UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

METODOLOGIAS DE SUPORTE AO PLANEJAMENTO DE REFORÇOS EM SISTEMAS DE SUBTRANSMISSÃO

Fernando Aparecido de Assis

Orientador: Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso

Coorientador: Prof. Leonidas Chaves de Resende

Dissertação submetida ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Fevereiro de 2014

São João del-Rei – MG – BRASIL

Fernando Aparecido de Assis

METODOLOGIAS DE SUPORTE AO PLANEJAMENTO DE REFORÇOS EM SISTEMAS DE SUBTRANSMISSÃO

Banca Examinadora
Orientador: Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso
Coorientador: Prof. Leonidas Chaves de Resende
Prof. Edimar José de Oliveira
Prof ^a . Valceres Vieira Rocha e Silva

Dedico este trabalho aos meus pais Joaquim Aristeu e Aparecida Enita, e ao meu irmão Antônio Erivaldo.

AGRADECIMENTOS

Sabendo que na vida não conseguimos nada sozinhos, após o término deste trabalho tenho muito que agradecer, na esperança de que estas palavras não fiquem apenas presas a estas páginas, mas que possam expressar profundamente meu sentimento de gratidão a todos que contribuíram para esta conquista.

Primeiramente, agradeço a Deus, arquiteto maior. A Ele, sou grato pelo dom da vida, por todas as oportunidades a mim oferecidas e pela minha família e amigos.

Aos meus queridos pais, Joaquim Aristeu e Aparecida Enita, faltam palavras de agradecimento. Seria impossível descrever aqui, com um texto menor do que toda esta dissertação, a força, o apoio e o carinho com que sempre me cercaram. Sem dúvidas, eles me ofereceram o suporte que foi essencial na concretização deste sonho realizado.

Agradeço imensamente ao meu irmão Antônio Erivaldo, que sempre acreditou em meu potencial e me deu um grande apoio no decorrer de minha formação. Sei que grande parte desta conquista também pertence a ele.

À Fernanda Santos, minha namorada, agradeço por toda a paciência nos momentos de ausência, pelas conversas de ânimo quando tudo parecia muito difícil e pelo carinho dedicado a mim durante a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do PPGEL, que foram de fundamental importância em minha formação, em especial aos meus orientadores deste trabalho, Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso e Prof. Leonidas Chaves de Resende. A eles agradeço pelos ensinamentos, pela paciência, pelo apoio, pelos conselhos e por uma coisa que considero das mais importantes, a amizade.

Agradeço ainda, aos grandes amigos que fiz no decorrer do curso: o pessoal da limpeza que todos os dias nos recebem com grande alegria quando chegamos ao laboratório, aos vigilantes sempre prestativos e às secretárias do PPGEL e do DEPEL por serem sempre pacientes e atenciosas.

Aos meus amigos do curso de mestrado, que enfrentaram comigo diversas dificuldades e compartilharam agradáveis momentos, agradeço pela convivência, apoio e contribuição para esta importante etapa de minha vida.

Enfim, agradeço à UFSJ/CEFET pela oportunidade, à Cemig Distribuição S.A. pelos recursos disponibilizados que foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho e à CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

O aumento do consumo de energia elétrica ao longo dos anos induz o desenvolvimento de novas tecnologias e, também, a necessidade da construção de novas linhas para os sistemas de transmissão e distribuição. Tradicionalmente, o planejamento da expansão destes sistemas consiste em determinar, dentre um conjunto de reforços candidatos, aqueles que deverão ser incorporados ao sistema, de forma a atender, a um custo mínimo de investimento, a demanda prevista ao longo do horizonte de planejamento, mantendo-se níveis adequados de qualidade e confiabilidade no fornecimento da energia elétrica.

Nesta dissertação são propostas duas metodologias de auxílio ao planejamento da expansão de sistemas de subtransmissão, adaptadas às peculiaridades destes sistemas. Por não considerar as incertezas externas e internas do problema e a evolução temporal da adição dos reforços, o planejamento é tratado como um problema de natureza determinística e estático. As metodologias consideram a duplicação de circuitos em ramos existentes ou a construção de novas linhas em ramos novos do sistema, podendo estes ramos receber circuitos simples ou duplos. Para a realização da busca por boas soluções para o problema do planejamento da subtransmissão, nesta dissertação são consideradas técnicas de otimização, heurísticas construtivas e um programa de análise de fluxo de potência com modelagem não-linear (AC).

A primeira metodologia utiliza três índices de desempenho, capazes de capturar a atratividade de reforços (em termos dos respectivos custos de investimento e da redução das perdas ativas) para a obtenção de conjuntos reduzidos de ramos candidatos, existentes e novos. Para a criação do conjunto de ramos novos é também utilizado um algoritmo heurístico baseado em uma estrutura em árvore. A metaheurística Estratégias de Evolução realiza a busca por boas alternativas de expansão. Já a segunda metodologia é baseada em um algoritmo heurístico construtivo em árvore, o qual utiliza dois dos três índices de desempenho citados para conduzir o processo de adição de reforços. As metodologias propostas são aplicadas a dois sistemas reais da Cemig Distribuição S.A., sendo os resultados apresentados e amplamente discutidos.

ABSTRACT

The increase of the electricity consumption over the years induces the development of new technologies and, also, the need of the construction of new lines for the transmission and distribution systems. Traditionally, the expansion planning of these systems consists in determining, from a set of candidate reinforcements, those who should be incorporated to the system, in order to meet, at a minimum cost of investment, the expected demand along the planning horizon, keeping appropriate levels of quality and reliability in the supply of electricity.

In this dissertation, two methodologies of support for the expansion planning of the sub-transmission systems are proposed, adapted to the peculiarities of these systems. Due to the fact of not considering external and internal uncertainties of the problem and the temporal evolution of the addition of reinforcements, planning is treated as a problem of deterministic and static nature. The methodologies consider the duplication of existing circuits or the construction of lines in new branches of the system, whose branches can receive single or double circuits. To search good solutions to the sub-transmission planning problem, optimization techniques, constructive heuristics and a non-linear (AC) power flow program are considered in this dissertation.

The first methodology uses three performance indices, which are able to capture the attractiveness of new reinforcements (in terms of their investment costs and the reduction of active power losses) to obtain reduced sets of existing and new candidate branches. For the creation of new candidate branches it is also used a heuristic algorithm, which is based on a tree structure. The Evolution Strategies metaheuristic performs the search for good expansion alternatives. The second methodology is based on a tree constructive heuristic, which uses two of the three performance indices cited to lead the process of adding reinforcements. The proposed methodologies are applied to two real systems of Cemig Distribuição S.A., and the results are presented and widely discussed.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	v
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 – REVISÃO DA LITERATURA	3
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO/SUBTRANSMISSÃO	10
2.1 – INTRODUÇÃO	10
2.2 – LINHAS DE ABORDAGEM	10
2.3 – EXPLOSÃO COMBINATÓRIA DE CONFIGURAÇÕES REFORÇADAS	14
2.4 – PERDAS ATIVAS NO PLANEJAMENTO DA SUBTRANSMISSÃO	17
2.5 - CONCLUSÕES	20
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA BASEADA EM METAHEURÍSTICA	21
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA BASEADA EM METAHEURÍSTICA	
	21
3.1 – INTRODUÇÃO	21 21
3.1 – INTRODUÇÃO	21 21
3.1 – INTRODUÇÃO	212122
 3.1 – INTRODUÇÃO 3.2 – SELEÇÃO DOS CONJUNTOS DE RAMOS CANDIDATOS 3.2.1 – Seleção do Conjunto de RNs Candidatos 3.2.2 – Seleção do Conjunto de REs Candidatos 	21212227
 3.1 – INTRODUÇÃO	2122272728
 3.1 – INTRODUÇÃO	212122272830
3.1 – INTRODUÇÃO	21212227283031
 3.1 – INTRODUÇÃO	2121222728303134
3.1 – INTRODUÇÃO	212122272830313436

3.4.2 – Sistema Leste Cemig – SL	41
3.4.2.1 – Seleção dos Conjuntos de Ramos Candidatos – SL	42
3.4.2.2 – Aplicação da Metodologia Baseada em Metaheurística – SL	4 3
3.4.3 – Sistema Leste Centro Norte Cemig – SLCN	60
3.4.3.1 – Seleção dos Conjuntos de Ramos Candidatos – SLCN	61
3.4.3.2 – Aplicação da Metodologia Baseada em Metaheurística – SLCN	61
3.5 – CONCLUSÕES	72
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA	74
4.1 – INTRODUÇÃO	74
4.2 – HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PROPOSTA	74
4.2.1 – Algoritmo da Metodologia Heurística Construtiva	75
4.3 – APLICAÇÕES E RESULTADOS	77
4.3.1 – Considerações Gerais das Aplicações	78
4.3.2 – Sistema Leste Cemig – SL	79
4.3.3 – Sistema Leste Centro Norte Cemig – SLCN	85
4.4 – CONCLUSÕES	87
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sistema de Transmissão Brasileiro [O13]	2
Figura 2.1: Equivalente hipotético de um sistema de subtransmissão	18
Figura 3.1: Árvore de configurações geradas pelo algoritmo heurístico construtivo	22
Figura 3.2: Diagrama da área de interesse do Sistema Leste Cemig (SL)	42
Figura 3.3: Populações finais encontradas pela metodologia ES – SL	56
Figura 3.4: Populações finais encontradas pela metodologia ES – SLCN	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Custos das LTs de acordo com os cabos considerados
Tabela 3.2: Impedância e susceptância dos cabos que compõem as LTs39
Tabela 3.3: Melhores Combinações em termos de custo global para o SL44
Tabela 3.4: Melhores soluções por custo global (σ = 0,3 e $nIND$ = 30) – Sistema SL46
Tabela 3.5: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo global ($\sigma = 0.3 \text{ e } nIND = 30$) – Sistema SL
Tabela 3.6: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,3 e $nIND$ = 30) – Sistema SL
Tabela 3.7: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,3 e $nIND$ = 30) – Sistema SL
Tabela 3.8: Resultados para combinações dos parâmetros σ e $nIND$ – Sistema SL49
Tabela 3.9: Melhores soluções por custo global (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL 50
Tabela 3.10: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo de global (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL
Tabela 3.11: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL
Tabela 3.12: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL
Tabela 3.13: Melhores Combinações em termos de custo de perdas para o SL52
Tabela 3.14: Melhores soluções por custo de perdas (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL. 53
Tabela 3.15: Melhores indivíduos por custo de perdas visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL
Tabela 3.16: Desvios percentuais em relação ao menor custo de perdas da execução (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL

rabela 3.17: Desvios percentuais em relação ao menor custo de perdas gerai (σ = 0,5 cm. σ = 0,5 cm. σ = 0,5 cm. σ = 0.5
Tabela 3.18: Melhores indivíduos das populações finais ordenados pelo custo global (σ = 0,8 e $nIND$ = 40) – Sistema SL
Tabela 3.19: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,5 e $nIND$ = 40) – Sistema SL
Tabela 3.20: Configuração semelhante à configuração Comb_G158
Tabela 3.21: Configurações semelhantes à configuração Comb_P159
Tabela 3.22: Configurações semelhantes à configuração Comb_P559
Tabela 3.23: Melhores soluções por custo global (σ = 0,3 e $nIND$ = 80) – Sistema SLCN63
Tabela 3.24: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo global (σ = 0,3 e $nIND$ = 80) – Sistema SLCN64
Tabela 3.25: Melhores indivíduos por custo de perdas visitados durante a minimização do custo global (σ = 0,3 e $nIND$ = 80) – Sistema SLCN
Tabela 3.26: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,3 en $nIND$ = 80) – Sistema SLCN
Tabela 3.27: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,3 e $nIND$ = 80) – Sistema SLCN69
Tabela 3.28: Melhores soluções por custo de perdas (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN
Tabela 3.29: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,3 e $nIND$ = 80) – Sistema SLCN67
Tabela 3.30: Melhores indivíduos por custo de perdas visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,3 e $nIND$ = 80) – Sistema SLCN
Tabela 3.31: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,3 σ

Tabela 3.32: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,3 e $nIND$ =
80) – Sistema SLCN
Tabela 3.33: Configurações semelhantes à Configuração 171
Tabela 3.34: Configurações Semelhantes à Configuração 272
Tabela 4.1: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SL – Caso Referência.
Tabela 4.2: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SL – Caso AHC81
Tabela 4.3: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SL – Caso AHC _{Perdas}
Tabela 4.4: Valores médios dos custos de perdas e dos custos de investimento
Tabela 4.5: Número de configurações comuns àquelas obtidas pelo Caso Referência 84
Tabela 4.6: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SLCN – Caso AHC86
Tabela 4.7: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SLCN – Caso AHC _{Perdas} 86
Tabela 4.8: Valores médios dos custos de perdas e dos custos de investimento em cada nível da árvore

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais

ES - Estratégia de Evolução (*Evolution Strategies*)

GA - Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm*)

IMPA - Investimento Mínimo da População Aleatória

IMPO - Investimento Mínimo da População Orientada

LT - Linha de Transmissão

nIND - Número de Indivíduos (Estratégia de Evolução)

nRE - Número de Ramos Existentes

nRN - Número de Ramos Novos

ONS - Operador Nacional do Sistema

PES - Planejamento da Expansão do Sistema de Subtransmissão

PET - Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão

pu - Por unidade

RE - Ramo Existente

RN - Ramo Novo

SE - Subestação

SL - Sistema Leste Cemig

SLCN - Sistema Leste Centro Norte Cemig

 σ - Passo Mutacional (Estratégia de Evolução)

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O transporte de energia elétrica proveniente de usinas (sejam elas térmicas, hidráulicas, termonucleares, eólicas, solares, etc.) até os centros de consumo, se dá através de redes de energia elétrica. Geralmente, ao sair das usinas geradoras a energia elétrica percorre grandes distâncias, situação que fica muito evidenciada no Brasil. A grande extensão das redes brasileiras é explicada pela dimensão continental do país e características de sua evolução, com as maiores e mais importantes usinas localizadas a distâncias consideráveis dos centros consumidores. A fim de ilustrar essa situação, na Figura 1.1 é apresentado o mapa de transmissão de energia elétrica brasileiro.

