; HARLEY, R.G. “*Enhanced particle swarm optimizer for power system applications*”. *Swarm Intelligence Symposium, 2008. SIS 2008. IEEE*
- [10] HUAYONG XIE ; MINGQING XIAO ; BIN HU ; HANG YU. “*An amelioration Particle Swarm Optimization algorithm*”. *Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference*.
- [11] LUONG, T.T.H.; PHAM, Q.T. “*A comparison of the performance of classical methods and genetic algorithms for optimization problems involving numerical models*”. *Evolutionary Computation, 2003. CEC '03. The 2003 Congress*.
- [12] CHUN-WEI TSAI; SHIH-PANG TSENG ; MING-CHAO CHIANG ; CHU-SING YANG. “*A Time-Efficient Method for Metaheuristics: Using Tabu Search and Tabu GA as a Case*”.
- [13] ABBAS, A.J.; MINHAT, M.; BIN ABDUL RAHMAN, M.N.; AKBAR, H. “*Future prospects of turning processes optimization using metaheuristics methods*”. *Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering (URKE), 2012 2nd International Conference*.
- [14] SIARRY, P. “*Some contributions to the adaptation of discrete metaheuristics for continuous optimization*”. *Communications, Computing and Control Applications (CCCA), 2012 2nd International Conference*.
- [15] R. ROMERO, M. J. RIDER, I. DE J. SILVA, “*A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, p. 2289-2291, nov. 2007.

- [16] L. L. GARVER, “*Transmission Network Estimation Using Linear Programming*”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 7, p. 1688-1697, set. 1970.
- [17] A. MONTICELLI, A. SANTOS, M. V. PEREIRA, S. H. CUNHA, B. J. PARKER, J. C. PRACA, “*Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion*”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 10, p. 3919-3925, out. 1982.
- [18] R. VILLASANA, L. L. GARVER, S. J. SALON, “*Transmission Network Planning Using Linear Programming*”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 2, p. 349-356, fev. 1985.
- [19] M. V. PEREIRA E L. M. V. PINTO, “*Application of Sensitivity Analysis of Local Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning*”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 2, p. 381-389, fev. 1985.
- [20] R. ROMERO, R. A. GALLEGO, A. MONTICELLI, “*Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing*”, *IEEE Power Industry Computer Application Conference, Conference Proceedings*, 1995, p. 278-283.
- [21] R. A. GALLEGO, A. B. ALVES, A. MONTICELLI, R. ROMERO, “*Parallel Simulated Annealing Applied To Long Term Transmission Network Expansion Planning*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, p. 181-188, fev. 1997.
- [22] M. CORTES-CARMONA, R. PALMA-BEHNKE, O. MOYA, “*Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm*”, in *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP '09*, 2009, p. 1-7.
- [23] A. M. LEITE DA SILVA, L. S. REZENDE, L. M. HONÓRIO, AND L. A. F. MANSO, “*Performance comparison of metaheuristics to solve the multi-stage transmission*

expansion planning problem,” IET Generation, Transmission Distribution, vol. 5, no. 3, pp. 360–367, Mar. 2011.

[24] B. DEWANI, M. B. DAIGAVANE, AND A. S. ZADGAONKAR, “A review of various computational intelligence techniques for transmission network expansion planning,” *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, 2012, pp. 1–5.

[25] S. P. TORRES AND C. A. CASTRO, “*Parallel particle swarm optimization applied to the static Transmission Expansion Planning problem,*” in *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition Sixth IEEE/PES*, 2012, pp. 1–6.

[26] A. M. LEITE DA SILVA, L. A. F. MANSO, W. S. SALES, S. A. FLAVIO, G. J. ANDERS, AND L. C. DE RESENDE, “*Chronological Power Flow for Planning Transmission Systems Considering Intermittent Sources,*” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2314–2322, Nov. 2012.

[27] C. RATHORE, R. ROY, S. RAJ, AND A. K. SINHA, “*Mosquitoes-behaviour based (MOX) evolutionary algorithm in static transmission network expansion planning,*” *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, 2013, pp. 1006–1011.

[28] C. RATHORE, R. ROY, U. SHARMA, AND J. PATEL, “*Artificial Bee Colony Algorithm based static transmission expansion planning,*” *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, 2013, pp. 1126–1131.

[29] G. A. ORFANOS, P. S. GEORGILAKIS, AND N. D. HATZIARGYRIOU, “*A recursive harmony search algorithm for security constrained transmission expansion planning,*” in *PowerTech IEEE Grenoble*, 2013, pp. 1–6.

[30] S. ARORA AND S. SINGH, “*A conceptual comparison of firefly algorithm, bat algorithm and cuckoo search,*” *International Conference on Control Computing Communication Materials*, 2013, pp. 1–4.