No Brasil, as redes de energia elétrica basicamente são classificadas de acordo com seus níveis de tensão. Para tensões acima de 230 kV essas redes são conhecidas como rede básica, ou rede primária de transmissão, sendo responsável pelo transporte de grandes "blocos" de energia, visando o suprimento de grandes centros consumidores e a alimentação de eventuais consumidores de grande porte [A04]. A rede básica é controlada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Redes com tensões inferiores a 230 kV são denominadas redes de distribuição, ou rede secundária. As redes de distribuição são basicamente uma continuação do sistema de transmissão. Elas recebem a energia elétrica proveniente da rede de transmissão com objetivo de atender pequenas e médias cidades e consumidores industriais de grande porte. As redes de distribuição que possuem tensões entre 69 kV e 138 kV são classificadas como Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT), ou redes de subtransmissão, que são o foco do estudo apresentado nesta dissertação [A10].

O aumento do consumo de energia elétrica ao longo dos anos induz o desenvolvimento de novas tecnologias e, também, a necessidade da construção de novas linhas para os sistemas de transmissão e distribuição. Tanto o planejamento da expansão do sistema de transmissão (PET) quanto o planejamento do sistema de subtransmissão (PES), consiste em definir reforços a serem adicionados ao sistema tendo em vista o atendimento da carga futura, dentro de exigências normativas.

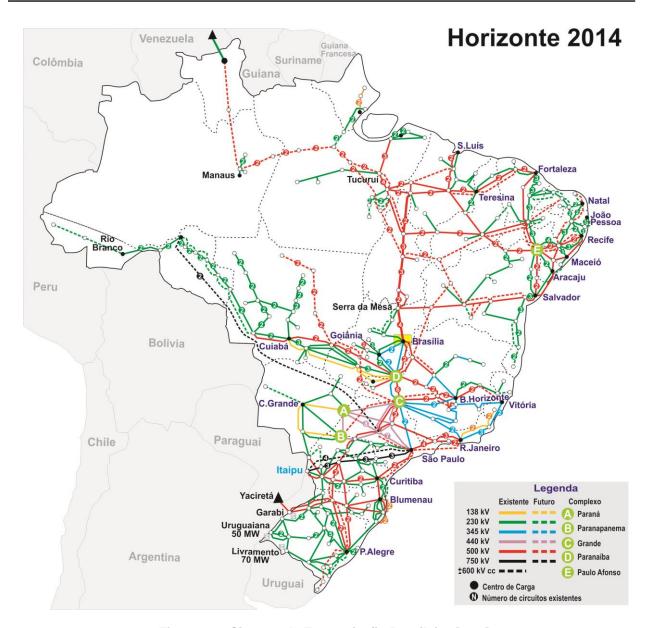


Figura 1.1: Sistema de Transmissão Brasileiro [O13].

Entretanto, a subtransmissão, por possuir linhas de transmissão (LTs) de menor comprimento, menores níveis de tensão, e, ainda, por envolver uma rede com menor malha que aquela apresentada pela transmissão (rede básica), tem características peculiares, não sendo, por exemplo, capaz de suportar o critério "N-1", fato que deve ser considerado no estudo do planejamento da expansão. Alguns aspectos operativos, como, por exemplo, as perdas ativas e os índices de frequência e duração das falhas, podem ser impactados mais diretamente pela expansão da subtransmissão. Sob este prisma, a consideração da confiabilidade no PES deve estar associada com a definição de critérios mínimos de desempenho mais flexíveis, porém capazes de garantir robustez à configuração planejada [MSRS12].

Usualmente o PES é dividido em dois subproblemas: expansão das subestações e expansão dos circuitos. No primeiro subproblema determina-se a capacidade de expansão das subestações existentes, assim como a localização e o tamanho de novas subestações. Já no segundo subproblema, são identificados reforços na rede visando aumentar a capacidade de transmissão. Dentre as formas mais usuais de se aplicar reforços na rede de subtransmissão, podem ser citadas a adição de novas LTs, em novas conexões ou em paralelo com LTs existentes, o recondutoramento dos cabos das LTs e a elevação do nível de tensão [S12] e [JB10].

Nesta dissertação, são propostas metodologias de auxílio ao planejamento da expansão de sistemas de subtransmissão capazes de identificar boas alternativas de reforços. Na definição destas alternativas são consideradas as minimizações das perdas ôhmicas e do custo de investimento. Com a consideração da minimização das perdas ôhmicas, espera-se que o conjunto de alternativas identificado pela metodologia também resulte em benefícios para outros aspectos operativos do sistema como o perfil de tensão, o nível de carregamento dos circuitos e a confiabilidade.

Para realização do processo de busca pelas melhores soluções para o problema, são utilizadas nesta dissertação, técnicas heurísticas construtivas e a metaheurística Estratégia de Evolução (*Evolution Strategies* – ES). A análise de desempenho das configurações reforçadas, obtidas ao longo do processo de busca, é realizada utilizando-se um programa de análise de fluxo de potência com modelagem AC.

1.2 – REVISÃO DA LITERATURA

Até meados dos anos 70, nos estudos de planejamento da expansão de sistemas elétricos de potência, apenas ferramentas de análise de redes eram utilizadas (e.g., cálculo do fluxo de potência, estudos de estabilidade e curto-circuito). Poucas eram as alternativas de expansão, o que tornava o trabalho do planejador uma tarefa relativamente simples. Mas o crescimento das dimensões dos sistemas elétricos com o passar do tempo trouxe a necessidade de estudos mais sofisticados em torno do problema do planejamento de reforços.

Já no início da década de 70, com uma maior disponibilidade de ferramentas computacionais, programas heurísticos, baseados em técnicas de otimização, começaram a ser desenvolvidos visando determinar reforços e em quais locais os mesmos deveriam ser instalados de forma a minimizar o custo total de investimento no sistema elétrico e, ainda, o atendimento da carga com qualidade e confiabilidade.

Um dos primeiros trabalhos publicados voltado para o planejamento de reforços para sistemas de transmissão foi desenvolvido por Garver [G70], no início da década de 70. Neste trabalho, para seleção de circuitos candidatos à construção, o autor utilizou a programação linear e um algoritmo heurístico construtivo. Essa proposta tornou-se fundamental em pesquisas de planejamento de expansão de sistemas de transmissão que a procederam, pois era a única forma de otimizar o problema com as técnicas então disponíveis. Outros trabalhos da época baseados em técnicas de otimização e planejamento automático que merecem destaque são [DE73], [F75] e [VGS85].

Em 1982, Monticelli e outros [MSPC82] desenvolveram um programa iterativo para identificação de boas alternativas de reforços no planejamento da expansão de sistemas a longo prazo. A proposta, neste trabalho, é baseada no fluxo de energia linearizado, análise de contingências e análise de sensibilidade. A escolha de novas adições de reforços é realizada considerando uma lista de reforços ordenada por um índice de mínimo esforço, que visa uma melhor distribuição dos fluxos.

Dentro do planejamento da expansão de sistemas, técnicas como a Decomposição de Benders também têm sido usadas com o intuito de separar os subproblemas de investimentos e operação [PPCO85] e [BPG01]. Inicialmente, o subproblema de investimento seleciona um plano preliminar e, posteriormente, o subproblema de operação analisa o mesmo indicando restrições operacionais violadas. Em seguida, estas restrições são adicionadas ao subproblema de investimento e uma nova iteração de Benders é repetida até que a convergência seja alcançada. Apesar de produzir soluções ótimas para problemas de dimensões pequenas e médias, a Decomposição de Benders deve ser acompanhada de algum tipo de heurística quando aplicada a sistemas de grande porte.

A heurística GRASP, procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP*) também foi utilizada no problema do planejamento da expansão da transmissão [BOA01]. Neste trabalho os autores desenvolveram um modelo dividido em duas fases. Na primeira fase o algoritmo é responsável por determinar uma solução factível para o problema e na segunda fase é realizado um processo de busca local de forma a aprimorar a solução. Os estudos de caso apresentados mostraram que para todos os sistemas de teste as soluções mais conhecidas, já obtidas por outros métodos, também foram atingidas por esta abordagem. Posteriormente, um conceito generalizado de GRASP foi utilizado juntamente com a técnica conhecida como Path Relinking [FBRF05], o que proporcionou melhores resultados.

Em 2005, Oliveira e outros [OSPC05], a fim de determinar estratégias de investimento para a expansão da transmissão, propuseram um algoritmo heurístico construtivo com fluxo de potência ótimo modelado através da metodologia de pontos interiores. A natureza discreta da decisão de expansão (0 ou 1) foi tratada com base na sensibilidade fornecida por uma função sigmoidal, e incorporada ao problema de fluxo de potência ótimo. Resultados obtidos na aplicação do algoritmo proposto, em comparação com outros métodos da literatura, evidenciaram a robustez e o baixo tempo de processamento necessário. Um fato interessante, é que neste estudo os autores chamam a atenção para a importância da consideração das perdas de transmissão no problema do planejamento da expansão.

Devido o aumento da complexidade dos sistemas elétricos de potência houve a necessidade de se procurar por métodos de busca ainda mais elaborados, assim, a utilização de metaheurísticas foi intensificada. Apesar dos modelos baseados nestas técnicas não necessariamente encontrarem soluções ótimas, mas boas soluções factíveis, atualmente, dentre os estudos de planejamento de sistemas de transmissão, aqueles que utilizam metaheurísticas têm apresentado ótimos resultados. Grandes vantagens podem ser consideradas na utilização destas técnicas, como a baixa complexidade dos programas, a capacidade de trabalhar com problemas inteiro-mistos e não lineares, e um tempo de resposta satisfatório. O sucesso destas técnicas está relacionado à capacidade de evitar ótimos locais, explorando a estrutura básica de cada problema.

Em 1998, Gallego e outros [GMR98] compararam três técnicas metaheurísticas para resolver o problema do PET: o Recozimento Simulado (*Simulated Annealing – AS*); o Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm – GA*) e a Busca Tabu (*Tabu Search – TS*). Também neste trabalho foi proposta uma abordagem híbrida, utilizando as três técnicas, a qual apresentou melhor resultado do que os obtidos na utilização de cada técnica individualmente.

Uma nova metaheurística baseada em Estratégias de Evolução é apresentada em [LSRM06]. Para auxiliar no processo de busca, também neste trabalho é utilizada a heurística GRASP. Este trabalho tem uma grande importância por apresentar análises de planejamento dinâmico em estudos de casos utilizando um pequeno sistema teste e uma rede real de subtransmissão. O problema consiste em minimizar os custos de investimento e de interrupção de carga. Neste trabalho também é realizada a avaliação da confiabilidade, que acontece apenas na segunda fase do processo de busca, i.e., a *posteriori*. Dessa forma, a análise de confiabilidade se restringe às decisões com melhores custos de investimento obtidas numa primeira fase do processo.

No ano de 2008, Leite da Silva e outros em [LSMR08] compararam três metodologias baseadas em metaheurísticas para resolver o problema do PET: a Estratégia de Evolução; Busca Tabu e Colônia de Formigas (*Ant Colony System – ACS*). No entanto, outras heurísticas também foram usadas para auxiliar o processo de otimização, como por exemplo, o GRASP.

Outros estudos que aplicam técnicas metaheurísticas em problemas de planejamento da expansão de sistemas podem ser encontrados em [DMC91], [GRM00], [MF02], [S07], [LE08], [LSMR08], [RLH09], [LRMR10], [LRHM11], [MMSM11] e [MARL12].

É fácil constatar que existe uma vasta gama de trabalhos abordando o problema PET [RMGH02], [LRHM03] e [LSMR08]. Já o planejamento de reforços de sistemas de subtransmissão, que é o foco do estudo presente nesta dissertação, é um tema pouco explorado na literatura. São raros os trabalhos voltados diretamente para este tema. Entretanto, várias iniciativas interessantes de aplicação de técnicas no

planejamento da transmissão podem ser utilizadas para o planejamento de sistemas de subtransmissão, uma vez que essas redes possuem características semelhantes.

Em 2009, Gutiérrez e outros [GGSV09] propuseram um modelo denominado ANDREA, destinado a obter configurações próximas da configuração ótima, com baixo custo computacional, tanto para o planejamento estático quanto para o planejamento dinâmico, em redes de subtransmissão de tamanho real. O modelo desenvolvido neste trabalho é capaz de identificar um conjunto de possíveis candidatos para aliviar o congestionamento da rede e, em seguida, decidir quais devem ser instalados para minimizar os custos de investimento e operação. Dois algoritmos foram desenvolvidos neste estudo, um algoritmo de busca em árvore direcionada (Guided Tree Search Algorithm - GTSA) e um algoritmo genético. Após a aplicação dos dois algoritmos em um sistema real, os autores constataram que a busca em árvore revelou ser mais rápida, porém o algoritmo genético forneceu soluções de melhor qualidade. O trabalho considera o desempenho do sistema sob contingências simples. Porém, não é claro quanto ao cálculo da energia não suprida aos consumidores, mencionando que a mesma é calculada com base no excedente da sobrecarga admissível de cada circuito. O excedente de fluxo com respeito à sobrecarga admissível é usado para calcular a energia não fornecida.

Também em 2009, Manso e outros em [MRSL09] apresentaram uma metodologia para solucionar o problema da expansão a multiestágios de sistemas de transmissão/subtransmissão considerando as incertezas internas e externas. Para a consideração das incertezas internas foi realizada uma avaliação da confiabilidade, utilizando a simulação Monte Carlo não sequencial. Quanto ao tratamento das incertezas externas utilizou-se a técnica de cenários, explorando as suas características e os principais critérios de tomada de decisão frequentemente utilizados. Para a busca do plano ótimo aplicou-se a meta-heurística Busca Tabu.

Em [JB10] a rede de distribuição foi modelada como pontos de carga e, em seguida um algoritmo de agrupamento matemático modificado foi utilizado para a alocação de novas subestações de subtransmissão. Um algoritmo baseando em GA foi utilizado para alocar os pontos de carga para as subestações existentes ou candidatas, e encontrar a melhor configuração obtida com a adição de novas

subestações e de novos circuitos. O método proposto foi aplicado sobre um sistema de subtransmissão típico de pequeno porte. A confiabilidade não foi avaliada, assim como as perdas ôhmicas dos circuitos. Apenas as perdas dos alimentadores foram consideradas como sendo um percentual da carga.

Em [SB11] a integração de Geração Distribuída foi utilizada como uma alternativa para o suprimento da carga do sistema de subtransmissão. Os efeitos da Geração Distribuída no planejamento da expansão do sistema de subtransmissão foram modelados como um problema de otimização onde o GA e a Programação Linear foram empregados para resolvê-lo. A abordagem proposta considerou as perdas nas linhas e foi aplicada ao mesmo sistema de pequeno porte utilizado em [JB10]. Devese destacar que a consideração da geração distribuída em sistemas com pouca malha é bastante questionável em estudos de expansão, uma vez que este tipo de geração não opera de forma ilhada.

Nos trabalhos apresentados nos últimos parágrafos, que tratam do estudo para sistemas de subtransmissão, algumas peculiaridades não foram consideradas no processo de planejamento. Por envolver uma rede com menor malha que aquela apresentada pela transmissão, a expansão da subtransmissão pode impactar mais diretamente em alguns aspectos operativos, como, por exemplo, as perdas ativas e os índices de frequência e duração das falhas. Portanto, nesta dissertação, são propostas metodologias de auxílio ao PES, adaptadas às peculiaridades dos sistemas de subtransmissão, visando produzir sistemas mais robustos e com capacidade para absorver o crescimento anual da demanda, permitindo, ainda, uma redução dos gastos com a geração de energia elétrica. Tais objetivos são indiretamente alcançados pela incorporação das perdas ativas na função objetivo, o que torna possível o emprego de uma ferramenta usual do setor elétrico: o programa para cálculo de fluxo de potência.

1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 5 capítulos, incluindo este capítulo introdutório que apresenta o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão e

subtransmissão e o objetivo do estudo desta dissertação. Também neste capítulo é apresentada uma revisão de alguns trabalhos relevantes para o tema em estudo.

No Capítulo 2 o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão e/ou subtransmissão é apresentado, bem como as linhas de abordagem e técnicas de solução relacionadas e este tema. Neste capítulo, também é abordada a explosão combinatória de soluções presente no problema de planejamento, e, ainda, são apresentados os benefícios operativos decorrentes da consideração das perdas ativas na função de busca por boas alternativas de expansão da subtransmissão.

A primeira metodologia proposta nesta dissertação, a metodologia baseada em metaheurística, é apresentada no Capítulo 3. Neste capítulo, é realizada uma descrição da técnica metaheurística Estratégia de Evolução, escolhida para implementação da metodologia proposta, apontando parâmetros e procedimentos considerados para o desenvolvimento do estudo. Neste capítulo, são também apresentados os resultados referentes às aplicações da metodologia baseada na metaheurística em sistemas de subtransmissão da Cemig.

No Capítulo 4, é apresentada a segunda metodologia proposta para a busca de boas alternativas de expansão da subtransmissão, a metodologia heurística construtiva. Os parâmetros e procedimentos considerados para esta metodologia estão também presentes neste capítulo, bem como os resultados e análises das aplicações da metodologia aos mesmos sistemas reais utilizados no Capítulo 3.

Por fim, no Capítulo 5, são expostas as principais conclusões referentes aos estudos realizados nesta dissertação. Também neste capítulo, são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO/SUBTRANSMISSÃO

2.1 – INTRODUÇÃO

O problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão e/ou de subtransmissão consiste em definir novos reforços que devem ser adicionados ao sistema a fim de suprir a demanda prevista ao longo do horizonte de planejamento, mantendo-se os níveis de qualidade/confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, a um custo mínimo de investimento.

Neste capítulo o tema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão/subtransmissão é apresentado, com enfoque para algumas particularidades consideradas no estudo desta dissertação.

2.2 – LINHAS DE ABORDAGEM

Antes da década de 70, o trabalho de planejar a expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica era considerado uma tarefa relativamente simples, pois existiam poucas alternativas de expansão e as incertezas da demanda e fontes energéticas eram reduzidas. Os métodos utilizados para o planejamento eram, em sua grande maioria, determinísticos (e.g., programas de fluxo de potência, curto circuito e estabilidade transitória), visto que a análise estava limitada a alguns cenários de demanda, hidrologia e parâmetros econômicos [F75] e [R06].

Após a década de 70, o crescimento acentuado da demanda de energia elétrica e a disponibilidade de maiores recursos computacionais estimularam o desenvolvimento de programas baseados em técnicas de otimização, com uma tendência para o planejamento automático [R06]. A necessidade de se obter soluções de boa qualidade para sistemas cada vez mais complexos e sobrecarregados fez com que a utilização de métodos de busca mais elaborados se intensificasse.

Atualmente, o planejamento da expansão pode ser classificado através das linhas de abordagem descritas a seguir, de acordo com [S07] e [R11].

Quanto à consideração de incertezas:

- Determinística Numa abordagem determinística "pura", a adição de reforços é baseada essencialmente no custo de investimento, podendo ainda considerar os custos de operação (e.g., perdas ôhmicas, manutenção, etc.). O sistema é avaliado para a condição de rede intacta, ou ainda quando submetido a uma lista de contingências (e.g., critério N-1). Em geral, se consideram ainda os custos de perdas ôhmicas e de manutenção. Normalmente uma decisão baseada somente na utilização desses critérios pode conduzir a investimentos elevados, além de não garantir níveis adequados de confiabilidade para todas as barras do sistema. Contudo estes modelos determinísticos podem ser muito importantes numa etapa inicial do planejamento, tendo a finalidade de reduzir o número de alternativas a serem avaliadas por modelos mais complexos;
- Não-determinística Existem várias incertezas associadas ao processo de planejamento as quais podem ser divididas nas seguintes categorias:
 - o Incertezas externas Envolvem "indefinições" relacionadas aos seguintes aspectos: projeções de mercado (demanda e energia); taxas de interesse e de câmbio; regras do novo ambiente competitivo; restrições ambientais; afluências hidrológicas; novas tecnologias; custos de combustíveis; etc.. Tendo em vista estas incertezas, é indispensável a obtenção de planos de expansão mais flexíveis ou robustos, capazes de suportar os diferentes cenários futuros produzindo uma melhor estratégia de expansão para o sistema;
 - Incertezas internas Envolvem "indefinições" relacionadas às disponibilidades dos equipamentos dos sistemas de potência. O desempenho das redes pode ser avaliado através de índices de confiabilidade, incluindo índices de custos de produção e de interrupção de energia. Em alguns estudos, o impacto das afluências hidrológicas nas capacidades de geração pode ser interpretado com uma incerteza interna (disponibilidade energética). Quando se considera estas incertezas, o objetivo consiste em selecionar o plano

de expansão capaz de atender à demanda futura da carga com a melhor relação custo/benefício para a sociedade.

Quanto à interferência do planejador:

- Automática Quando se utiliza um algoritmo computacional que define as decisões em relação à expansão da rede, sem qualquer interferência do planejador;
- Interativa Quando o planejador interage com o algoritmo computacional adotado, utilizando sua própria experiência para orientar a tomada de decisões ou para a definição/realização de estudos complementares.

Quanto à evolução temporal dos reforços:

- Estática Para um dado horizonte de planejamento, os modelos estáticos determinam a localização e o número de reforços necessários. Nesta abordagem, o planejador não está interessado em saber quando os reforços devem ser instalados, mas sim o estado final da rede;
- Dinâmica Para o planejamento dinâmico, não somente a localização e o número de reforços serão necessários, mas também a evolução temporal destas decisões é objeto do estudo. Neste caso, o modelo de otimização deve minimizar o valor presente dos custos envolvidos na sua função objetivo. O tamanho e o nível de complexidade dos sistemas proporcionam um número muito grande de variáveis e restrições a serem consideradas exigindo um maior esforço computacional para a obtenção dos melhores planos.

De acordo com [S07], o problema da expansão de sistemas de subtransmissão é essencialmente dinâmico e de natureza não-determinística e os estudos de planejamento devem considerar ao máximo as incertezas do processo. Porém, não se deve ignorar a experiência existente com alguns critérios determinísticos (e.g., o critério N-1). Ademais, a inclusão de todas as incertezas externas e internas poderá inviabilizar o processo de planejamento tendo em vista as complexidades em termos de dados, modelos e custo computacional. O planejador terá a difícil tarefa de

escolher quais incertezas são mais relevantes para o problema e o processo de tomada de decisões dificilmente poderá prescindir da participação deste profissional.