- [31] A. S. RESENDE, “*Particle swarm optimization aplicada ao Planejamento da expansão de sistemas de Transmissão,*” Tese, UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- [32] C. RATHORE AND R. ROY, “*A novel modified GBMO algorithm based static transmission network expansion planning,*” *Electr Power Energy Syst* 2014, Jun. 2014.
- [33] J. AGHAEI, N. AMJADY, A. BAHARVANDI, AND M.-A. AKBARI, “*Generation and Transmission Expansion Planning: MILP #x2013; Based Probabilistic Model,*” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1592–1601, Jul. 2014.
- [34] B. ALIZADEH AND S. JADID, “*A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems,*” vol. 65, pp. 408–418, 2015.
- [35] S.P. TORRES AND C. A. CASTRO, “*Specialized differential evolution technique to solve the alternating current model based transmission expansion planning problem,*” *Electr Power Energy Syst* 2013, vol. 68, pp. 243–251, Jan. 2015.
- [36] MONTICELLI A., *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. 2.ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 1993.
- [37] B. J. PARKER, A. WATANABE, M. T. SCHILING, “*Precisão do Modelo Linearizado de Fluxo de Potência para Simulação do Sistema Brasileiro,*” NT DEST, p. 18/80.
- [38] I. C. SILVA JUNIOR, “*Planejamento Estático Da Expansão De Sistemas De Transmissão Utilizando Um Novo Algoritmo Heurístico Construtivo,*” Dissertação de Mestrado, UFJF, 2003.
- [39] GOLDBARG M.C., LUNA H.P. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. 5.ed. Rio de Janeiro. Editora Campus, 2000.
- [40] RIGHETTO, EDISON; “*Desenvolvimento de técnicas eficientes de programação linear na utilização de metaheurísticas para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão,*” Tese, Ilha Solteira-UNESP, 2010.

- [41] MICHALEWICZ, Z.: “*Genetic algorithms + data structures evolution programs, Artificial Intelligence*”, Springer, Berlin, 1996.
- [42] XIN-SHE YANG, “*Nature_Inspired Metaheuristic Algorithms*”, *Second Edition, University of Cambridge, United Kingdom*, 2011.
- [43] B. J. PARKER, A. WATANABE, M. T. SCHILING, “Precisão do Modelo Linearizado de Fluxo de Potência para Simulação do Sistema Brasileiro”, NT DEST, p. 18/80.
- [44] G. A. ORFANOS, P. S. GEORGILAKIS, AND N. D. HATZIARGYRIOU, “*A recursive harmony search algorithm for security constrained transmission expansion planning,*” in *PowerTech IEEE Grenoble*, 2013, pp. 1–6.
- [45] XIN-SHE YANG, *Bat algorithm: literature review and applications, Int. J. Bio-Inspired Computation*, Vol. 5, No. 3, pp. 141–149 (2013).
- [46] KHAN, K., NIKOV, A., SAHAI A., (2011). "A fuzzy bat clustering method for ergonomic screening of office workplaces", *S3T 2011, Advances in Intelligent and Soft Computing*, 2011, Volume 101/2011, pp. 59–66.
- [47] YANG, X. S., (2011). "Bat algorithm for multi-objective optimisation, *Int. J. Bio-Inspired Computation*", Vol. 3, No. 5, pp. 267–274.
- [48] KOMARASAMY, G., AND WAHI, A., (2012). "An optimized K-means clustering technique using bat algorithm, *European J. Scientific Research*", Vol. 84, No. 2, pp. 263-273.
- [49] LIN, J. H., CHOU, C. W., YANG, C. H., TSAI, H. L., (2012). "A chaotic Levy flight bat algorithm for parameter estimation in nonlinear dynamic biological systems, *J. Computer and Information Technology*", Vol. 2, No. 2, pp. 56–63.

- [50] NAKAMURA, R. Y. M., PEREIRA, L. A. M., COSTA, K. A., RODRIGUES, D., PAPA, J. P., YANG, X. S., (2012). BBA: "A binary bat algorithm for feature selection, in: 25th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images" (SIBGRAPI), 22-25 Aug. 2012, IEEE Publication, pp. 291-297.
- [51] XIE, J., ZHOU, Y. Q., CHEN, H., "A novel bat algorithm based on differential operator and Lévy flights trajectory, *Computational Intelligence and Neuroscience*", Vol. 2013, Article ID: 453812 DOI: www.hindawi.com/journals/cin/aip/453812.pdf.
- [52] JAMIL, M., ZEPERNIC, H.-J., AND YANG, X. S., (2013). "Improved bat algorithm for global optimization, *Applied Soft Computing*", (2013).
- [53] WANG, G. G., GUO, L. H., DUAN, H., LIU, L., WANG, H. Q., (2012). A bat algorithm with mutation for UCAV path planning, *Scientific World Journal*, Vol. 2012.
- [54] WANG, GAIGE, AND GUO, LIHONG, (2013). "A novel hybrid bat algorithm with harmony search for global numerical optimization", *Journal of Applied Mathematics*, (in press).
- [55] FISTER JR., I., YANG, X. S., AND BREST, J., (2013). "On the representation of individual s using quaternions in swarm intelligence and evolutionary computation", *IEEE Trans. Evol. Computation*.
- [56] S. BINATO, G. C. DE OLIVEIRA, J. L. DE ARAUJO, "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, p. 247-253, maio 2001.
- [57] M. CORTES-CARMONA, R. PALMA-BEHNKE, O. MOYA, "Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm", in *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP '09*, 2009, p. 1-7.

- [58] H. MORI, K. SHIMOMUGI, “*Transmission Network Expansion Planning With Scatter Search*”, in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, ISIC*, 2007, p. 3749-3754.
- [59] M. J. RIDER, A. V. GARCIA, R. ROMERO, “*Transmission System Expansion Planning by a Branch-and-Bound Algorithm*”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, no. 1, p. 90-99, jan. 2008.
- [60] S. BINATO, M. V. PEREIRA, S. GRANVILLE, “*A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 2, p. 235-240, maio 2001.
- [61] G. A. ORFANOS, A. G. ANASTOPOULOU, P. S. GEORGILAKIS, AND N. D. HATZIARGYRIOU, “*Static transmission expansion planning under an improved harmony search algorithm,*” in *8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2012, pp. 1–6.
- [62] R. ROMERO, C. ROCHA, J. R. S. MANTOVANI, AND I. G. SANCHEZ, “*Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning*” *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 152, no. 2, pp. 277–282, Mar. 2005.