Para a solução do problema de planejamento, devem-se utilizar três conjuntos distintos de ferramentas, [S07] e [R11]:

- Técnicas de otimização A utilização desta ferramenta tem como objetivo principal minimizar todos os custos envolvidos na função objetivo da expansão de sistemas de potência: investimentos, operação e manutenção, perdas, interrupção, multas, etc.. Aqui, ferramentas tradicionais de programação matemática e métodos heurísticos e metaheurísticos são utilizados e incluem programação linear, não-linear, dinâmica, inteira e/ou mista;
- Modelagem de incertezas Técnicas probabilísticas e baseadas em conjuntos fuzzy (Fuzzy Sets FS) podem ser utilizados. Os métodos baseados na teoria de probabilidades e processos estocásticos (incluindo teoria de confiabilidade) estão mais avançados para lidar com as incertezas internas mais relevantes deste problema, por exemplo, as disponibilidades dos componentes. Incertezas externas, cujo comportamento passado caracteriza bem o comportamento futuro, como por exemplo: séries hidrológicas e demanda de curto prazo, também podem ser tratadas com maior segurança pela teoria de probabilidades. Em relação à demanda de potência de longo prazo, outro parâmetro importante no planejamento, o uso de variáveis linguísticas parece ser obrigatório e modelos baseados em FS podem ser mais convenientes. Contudo, deve-se destacar também a existência de aplicações baseadas em técnicas de cenários e análises via árvore de decisões em sistemas elétricos de potência;
- Análise estática do sistema As possíveis configurações do sistema de potência são usualmente analisadas por um conjunto de programas já bastante conhecidos, como o fluxo de potência não-linear (fluxo AC), análise de curto-circuito, estudo de estabilidade transitória, etc..

O objetivo final da aplicação dos três conjuntos de ferramentas anteriores é a determinação de boas alternativas de expansão que deverão ser utilizadas em um processo de decisão onde o custo e o benefício serão adequadamente avaliados.

O planejamento do sistema elétrico de subtransmissão deverá utilizar as ferramentas usuais de análise, em particular a análise estática de desempenho da rede, num ambiente de incertezas internas e externas, cuja relevância deverá ser definida para cada problema.

Particularmente no estudo desta dissertação, por não considerar as incertezas externas e internas do problema e a evolução temporal da adição dos reforços para o sistema de subtransmissão, o problema do planejamento é tratado como um problema de natureza determinística e estático. São, então, considerados os custos de investimento e de perdas ôhmicas na função objetivo, para um horizonte de planejamento de médio prazo (5 a 10 anos). Os algoritmos computacionais desenvolvidos para implementação das metodologias trabalham, de forma geral, automaticamente. No entanto, os mesmos são propostos como ferramentas de auxílio ao processo de planejamento, devendo permitir em diversos pontos a interferência do planejador. Para a solução do problema do planejamento da expansão de sistemas de subtransmissão, nesta dissertação são consideradas técnicas de otimização e ferramentas de análise estática do sistema.

2.3 - EXPLOSÃO COMBINATÓRIA DE CONFIGURAÇÕES REFORÇADAS

Um dos principais desafios enfrentados no planejamento da expansão de sistemas de transmissão/subtransmissão reside na explosão combinatória das alternativas de reforços. Quando se considera a possibilidade de construção de circuitos simples ou duplos em ramos novos do sistema e a duplicação de circuitos simples em ramos já existentes, o número total de combinações de reforços pode ficar bastante elevado. A explosão combinatória se torna mais crítica quando se planeja sistemas de grande porte, para os quais o número de ramos que podem receber reforços, assim como o número final de reforços adicionados, aumenta significativamente.

Para fornecer uma visão do processo de geração das combinações de reforços, com destaque para o impacto produzido pelo incremento do número de reforços

adicionados em cada combinação, nesta seção são descritas as expressões que permitem o cálculo do número de combinações obtidas. Porém, antes de apresentar estas expressões, devem ser definidos alguns parâmetros e variáveis:

- N_{RN} número de ramos novos candidatos;
- N_{RE} número de ramos existentes candidatos;
- N_{REF} número de reforços (LTs) adicionados em cada configuração;
- NC_S número de combinações contendo apenas reforços simples (1 LT);
- NC_{1D} número de combinações contendo 1 reforço duplo (2 LTs), completado por reforços simples;
- NC_{2D} número de combinações contendo 2 reforços duplos, completado por reforços simples;
- NC_{ND} número de combinações contendo N reforços duplos, completados, ou não, por um reforço simples, sendo N igual ao resultado inteiro da divisão de N_{REF} por 2.

Com base nos parâmetros e variáveis definidos anteriormente, pode-se afirmar que o número de combinações (*NC*), para um determinado número de reforços, é dado pela Equação (2.1):

$$NC = NC_S + NC_{1D} + NC_{2D} + \dots + NC_{ND}$$
 (2.1)

O cálculo das parcelas da Equação (2.1) é realizado de forma simples e direta por meio da análise combinatória. Para este cálculo foram desenvolvidas as seguintes expressões:

$$NC_S = \binom{N_{RN} + N_{RE}}{N_{REF}} \tag{2.2}$$

$$NC_{1D} = \binom{N_{RN}}{1} \times \binom{(N_{RN} - 1) + N_{RE}}{N_{REF} - 2}$$

$$(2.3)$$

$$NC_{2D} = \binom{N_{RN}}{2} \times \binom{(N_{RN} - 2) + N_{RE}}{N_{REF} - 4}$$

$$(2.4)$$

$$NC_{iD} = \binom{N_{RN}}{i} \times \binom{(N_{RN} - i) + N_{RE}}{N_{REF} - 2 \times i}$$
(2.5)

A Equação (2.2) fornece o número de maneiras (combinações) de se alocar N_{REF} reforços simples entre todos os ramos candidatos (novos e existentes). Já a Equação (2.3) fornece o total de maneiras de se alocar 1 reforço duplo, sendo todos os demais reforços formados por LT simples. Este total de maneiras é obtido pelo produto de duas parcelas. A primeira fornece o número de maneiras de se alocar 1 reforço duplo entre N_{RN} ramos novos. A segunda parcela fornece o número de maneiras de se alocar (N_{REF} – 2) reforços simples entre os (N_{RN} – 1) ramos novos que não receberam o reforço duplo e os N_{RE} ramos existentes.

Analogamente, a Equação (2.4) fornece o cálculo para a situação em que se tem 2 reforços duplos. Então, a primeira parcela da Equação (2.4) fornece o número de maneiras de se alocar 2 reforços duplos entre N_{RN} ramos novos. A segunda parcela fornece o número de maneiras de se alocar (N_{REF} – 4) reforços simples entre os (N_{RN} – 2) ramos novos que não receberam os reforços duplos e os N_{RE} ramos existentes. Generalizando, tem-se a Equação (2.5), que fornece o cálculo para um número i de reforços duplos, sendo i menor ou igual a MN_D (número máximo de reforços duplos que podem ser adicionados, dado pelo resultado inteiro da divisão de N_{REF} por 2).

Sendo assim, todo o cálculo de *NC* pode ser realizado pela Equação (2.6), dada a seguir:

$$NC = \sum_{i=0}^{MN_D} {N_{RN} \choose i} \times {(N_{RN} - i) + N_{RE} \choose N_{REF} - 2 \times i}$$
(2.6)

Para o cálculo do número total de combinações (NTC) formadas por um número de reforços menor ou igual a MN_{REF} (Máximo Número de Reforços), pode-se utilizar a Equação (2.7), fornecida a seguir:

$$NTC = \sum_{N_{REF}=1}^{MN_{REF}} \left[\sum_{i=0}^{MN_{D}} {N_{RN} \choose i} \times {(N_{RN}-i) + N_{RE} \choose N_{REF} - 2 \times i} \right]$$
 (2.7)

Salienta-se que reduções nos conjuntos de ramos, existentes e novos, candidatos a receber reforços podem ter grande impacto no número de combinações de soluções para o problema PES.

Para ilustrar a explosão combinatória e a utilização de reduções nos conjuntos de ramos candidatos, seja um sistema com a possibilidade de duplicação de circuitos em 50 ramos já existentes e criação de circuitos simples ou duplos em 500 novos ramos, todos na tensão de 138 kV. Se forem investigadas as adições simultâneas com até 5 reforços ($MN_{REF}=5$), tem-se, por meio da Equação (2.7), um total de 429.483.372.660 combinações ou opções para reforçar o sistema. Se considerarmos um tempo de 1 segundo para a execução de análise de fluxo de potência para cada configuração reforçada, seriam necessários, aproximadamente, 13.619 anos para a realização do estudo. Considere agora a obtenção de conjuntos reduzidos de ramos candidatos, os mais atrativos, formados por 10 ramos existentes e 100 ramos novos. Neste caso, o número total de combinações é de 150.519.182 e o tempo de análise de fluxo de potência necessário é de, aproximadamente, 5 anos, proporcionando uma redução aproximada de 99,97% no número total de configurações combinadas e no tempo de execução das análises de fluxo de potência.

Apesar do impacto altamente significativo decorrente da redução aplicada aos conjuntos de ramos candidatos, para um sistema deste porte o tempo de análise estimado ainda é absurdamente alto. Por esse motivo, nesta dissertação, além de se considerar a utilização de conjuntos reduzidos de ramos candidatos, são propostas metodologias para a realização da busca por boas alternativas de expansão, no "astronômico" espaço de soluções do problema PES.

2.4 – PERDAS ATIVAS NO PLANEJAMENTO DA SUBTRANSMISSÃO

As metodologias de planejamentos propostas nesta dissertação buscam privilegiar aspectos que são mais relevantes em sistemas de subtransmissão, os quais utilizam tensões menores que as tensões da rede básica e são compostos por malhas bem menos densas, com grande presença de porções radiais. Em função destas características os sistemas de subtransmissão apresentam perdas ôhmicas mais acentuadas que os sistemas de transmissão.

Conforme destacado na Seção 2.3, mesmo que reduções sejam aplicadas ao número de ramos novos e existentes que poderão receber reforços, a explosão combinatória do problema PES ainda permanece como um grande obstáculo. Diante deste quadro, para viabilizar o emprego de metodologias de busca por boas alternativas de expansão é necessário encontrar uma função de avaliação simples, de baixo custo computacional e que proporcione uma eficiente seletividade. Sabe-se que a avaliação de aspectos operativos como a confiabilidade, o perfil de tensão das barras ou o nível de carregamento dos circuitos demanda o uso de análises mais complexas e demoradas [S12] e [MSRS12]. No entanto, as perdas ôhmicas são pronta e precisamente fornecidas por programas de fluxo de potência com modelagem AC. Portanto, nesta dissertação, optou-se por incluir as perdas ativas na função objetivo do problema PES.

A fim de ilustrar os benefícios obtidos com a utilização das perdas ativas na função de busca de boas alternativas de expansão para os sistemas de subtransmissão, considere um sistema hipotético, o qual pode ser representado pelo equivalente da Figura 2.1.

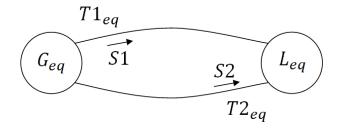


Figura 2.1: Equivalente hipotético de um sistema de subtransmissão.

Sendo:

- G_{eq} geração equivalente;
- L_{eq} carga equivalente;
- $T1_{eq}$ rede equivalente de subtransmissão 1, com resistência $R1_{eq}$;
- $T2_{eq}$ rede equivalente de subtransmissão 2, com resistência $R2_{eq}$;
- S1 fluxo de potência na rede equivalente de subtransmissão 1;
- S2 fluxo de potência na rede equivalente de subtransmissão 2;

Considerando $R1_{eq} = R2_{eq} = R$ pu (por unidade), e ainda, considerando as tensões iguais a 1,0 pu, pode-se afirmar que a situação ideal para a distribuição de fluxos deste sistema é $S1 = S2 = 0.5 \times S_{TOTAL}$. Para um fluxo total igual a 1,0 pu, tem-se S1 = S2 = 0.5 pu. Esta distribuição ideal dos fluxos resulta nas seguintes perdas para as redes equivalentes de subtransmissão 1 e 2:

$$Perda1 = R \times 0.5^2$$
 pu e $Perda2 = R \times 0.5^2$ pu

Então, a perda total será: $Perda_{TOTAL} = Perda1 + Perda1 = R \times 0.5$ pu.

Qualquer outra distribuição dos fluxos resultará em perdas maiores. Por exemplo, se $S1 = 0.7 \times S_{TOTAL}$ e $S2 = 0.3 \times S_{TOTAL}$, a perda total será $R \times 0.7^2 + R \times 0.3^2 = R \times 0.58^2$ pu. É fácil constatar que quanto maior for o desbalanço entre os fluxos, maiores serão as perdas totais do sistema.

Em síntese, conclui-se que a minimização das perdas produz sistemas de subtransmissão mais robustos e com maior capacidade para absorver o crescimento anual da demanda, além de permitir a redução de gastos com a geração de energia elétrica. Sob o foco do planejamento da operação e da expansão é possível destacar, ainda, os seguintes benefícios:

- obtenção de sistemas mais confiáveis haverá um melhor balanceamento na distribuição dos fluxos de potência entre os circuitos, produzindo uma maior "reserva de capacidade", a qual será útil para que a malha do sistema possa suportar eventuais contingências;
- redução/otimização de investimentos futuros em decorrência da maior robustez do sistema espera-se que o número/custo dos circuitos a serem adicionados em planejamentos futuros seja menor;
- postergação de investimentos em função da maior "reserva de capacidade",
 a malha de subtransmissão poderá acomodar o crescimento anual da carga,
 prescindindo da adição de algum(ns) reforço(s), em um determinado ano.

Por fim, cabe salientar que a alocação de suporte de reativos não faz parte do escopo deste estudo. Entretanto, espera-se que alternativas selecionadas pelo

aspecto de perdas ôhmicas apresentem benefícios também para outros aspectos operativos do sistema, como o nível de carregamento dos circuitos e o perfil de tensão das barras, o que torna o sistema menos dependente de serviços ancilares para o suporte de reativos.

2.5 - CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou as linhas de abordagem consideradas no problema de planejamento de sistemas de transmissão e ou subtransmissão, relacionadas à consideração de incertezas nos modelos, à interferência do planejador durante o processo de busca de alternativas de expansão, e à evolução temporal da adição de reforços.

Para a solução do problema de planejamento foram apresentados os conjuntos de ferramentas atualmente utilizados, que são capazes de determinar um grupo de planos de expansão que devem fazer parte de um processo de decisão onde o custo e o benefício serão adequadamente avaliados.

Para esta dissertação, o problema PES será tratado como um problema determinístico e estático, para um horizonte de planejamento de médio prazo (5 a 10 anos). Os algoritmos de solução do problema serão, de forma geral, automáticos, permitindo em alguns pontos a interferência do planejador, e utilizarão técnicas de otimização e um programa de fluxo de potência com modelagem AC.

Para ilustrar a explosão combinatória de soluções do problema PES, o cálculo do número de combinações de reforços foi apresentado, bem como um exemplo da redução de combinações de soluções obtida com a redução dos conjuntos de ramos candidatos à construção de reforços.

Por fim, foram apresentados neste capítulo os benefícios proporcionados com a consideração das perdas ôhmicas durante o processo de busca de boas alternativas de expansão para sistemas de subtransmissão.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA BASEADA EM METAHEURÍSTICA

3.1 – INTRODUÇÃO

Visando o desenvolvimento de ferramentas adaptadas às peculiaridades dos sistemas de subtransmissão, neste capítulo é proposta uma metodologia capaz de encontrar boas alternativas de reforços para o problema do PES. Estas alternativas consideram a duplicação de circuitos em Ramos Existentes (REs) ou a construção de novas LTs em Ramos Novos do sistema (RNs), podendo estes ramos receber circuitos simples ou duplos. Para obtenção das melhores alternativas de reforços, é utilizada neste capítulo uma técnica metaheurística que realiza o estudo de busca através de um conjunto reduzido de ramos candidatos que são obtidos a partir de um algoritmo heurístico baseado em uma estrutura em árvore.

Portanto, este capítulo apresenta uma descrição da técnica metaheurística utilizada e dos procedimentos propostos para a construção da metodologia proposta. Adicionalmente, são realizadas aplicações em sistemas reais da Cemig [CFU13], sendo os resultados obtidos detalhadamente analisados. Um processador Intel Core i7 de 2,93 GHz foi utilizado para simular as aplicações apresentadas neste capítulo. Para o cálculo das perdas ativas foi empregado Programa Anarede [C11].

3.2 – SELEÇÃO DOS CONJUNTOS DE RAMOS CANDIDATOS

A fim de atenuar a explosão combinatória das alternativas de reforço para a malha da subtransmissão, a obtenção de conjuntos reduzidos de ramos candidatos, tanto novos, quanto existentes (Conjunto de RNs e REs Candidatos), é considerada para a metodologia proposta neste capítulo. No entanto, é indispensável tomar muito cuidado na definição destes conjuntos, preocupando-se não apenas com o seus tamanhos, mas também com a atratividade dos ramos selecionados, para que não exista perda de qualidade das melhores alternativas encontradas ao final do processo.

Nesta seção são apresentados os procedimentos adotados para seleção dos Conjuntos de RNs e REs Candidatos.

3.2.1 - Seleção do Conjunto de RNs Candidatos

Para a identificação dos ramos mais atrativos, que irão compor os Conjuntos de RNs Candidatos, é utilizado um algoritmo heurístico, com base em uma pesquisa de árvore (partindo da Configuração Base e seguindo por configurações reforçadas, conforme Figura 3.1).

O algoritmo heurístico deve ser capaz de capturar a atratividade dos ramos em situações posteriores à adição do primeiro reforço à malha do sistema de subtransmissão. A ideia é ir selecionado ramos candidatos tanto para a Configuração Base do sistema, quanto para possíveis configurações com 1 reforço, 2 reforços, e assim por diante.

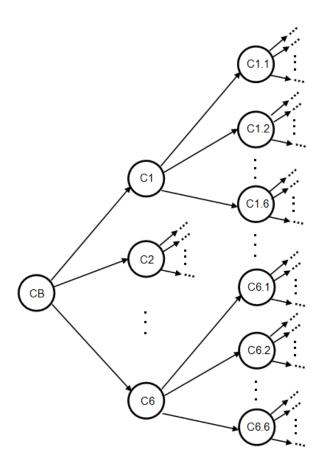


Figura 3.1: Árvore de configurações geradas pelo algoritmo heurístico construtivo.

A árvore da Figura 3.1 mostra em seu nó mais a esquerda, a Configuração Base (CB) do sistema (que ainda não possui adições de reforços). No primeiro nível à direita, pode-se observar as configurações com apenas um reforço (C1 a C6), obtidas a partir da adição à Configuração Base de reforços selecionados na busca.

Em seguida, no próximo nível, podem ser observadas as configurações contendo dois reforços partindo de cada nó anterior, com apenas um reforço (e.g., C1.1 a C1.6, partindo de C1, e C6.1 a C6.6, partindo de C6). Com base na Figura 3.1 podese facilmente extrapolar as novas ramificações (para 3 ou mais adições) da árvore de configurações reforçadas.

Para a identificação dos ramos mais promissores a serem adicionados a cada configuração de um determinado nível da árvore, ou seja, aqueles ramos que produzirão impactos mais significativos sobre os aspectos operacionais, dois índices de desempenho são utilizados (Ind_{θ} e Ind_{V}) [MSRS12] e [S12].

Índices de Desempenho

O primeiro índice (Ind_{θ}) considerado, definido pela Equação (3.1), está diretamente relacionado com a abertura angular ($\Delta\theta_{ik}$) apresentada pelas tensões das barras (i e k) de conexão do ramo.

$$Ind_{\theta} = \frac{\Delta \theta_{ik}}{\ln(L_{ik})} \tag{3.1}$$

De forma indireta, o índice considera o efeito da reatância da LT candidata (i.e., que pode ser adicionada ao ramo), bem como o custo de investimento, que será proporcional ao comprimento do ramo (L_{ik} , em km), qualquer que seja o nível de tensão. No entanto, é necessário aplicar o logaritmo para atenuar o impacto do comprimento (ou custo) do ramo sobre o valor do índice.

Para levar em conta o trajeto de uma LT candidata, no cálculo de seu comprimento (L_{ik}) , é utilizado um acréscimo de 20% ao valor calculado a partir dos dados geodésicos. Opcionalmente, o planejador poderá aplicar ajustes aos comprimentos obtidos, principalmente para as LTs candidatas que apresentarem boa classificação pelos índices propostos. Neste trabalho de dissertação são considerados apenas ramos formados por barras de conexão com tensão de 138 kV. Vale destacar que variações deste índice, que incluam, explicitamente, a reatância e o custo de investimento, podem ser utilizadas para considerar a possibilidade de interligação através de ramos com nível de tensão diferentes (e.g., interligando também barras de 69 kV).

Em função do maior acoplamento P- θ presente no problema de fluxo de potência, o índice Ind_{θ} irá apontar LTs candidatas com elevado potencial para a passagem de fluxos de potência ativa [S72]. Então, espera-se que tais LTs criem novas conexões capazes de redistribuir o fluxo de potência ativa no sistema, principalmente nas suas proximidades, com impactos que poderão ser significativos em todos os aspectos operativos considerados neste trabalho.

O segundo índice (Ind_V) , definido pela Equação (3.2), relaciona a diferença modular das tensões das barras de conexão do ramo (ΔV_{ik} , em %) com o logaritmo do seu comprimento (L_{ik} , em km).

$$Ind_V = \frac{\Delta V_{ik}}{\ln(L_{ik})} \tag{3.2}$$

O uso do logaritmo do comprimento para este índice segue as mesmas premissas do primeiro índice (Ind_{θ}) . Já o uso da diferença modular das tensões é inspirado no fato do acoplamento Q-V ser mais intenso que o acoplamento $Q\text{-}\theta$, em problemas de fluxo de potência [S72]. Portanto, as LTs candidatas com valores mais elevados do índice Ind_V poderão ter impactos positivos na redistribuição do fluxo de reativos, melhorando o perfil de tensão, o nível de carregamento dos circuitos e, por consequência, o montante de perdas. Também é válido esperar que tais LTs tenham impactos positivos na solução de problemas de tensão sob contingências, contribuindo ainda mais para a confiabilidade do sistema.

Algoritmo Heurístico Implementado

Para tornar mais claro o processo de seleção dos ramos que irão compor o Conjunto de RNs Candidatos, os passos do algoritmo heurístico implementado, baseado na estrutura de árvore, são apresentados a seguir. Vale destacar que, em uma fase inicial do algoritmo, são tomadas medidas para eliminar a presença de configurações reforçadas semelhantes, condição altamente prejudicial para o desempenho da metodologia, uma vez que reduz a amplitude da busca em árvore. Portanto, é necessário identificar a presença de ramos novos semelhantes (ou seja, que tenham a mesma barra terminal, sendo as segundas barras terminais interligadas e próximas, geralmente localizadas em um mesmo município). O critério

utilizado para escolha do ramo que será utilizado no algoritmo, dentre os ramos semelhantes identificados, é selecionar o ramo com a maior soma normalizada (i.e., em por unidade do maior valor dado pela soma) dos índices Ind_{θ} e Ind_{V} . Salientase, no entanto, que os ramos semelhantes não selecionados poderão ser recuperados ao final do processo de busca (realizado pela metaheurística ES). Para tal, basta que o ramo semelhante mantido faça parte de ao menos uma das melhores configurações obtidas e, ainda, que o ramo descartado proporcione um melhor resultado quando substituir o mantido.

Os passos principais do algoritmo são descritos a seguir:

- i) avaliar a Configuração Base do sistema de subtransmissão visando calcular os índices Ind_{θ} e Ind_{V} de todos os ramos (novos e existentes) com comprimento dentro da faixa estabelecida pelo planejador (e.g., 8-150 km);
- ii) eliminar a presença de ramos novos semelhantes, utilizando como critério a soma normalizada de Ind_{θ} e Ind_{V} para a escolha do ramo a ser mantido;
- iii) selecionar um conjunto reduzido (com tamanho definido pelo planejador, e.g., 6 ramos) de ramos novos e existentes, sendo metade dos ramos selecionados apontada pelo índice Ind_{θ} , enquanto que a outra metade é definida pelo índice Ind_{V} (maiores valores dos índices). Criar o primeiro nível (primeiro reforço) da árvore de configurações reforçadas. Definir o nível atual da árvore como primeiro. Armazenar, no Conjunto de RNs Candidatos, os ramos novos presentes no conjunto reduzido de ramos selecionados para a construção da árvore, assim como seus respectivos índices;
- iv) avaliar cada configuração do nível atual da árvore, a fim de calcular os respectivos valores de Ind_{θ} e Ind_{V} . Para cada avaliação, visando à construção do próximo nível da árvore, selecionar o mesmo número de ramos utilizado no passo (iii);
- v) identificar os RNs presentes dentre os ramos selecionados no passo (iv);
 eliminar as interseções entre estes RNs e aqueles presentes no Conjuntos de RNs Candidatos;

- vi) armazenar no Conjunto de RNs Candidatos os ramos não eliminados no passo (v), assim como seus respectivos índices. Para os ramos que já estavam armazenados, atualizar os índices Ind_{θ} e Ind_{V} de modo a sempre manter armazenado o maior valor encontrado;
- vii) incrementar o nível atual da árvore; se o nível máximo da árvore (i.e., número máximo de reforços) foi atingido, ir para o passo (ix); senão, seguir no passo (viii);
- viii) criar o nível atual da árvore de configurações e retornar ao passo (iv);
- ix) reduzir o Conjunto de RNs Candidatos (para conter, por exemplo, apenas 10 RNs), utilizando como critério os maiores índices Ind_{θ} e Ind_{V} , sendo metade dos RNs presentes no conjunto final (reduzido) indicada pelo Ind_{θ} e a outra metade apontada pelo Ind_{V} ;
- x) criar o nível final da árvore de configurações;
- xi) avaliar cada configuração do nível final da árvore e selecionar, com base no montante de perdas ativas, o Conjunto das Melhores Configurações (com tamanho a ser definido pelo planejador, e.g., 6 configurações);
- xii) comparar os RNs adicionados pelo Conjunto das Melhores Configurações com o Conjunto de RNs Candidatos, complementando este último conjunto caso exista um ou mais RNs que não façam parte do mesmo. Parar o algoritmo.

Cabe ressaltar que os passos finais do algoritmo, passos (x) a (xii), podem ampliar o número de ramos presentes no Conjunto de RNs Candidatos. Isto ocorrerá quando o conjunto obtido no passo (ix) não for capaz de produzir uma, ou mais, das melhores configurações presentes no nível final da árvore.

Adicionalmente, deve-se destacar que o algoritmo heurístico representa uma paralelização (com ramificações em árvore) do algoritmo sequencial para adição de reforços, proposto em [S12].

3.2.2 – Seleção do Conjunto de REs Candidatos

A adição de um segundo circuito em ramos existentes contendo circuito simples aumenta a complexidade do problema. Salienta-se, no entanto, que na grande maioria dos ramos este tipo de reforço não será atrativo. Portanto, apenas um conjunto reduzido de ramos existentes (Conjunto de REs Candidatos) deve ser considerado, o que ameniza o impacto na dimensão do espaço de soluções.

O critério adotado para a seleção do Conjunto de REs Candidatos é baseado no carregamento em pu da capacidade (S_{ik}) do circuito simples existente, dividido pelo logaritmo natural do comprimento $(\ln L_{ik})$ do respectivo ramo. Tem-se, então, um novo índice, de nome $Ind_{\mathcal{C}}$, dado pela Equação (3.3).

$$Ind_{\mathcal{C}} = \frac{S_{ik}}{\ln(L_{ik})} \tag{3.3}$$

O uso do logaritmo, assim como nos demais índices já apresentados, é necessário para suavizar o impacto do comprimento do ramo. Ainda assim, para evitar que um determinado ramo com baixo carregamento seja indevidamente escolhido (por ter um comprimento reduzido), apenas os ramos contendo circuito com carregamento (em pu de sua capacidade) superior a um limite estabelecido pelo planejador (e.g., 0,6 pu) serão considerados. O número de ramos existentes que poderão receber reforços deve ser cuidadosamente definido pelo planejador, que pode, ainda, estabelecer um limite mínimo para o comprimento dos ramos a serem selecionados.

Na identificação dos ramos mais atrativos para compor o Conjunto de REs Candidatos, os seguintes passos são utilizados:

- i) avaliar a Configuração Base do sistema e armazenar o índice Ind_C de cada um dos ramos existentes com comprimento dentro da faixa estabelecida (e.g., 8-150 km) e com carregamento superior ao estabelecido pelo planejador;
- ii) selecionar as melhores configurações (e.g., as 3 melhores) do nível final da árvore de expansão utilizada para obtenção do Conjunto de RNs Candidatos;
- iii) reconstruir, paulatinamente, cada configuração selecionada no passo (ii). A cada etapa de reconstrução (i.e., adição de um reforço), avaliar a configuração

intermediária obtida e atualizar, quando necessário, o índice $Ind_{\mathcal{C}}$ de modo a sempre manter armazenado o maior valor encontrado;

iv) selecionar o Conjunto de REs Candidatos (e.g., com 5 REs), o qual é formado com base nos maiores valores do índice $Ind_{\mathcal{C}}$ apresentados pelos REs.

3.3 – METAHEURÍSTICA ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO

Dentre as técnicas mais empregadas para a realização do processo de busca pela solução ótima, ou, ao menos, por um conjunto formado por boas opções de reforços, as metaheurísticas têm apresentado excelentes resultados, a um baixo custo computacional [LSMR08]. Após a definição dos Conjuntos de RNs e REs Candidatos que poderão receber reforços, de acordo com a Seção 3.2, nesta seção é apresentada a metaheurística escolhida para implementação da metodologia proposta. Em virtude de ser uma técnica robusta e com poucos parâmetros a serem ajustados, a metaheurística Estratégia de Evolução (*Evolution Strategies* – ES) foi a técnica indicada. Salienta-se, no entanto, que qualquer outra metaheurística pode ser empregada para a realização do processo de busca pelas melhores soluções.

O princípio básico da ES está na evolução de uma população de indivíduos (grupo de possíveis soluções). A cada geração, ou iteração, os indivíduos são avaliados através de uma função objetivo, e os melhores são selecionados para serem os pais da próxima geração. Este procedimento é repetido, geração após geração, até que o critério de parada seja atingido.

A representação de cada indivíduo (ou cromossomo) X^k , composto por n genes, é dada pelo vetor descrito na Equação (3.4), onde cada elemento X_i^k é uma variável inteira. Especificamente para o problema PES, cada elemento X_i^k é uma variável inteira, representando o número de reforços a serem adicionados ao correspondente ramo.

$$X^{k} = [X_{1}^{k}, X_{2}^{k}, \dots, X_{i}^{k}, \dots, X_{n}^{k}]$$
(3.4)

Geralmente, na ES, seleção, clonagem e mutação são mecanismos utilizados para simular a evolução. Esses três mecanismos são descritos a seguir:

Seleção

Os diversos modelos ES derivam do modelo geral (μ, k, λ, ρ) ES, cujos parâmetros têm os seguintes significados: μ é o número de progenitores numa geração; k corresponde ao número de gerações que um indivíduo sobrevive; λ indica o número de descendentes criados numa geração; e ρ é o número de progenitores de um indivíduo. Nesta dissertação é utilizado o modelo $(\mu + \lambda)$ ES. Portanto, k e ρ são feitos iguais a 1, e os novos μ progenitores são selecionados, com base em uma função de avaliação (ou função objetivo), do conjunto $\mu + \lambda$. Esta forma de seleção garante que, coletivamente, os indivíduos da geração futura nunca serão piores que seus progenitores.

Clonagem

Por meio deste mecanismo é realizada a clonagem dos μ progenitores da geração atual, dando origem aos λ indivíduos que, após passarem por mutações, formarão a população descendente. Nesta dissertação adotou-se $\lambda = \mu$.

Mutação

A mutação traz a diversidade para as populações, garantindo assim, que diferentes regiões, dentro do espaço de busca, sejam exploradas. No processo de mutação cada vetor (indivíduo clonado) X^k sofre uma perturbação pela adição de um vetor aleatório Z^k , criando um novo indivíduo \tilde{X}^k .

$$\tilde{X}^k = X^k + Z^k \tag{3.5}$$

Em que:

$$Z^{k} = \sigma[N_{1}(0,1), \dots, N_{j}(0,1), \dots, N_{n}(0,1)]$$
(3.6)

sendo $N_j(0,1)$ corresponde a uma distribuição gaussiana com média zero e variância unitária e σ é a *amplitude de mutação* ou *passo mutacional*.

Como pode ser observado, a perturbação Z^k é contínua. Portanto, uma função de arredondamento deve ser aplicada a cada um dos genes dos novos indivíduos conforme mostrado a seguir:

$$X_{i}^{k} = \begin{cases} 0, & se \ \tilde{X}_{i}^{k} < 0 \\ Round(\tilde{X}_{i}^{k}), & se \ \tilde{X}_{i}^{k} \in [0, N_{max}] \\ N_{max}, & se \ \tilde{X}_{i}^{k} > N_{max} \end{cases}$$
(3.7)

sendo $Round(\tilde{X}_i^k)$ uma função de arredondamento que retorna o número inteiro mais próximo do valor da variável real \tilde{X}_i^k e N_{max} é o máximo de reforços permitido no ramo.

A amplitude de mutação não precisa ser a mesma para todos os genes do indivíduo, podendo ser individualizada e, ainda, ficar sujeita à mutação e seleção, caracterizando o modelo ES auto-adaptativo. Este modelo segue os princípios de evolução e auto-adaptação, em que a variável *taxa de mutação* também fica sujeita aos mecanismos de clonagem, mutação e seleção. O processo auto-adaptativo tem o objetivo de encontrar o valor ótimo do parâmetro estratégico σ . Desta forma, se o processo conseguir selecionar bons σ , soluções ótimas locais de excelente qualidade poderão ser obtidas com menor custo computacional. Nas aplicações voltadas para o planejamento da expansão da transmissão o modelo não adaptativo tem apresentado melhor desempenho [LSMR08], [LSRM06] e [LRHM11], sendo também escolhido para a implementação realizada nesta dissertação.

Nas subseções a seguir são apresentados os detalhamentos considerados para construção da metodologia baseada na metaheurística Estratégia de Evolução, proposta para a obtenção de boas alternativas de reforços em sistemas de subtransmissão.

3.3.1 – Representação do Indivíduo

Conforme descrito pela Equação (3.4), cada indivíduo do ES é formado por um conjunto de genes (ramos onde é possível adicionar reforços). Portanto, ao se definir os Conjuntos de REs e RNs Candidatos, estabelece-se, também, o tamanho e o formato de cada indivíduo X^k , conforme o vetor apresentado a seguir:

$$X^{k} = \left[X_{1}^{k}, X_{2}^{k}, \dots, X_{nRE}^{k}, X_{nRE+1}^{k}, X_{nRE+2}^{k}, \dots, X_{nRE+nRN}^{k} \right]$$
(3.8)

em que nRE e nRN correspondem, respectivamente, aos tamanhos dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos.

Em geral, o número máximo de reforços que podem ser adicionados em cada ramo é maior para os ramos novos. Por exemplo, se a política da empresa é ter no máximo dois circuitos por ramo, tem-se que cada posição de X^k relativa a um ramo novo pode ser preenchida com "0", "1" ou "2". Já para a posição de X^k relativa a um ramo existente apenas "0" e "1" podem ser utilizados.

Salienta-se, no entanto, que a metodologia permite que o planejador estabeleça o número máximo de reforços que podem ser adicionados para cada gene/ramo.

3.3.2 – Função Objetivo

De maneira clássica, o problema de otimização a ser resolvido pode ser formulado pela Equação (3.9).

$$\min \{C_{inv} + C_{perdas}\}$$

$$s. a.$$

$$g(x,z) = 0$$

$$h(x,z) \le 0$$
(3.9)

Em que:

- C_{inv} é o custo de investimento;
- C_{perdas} é o valor presente do custo das perdas ativas anuais, ao longo do período de vida útil considerado (estimadas iguais às perdas do ano horizonte);
- g(x,z) = 0 são as restrições de igualdade do fluxo de potência;
- $h(x, z) \le 0$ são as restrições de desigualdade do fluxo de potência;
- x é o vetor de variáveis de estado:
- z é o vetor de variáveis de controle.

A solução da Equação (3.9) fornece o denominado mínimo custo global, dado pela menor soma dos custos de investimento e de perdas ativas. Trata-se de um problema não linear inteiro misto, com um número astronômico de alternativas de reforços a serem analisadas, para o qual este trabalho de dissertação adotou o desacoplamento em dois subproblemas: de investimento e de operação [S07]. Para a solução do subproblema operação utilizou-se um programa de análise de fluxo de

potência com modelagem AC. Com o uso deste programa as configurações produzidas pelo processo de busca são avaliadas, sendo obtido o montante de perdas, o qual é utilizado para o cálculo do custo anual das perdas ativas.

Para a solução do subproblema investimento é utilizada a metaheurística ES. Salienta-se que a obtenção do plano ótimo para o problema formulado pela Equação (3.9) é uma tarefa inviável para sistemas reais. Portanto, a metodologia proposta nesta dissertação, a qual é baseada em ES, tem por objetivo encontrar boas opções de reforços para o sistema de subtransmissão, as quais devem apresentar os menores somatórios para os custos de investimento e de perdas ativas (em valor presente). Ao mesmo tempo as restrições operativas dos equipamentos devem ser respeitadas. Com este propósito, utilizou-se para o subproblema investimento a função objetivo estabelecida pela Equação (3.10).

$$\min \left\{ C_{inv} + C_{perdas} + \alpha_{min} \times \Delta C_{inv-min} + \alpha_{max} \times \Delta C_{inv-max} \right\}$$
(3.10)

Em que:

- α_{min} é uma penalidade associada à violação do custo de investimento mínimo:
- ΔC_{inv-min} é a violação do custo de investimento mínimo (valor inferior da faixa de investimento definida pelo planejador);
- α_{max} é uma penalidade associada à violação do custo de investimento máximo:
- ΔC_{inv-max} é a violação do custo de investimento máximo (valor superior da faixa de investimento definida pelo planejador).

O uso das violações $\Delta C_{inv-min}$ e $\Delta C_{inv-max}$ na Equação (3.10) tem a finalidade de garantir que sejam encontradas soluções com um montante de investimento dentro de uma determinada faixa de investimento, a ser definida pelo planejador. Salienta-se que na fase inicial do planejamento (foco desta dissertação), tendo em vista o elevado custo computacional e/ou laboral de análises mais detalhadas, apenas as perdas ativas devem ser consideradas. Neste momento, os ganhos com a redução do custo anual de perdas podem não ser elevados o bastante para justificar os investimentos a serem realizados. No entanto, em fases posteriores do

planejamento, deve-se refinar o conjunto de alternativas de expansão visando encontrar soluções bem avaliadas também nos aspectos perdas ativas, confiabilidade, perfil de tensão e nível de carregamento dos circuitos, conforme realizado em [S12], [MSRS12] e [CFU13].

As penalidades α_{min} e α_{max} devem ser ajustadas para que durante o processo de busca, alternativas de reforços fora da faixa de investimento sejam visitadas, ampliando a capacidade da metaheurística de evitar o aprisionamento em mínimos locais. No entanto, à medida que o processo avança, o surgimento destas alternativas fica menos provável. Em geral, a população final não deve conter indivíduos que violem a faixa de investimento.

O custo de investimento relativo a cada alternativa de reforço (indivíduo X^k) é obtido pela Equação (3.11).

$$C_{inv}^{k} = \sum_{l=1}^{nRE+nRN} X_l^{k} \times \left(C_{LT}^{l} + 2 \times C_{Bay}\right)$$
(3.11)

Em que:

- C_{LT}^l é o custo de implantação, em R\$, do reforço definido para o ramo correspondente à posição l do indivíduo X^k, o qual é calculado em função do comprimento do ramo e também do tipo de reforço (se circuito simples ou duplo e custo do condutor);
- C_{Bay} é o custo de implantação, em R\$, da conexão de um circuito simples de 138 kV em cada subestação.

Salienta-se que o custo de uma dada LT é calculado a partir do comprimento do ramo (km) e do custo unitário de implantação (R\$/km), o qual varia discretamente (i.e., assume valores diferentes conforme a faixa de comprimento correspondente ao tamanho do ramo).

A parcela anual do custo de perdas ativas é obtida, para cada indivíduo X^k , considerando-se apenas os períodos de carga pesada, conforme Equação (3.12).

$$C_{perdas\ anuais}^{k} = P_{perdas}^{k} \times Dur \times 365(dias/ano) \times UC_{perdas}$$
 (3.12)

Em que:

- P_{perdas}^{k} é o montante de perdas ativas apresentado (via fluxo de potência) pela configuração do sistema referente ao indivíduo X^{k} , em MW;
- Dur é a duração do patamar de carga, em horas/dia;
- UC_{perdas} é o custo unitário de perda de energia, em R\$/MWh.

Obviamente, não considerar os demais períodos de carga representa uma grande redução do esforço computacional, pois são evitadas as análises para os respectivos patamares de carga. Existe, também, uma simplificação nos resultados. No entanto, entende-se que nos demais períodos de carga as perdas serão reduzidas (tão mais reduzidas quanto menor for o patamar da carga), apresentando pequenas variações entre as diferentes configurações. Portanto, as variações que seriam produzidas na função objetivo (3.10), ao se considerar os demais períodos de carga, pouco ou nada impactariam no resultado/classificação da população analisada. Vale destacar que a metodologia pode ser alterada para considerar vários patamares de carga. Porém, a relação entre o ganho na precisão da análise das perdas ativas e a ampliação do esforço humano e computacional, torna esta iniciativa desaconselhável e desnecessária.

3.3.3 – População Inicial Inteligente

O conceito de população inicial inteligente, [LSMR08] e [LSRM06], será utilizado. Portanto, metade da população inicial será gerada de forma aleatória, enquanto a outra metade, denominada de metade orientada, será obtida por meio de heurísticas visando a composição de indivíduos factíveis de razoável qualidade.

Salienta-se que todos os indivíduos da população inicial são formados a partir de um indivíduo base, com investimento nulo, contendo, portanto, todos os seus genes preenchidos com o valor 0 (i.e., sem reforços).

Inicialmente devem ser definidos os Conjuntos de REs e RNs Candidatos, com nRE e nRN ramos, respectivamente. De acordo com a Equação (3.8), e adotando-se a política de ter no máximo dois circuitos por ramo, os nRE primeiros componentes/genes do indivíduo X^k (REs Candidatos) podem receber os valores 0

ou 1. Já os nRN últimos genes (RNs Candidatos) podem assumir os valores 0,1 ou 2. Com as dimensões e características do indivíduo definidas, a população inicial, formada por nIND indivíduos, já pode ser criada.

Metade Aleatória

Os indivíduos que irão pertencer à metade aleatória da população inicial são criados a partir de um passo básico destinado ao sorteio do gene que irá receber o reforço. Neste passo é gerado um número pseudoaleatório com distribuição Uniforme (0 - nRE + nRN), o qual é convertido para um número inteiro entre 1 e nRE + nRN, correspondente ao gene que irá receber o reforço (i.e., ter seu valor acrescido de 1), sem ultrapassar a sua dimensão (1 para RE e 2 para RN).

Este passo básico deve ser repetido enquanto o custo de investimento do indivíduo permanecer inferior a um determinado valor, definido como Investimento Mínimo da População Aleatória (IMPA). Para permitir uma variabilidade nos montantes investidos pelos indivíduos da população aleatória, será utilizado um valor pseudoaleatório para o IMPA, uniformemente distribuído no intervalo (0,5 - 1,5) vezes o valor do limite inferior da faixa de investimento definida pelo planejador.

Metade Orientada

Para criar os indivíduos que farão parte da metade orientada é necessário obter as distribuições de probabilidade: (i) do índice $Ind_{\mathcal{C}}$, para os REs; e (ii) da soma normalizada dos índices Ind_{θ} e Ind_{V} , para os RNs. Em sequência são cumpridos os dois passos básicos descritos a seguir:

- a) Sorteio do conjunto ao qual pertence o gene que irá receber um reforço gera-se um número pseudoaleatório com distribuição Uniforme (0 1); se o número gerado for menor que $\left(\frac{nRE}{nRE+nRN}\right)$, um gene do Conjunto de REs irá receber o reforço, senão o reforço será adicionado a um gene referente ao Conjunto de RNs;
- b) Sorteio do gene que irá receber o reforço gera-se um numero pseudoaleatório com distribuição Uniforme (0 1); com base na

correspondente distribuição de probabilidade (do índice $Ind_{\mathcal{C}}$, para o gene de um RE, ou da soma normalizada dos índices Ind_{θ} e Ind_{V} , para o gene de um RN) determina-se qual gene irá receber o reforço (i.e., ter seu valor acrescido de 1), sem ultrapassar a sua dimensão (1 para RE e 2 para RN).

Estes passos devem ser repetidos enquanto o custo de investimento do indivíduo permanecer inferior a um determinado valor, definido como Investimento Mínimo da População Orientada (IMPO). Para permitir uma variabilidade nos montantes investidos pelos indivíduos da população orientada (neste caso, um pouco menor que a variabilidade da população aleatória), será utilizado um valor pseudoaleatório para o IMPO, uniformemente distribuído no intervalo (0,75 - 1,25) vezes o valor do limite inferior da faixa de investimento definida pelo planejador.

3.3.4 - Critério de Parada

Para que se possa delimitar o processo de busca é utilizado um número máximo de gerações/iterações (NG_{MAX}) que podem ser realizadas.

Adicionalmente, é aconselhável adotar um número máximo de gerações consecutivas (NGC_{MAX}) sem que haja alteração da melhor solução corrente (melhor indivíduo de cada população).

3.3.5 - Algoritmo da Metodologia Baseada na Metaheurística ES

Visando tornar mais claro o conjunto de procedimentos empregados pela metodologia baseada na metaheurística Estratégia de Evolução, esta subseção descreve os principais passos necessários para a obtenção de boas opções de reforços para o sistema de subtransmissão, tendo em vista os aspectos operativos considerados.

Tendo selecionado os Conjuntos de REs e RNs Candidatos, de acordo com a Seção 3.2, o algoritmo baseado na metaheurística ES, proposto nesta dissertação, possui os seguintes passos:

- i) definir os parâmetros da ES (tamanho da população, número de iterações, amplitude de mutação, etc.), assim como o critério de parada para o processo de busca;
- ii) definir o indivíduo, cujos genes recebem os Conjuntos de REs e RNs Candidatos;
- iii) criar a População Inicial Inteligente, conforme Subseção 3.3.3;
- iv) aplicar seguidamente os mecanismos de clonagem, mutação e seleção dos melhores indivíduos até que o critério de parada do processo de busca seja atingido;
- v) selecionar dentre os indivíduos da população final as melhores Configurações
 Candidatas, as quais poderão ser avaliadas em termos de outros aspectos operativos em uma fase posterior do planejamento;
- vi) para cada Configuração Candidata selecionada no passo anterior, gerar e avaliar eventuais configurações semelhantes, ficando a critério do planejador proceder, ou não, a troca de configurações.

3.4 – APLICAÇÕES E RESULTADOS

Esta seção tem por objetivo verificar o desempenho da metodologia proposta neste capítulo. Inicialmente, a fim de ajustar o funcionamento da metodologia, é realizada a aplicação em um sistema de subtransmissão de médio porte constituído de algumas barras da área Leste do sistema Cemig, denominado nesta dissertação como Sistema Leste Cemig (SL).

Posteriormente, a fim de verificar a robustez da metodologia, é realizado um estudo da aplicação da metodologia a um sistema de maior porte, que envolve mais que uma área de subtransmissão, composto por barras pertencentes às áreas Centro, Leste e Norte do sistema Cemig, denominado neste estudo como Sistema Leste Centro Norte Cemig (SLCN).

Todas as rotinas da metodologia proposta neste capítulo, incluindo a metaheurística ES, foram desenvolvidas no Programa Scilab [S14]. As análises de fluxo de potência AC são realizadas de forma automática pelas rotinas da metodologia proposta. Os resultados obtidos são detalhadamente analisados.

3.4.1 – Considerações Gerais das Aplicações

De forma geral, nesta subseção, são apresentados os parâmetros e procedimentos adotados nas aplicações realizadas com a metodologia proposta neste capítulo, tanto para o sistema de médio porte (SL), quanto para o sistema que envolve mais que uma área de subtransmissão (SLCN). Os parâmetros foram ajustados como segue:

- i) período de vida útil dos equipamentos igual a 30 anos;
- ii) taxa de remuneração do capital de 7,5% ao ano;
- iii) duração do patamar de carga de 4 horas/dia (Dur = 4 para Equação (3.12));
- iv) custo unitário das perdas ativas igual a 136 reais por MWh;
- v) uso do cabo Grosbeak quando ao menos uma das barras terminais for de conexão com a rede básica, tanto para LT de circuito simples quanto duplo;
- vi) uso do cabo Linnet quando nenhuma das barras terminais for de conexão com a rede básica, tanto para LT de circuito simples quanto duplo;
- vii) custo do Bay igual a R\$1.665.419,00 (por subestação);
- viii) carregamento (em pu da capacidade do circuito) mínimo para ramos existentes, com circuito simples, igual a 0,6 pu;
- ix) comprimento máximo para ramos existentes e novos igual a 150 km;
- x) comprimento mínimo para ramos novos igual a 8 km;
- xi) distância máxima entre as subestações (SEs) para identificação de ramos novos semelhantes igual a 8 km;

- xii) critério de parada: número máximo de gerações (NG_{MAX}) igual a 300 e número máximo de gerações consecutivas sem alteração da melhor solução (NGC_{MAX}) igual a 40;
- xiii) penalidades associadas às violações do custo de investimento (α_{min} e α_{max}): α_{max} = 1 e α_{min} iniciada com o valor 1 e crescendo com o decorrer do processo de busca, conforme a expressão α_{min} = α_{min} + 0,05.

Os custos dos cabos considerados para a construção das LTs no estudo desta dissertação apresentam valor variando por faixa de comprimento, conforme apresentado na Tabela 3.1 a seguir.

Cabo Grosbeak **Cabo Linnet** Faixa de Circ. Simples Circ. Duplo Circ. Simples Circ. Duplo Comprimento (R\$/km) (R\$/km) (R\$/km) (R\$/km) 579.381,00 654.271,00 < 1 km 832.839,00 533.287,00 ≥ 1 km e < 10 km 449.118,00 379.113,00 569.274,00 338.649,00 ≥ 10 km e < 20 km 319.764,00 499.493,00 277.106,00 388.036,00 ≥ 20 km 293.276,00 454.733,00 249.843,00 337.504,00

Tabela 3.1: Custos das LTs de acordo com os cabos considerados.

Os valores de impedância e susceptância, por quilômetro, dos cabos utilizados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Impedância e susceptância dos cabos que compõem as LTs.

Parâmetro	Cabo Grosbeak (pu/km)	Cabo Linnet (pu/km)		
Resistência por km	0,05309	0,09977		
Reatância por km	0,24422	0,25887		
Susceptância por km	0,06732	0,06353		

Para todas as aplicações, na obtenção dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos, foram utilizados os passos apresentados na Seção 3.2. Com estes conjuntos definidos, foi utilizada a metodologia da Seção 3.3 para realizar a busca de boas alternativas de expansão do sistema de subtransmissão, com todas as rotinas implementadas no Programa Scilab.

Na metodologia baseada na metaheurística Estratégia de Evolução, de acordo com o algoritmo apresentado na Subseção 3.3.5, após a definição dos parâmetros da ES e dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos (que permite definir as características do indivíduo), é criada a População Inicial Inteligente, com dimensão nIND, definida pelo usuário. Metade dos indivíduos dessa população é criada de forma aleatória e a outra metade obtida por meio de heurísticas visando a composição de indivíduos factíveis de razoável qualidade, conforme Subseção 3.3.3. Para cada indivíduo X^k criado é calculado o custo de investimento C^k_{inv} , conforme Equação (3.11).

A cada geração de um novo indivíduo para compor a população inicial, é realizada uma verificação da existência de um indivíduo repetido dentro da população, e, em caso afirmativo, este último indivíduo gerado é descartado, sendo realizada a geração de um novo indivíduo.

Concluída a geração da população inicial, para cada indivíduo, é criada de forma automática pela rotina desenvolvida a correspondente configuração de reforço para o sistema, a qual é avaliada em termos de fluxo de potência. Terminada a execução das configurações, a partir dos resultados do fluxo de potência, o montante de perdas do sistema para cada indivíduo/configuração é calculado pela rotina.

Em seguida, a rotina calcula, a partir da Equação (3.12), a parcela anual do custo de perdas ativas (em períodos de carga pesada) para todas as configurações avaliadas. Por fim, o valor presente do custo de perdas ativas deve ser obtido para o período de vida útil considerado. Para tal, as perdas ativas anuais ao longo do período de vida útil considerado são estimadas iguais às perdas do ano horizonte.

Com a população inicial gerada, e, ainda, conhecidos os custos (C_{inv}^k e C_{perdas}^k) e as possíveis violações de custos de investimento ($\Delta C_{inv-min}$ e $\Delta C_{inv-max}$) de cada indivíduo da população, os procedimentos para evolução da população são realizados de acordo com os conceitos apresentados na Seção 3.3.

Para a geração de uma nova população, a população anterior é clonada e o mecanismo de mutação é aplicado aos indivíduos da população obtida. Para a mutação de cada indivíduo da população, é gerado um vetor aleatório, de acordo com a Equação (3.6), o qual é somado a esse indivíduo, em concordância com a

Equação (3.5). Em seguida, a cada gene do indivíduo é aplicada a função de arredondamento da Equação (3.7).

Após a execução dos procedimentos anteriores, é realizada a leitura de cada indivíduo da nova população para identificação dos respectivos reforços, a fim de calcular o custo de investimento de cada indivíduo X^k , pela Equação (3.11), assim como possíveis violações de investimento ($\Delta C_{inv-min}$ e $\Delta C_{inv-max}$).

Assim como realizado para a população inicial, para cada indivíduo da nova população é criada a correspondente configuração de reforço, a qual é avaliada em termos de fluxo de potência, de modo a obter-se o respectivo montante de perdas ativas. Com as perdas ativas obtidas para cada indivíduo/configuração, o valor presente do custo de perdas é calculado e a função objetivo é avaliada, de acordo com a Subseção 3.3.2.

Posteriormente, é realizada a seleção dos *nIND* indivíduos, dentre a população anterior e a nova população (obtida pelos mecanismos de clonagem e mutação).

Por fim, algumas configurações são selecionadas para avaliação das configurações semelhantes, de acordo com o passo (vi) do algoritmo da metodologia proposta (Subseção 3.3.5).

3.4.2 - Sistema Leste Cemig - SL

O Sistema Leste Cemig contém uma representação detalhada da área Leste da Cemig, além de toda a rede básica do sistema brasileiro. O sistema completo possui 4.998 barras, sendo 742 barras de geração (incluindo pequenas centrais hidrelétricas e produtores independentes), e 7.061 circuitos, dos quais, 4.387 são linhas de transmissão e 2.674 são transformadores. A carga total deste sistema atinge o montante de 71.610 MW.

Especificamente em relação à área Leste da Cemig, o sistema tem 285 barras dentre as quais 9 barras são de geração (excluídas as PCHs), perfazendo uma capacidade instalada de 645 MW. Além disto, a rede da área Leste possui 311 circuitos sendo que destes circuitos, 27 são linhas de transmissão de 138 kV.

Do total de 26 barras de 138 kV pertencentes à área Leste Cemig, 21 foram consideradas como barras de interesse no estudo da metodologia proposta, compondo a área a ser planejada do SL. Para maior clareza, a Figura 3.2 apresenta um diagrama simplificado da rede a ser planejada, contendo as barras de interesse de 138 kV e os 22 circuitos existentes que fazem as conexões entre essas barras.

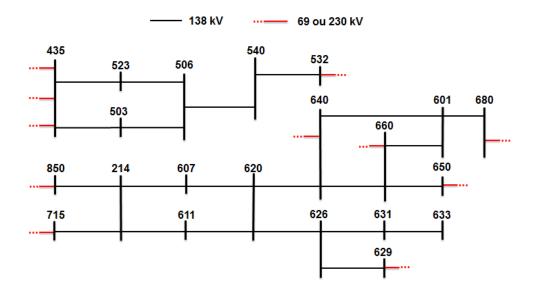


Figura 3.2: Diagrama da área de interesse do Sistema Leste Cemig (SL).

Nas subseções a seguir são apresentados os procedimentos e resultados obtidos nos testes realizados com o SL, a fim de ajustar os parâmetros da Metodologia Metaheurística Estratégia de Evolução.

3.4.2.1 – Seleção dos Conjuntos de Ramos Candidatos – SL

Para obtenção dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos para o estudo do Sistema Leste Cemig, foram utilizados os procedimentos apresentados na Seção 3.2 desta dissertação.

Em concordância com os passos (i) e (ii) do algoritmo para seleção do Conjuntos RNs Candidatos (Subseção 3.2.1), 34 RNs não semelhantes e que possuem comprimento dentro dos limites de mínimo e de máximo especificados foram identificados. De acordo com o passo (ix) deste algoritmo, foram selecionados 10 RNs e, ainda, foram selecionados outros 2 RNs de acordo com os passos de (x) a (xii) do algoritmo. Portanto, 12 RNs (nRN) foram selecionados para compor o

Conjunto de RNs Candidatos. Foram identificados 5 REs que possuem comprimento dentro dos limites de mínimo e máximo e carregamento mínimo especificados, de acordo com os procedimentos para seleção REs Candidatos (Subseção 3.2.2). Todos estes 5 REs (nRE) foram selecionados para compor o Conjunto de REs Candidatos.

No total, foram gastos aproximadamente 12 minutos para seleção dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos.

3.4.2.2 – Aplicação da Metodologia Baseada em Metaheurística – SL

Com o intuito de se obter soluções de referência para validação dos resultados encontrados pela metodologia proposta, inicialmente foi realizada uma busca exaustiva por todas as combinações de soluções para o Sistema Leste Cemig, formadas por um número menor ou igual a 6 reforços (i.e., $MN_{REF}=6$), utilizando os Conjuntos de REs e RNs Candidatos obtidos na Subseção 3.4.2.1. Esta análise permite encontrar a solução ótima, ou seja, a configuração que apresenta o menor somatório para os custos de investimento e de perdas, respeitada a faixa de investimento definida pelo planejador.

Para análise das combinações de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 reforços, foram avaliadas, respectivamente, 17, 148, 872, 3.886, 13.898 e 41.366 configurações, de acordo com a Equação (2.6). Conforme a Equação (2.7), o número total de combinações obtidas foi de 60.187. Para obtenção dessas configurações reforçadas utilizando a busca exaustiva, foram gastos aproximadamente 21 horas e 53 minutos. Vale destacar que essa busca se torna computacionalmente possível (mesmo com o tempo computacional elevado) dada a dimensão da área de interesse do sistema SL, a qual, além de possuir um número reduzido de ramos candidatos, necessita de um número menor de reforços para solução do PES.

Para a definição da faixa de investimento foram adotados os valores de 100 milhões de reais para o limite inferior e de 120 milhões de reais para o limite superior do custo de investimento. Além disso, durante a simulação, uma tolerância de 2% foi adotada para a violação destes valores.

Na Tabela 3.3, estão presentes os valores de custo de investimento, custo de perdas, custo global ($C_{inv} + C_{perdas}$), número de reforços e valores de perdas ôhmicas para a Configuração Base do sistema e para as 10 melhores soluções em termos de custo global para combinações de 1 a 6 reforços. Essas configurações foram obtidas na busca exaustiva para o SL e não violam mais que 2% dos limites de investimento considerados. O custo de investimento (C_{inv}) foi calculado utilizando-se a Equação (3.11). Já o valor presente do custo de perdas (C_{perdas}) é obtido, para o período de vida útil dos equipamentos, considerando-se o custo anual de perdas dado pela Equação (3.12).

Tabela 3.3: Melhores Combinações em termos de custo global para o SL.

Configuração/ Combinação	C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Perdas (MW)
Base	00,00	66,83	66,83	0	28,5
Comb_G1	98,47	41,98	140,45	4	17,9
Comb_G2	100,03	40,57	140,60	3	17,3
Comb_G3	100,09	41,27	141,36	4	17,6
Comb_G4	100,56	40,80	141,37	4	17,4
Comb_G5	100,15	41,51	141,66	3	17,7
Comb_G6	98,14	43,85	141,99	3	18,7
Comb_G7	98,86	43,15	142,01	4	18,4
Comb_G8	100,82	41,51	142,33	4	17,7
Comb_G9	98,04	44,56	142,60	5	19,0
Comb_G10	98,73	44,32	143,06	4	18,9

De acordo com a Tabela 3.3, percebe-se que existem apenas combinações com 3, 4 e 5 reforços entre as 10 melhores configurações reforçadas para o sistema SL, com os limites de investimento considerados. Percebe-se, ainda, que nenhuma configuração com seis reforços está entre as 10 melhores. Portanto, pode-se concluir que é praticamente improvável que alguma combinação contendo 7 ou mais reforços alcance desempenho superior (custo global inferior) ao apresentado por qualquer uma das combinações da Tabela 3.3.

Ainda na Tabela 3.3, observa-se que todas as soluções identificadas possuem a faixa de investimento próxima ao limite inferior, dada a consideração direta do custo de investimento na função objetivo. Apenas as combinações Comb_G1, Comb_G6, Comb_G7, Comb_G9 e Comb_G10 violaram o limite inferior da faixa de investimento

considerado (100 milhões de reais), sendo que a maior violação corresponde a 1,96%. Entende-se que estas soluções devem ser consideradas como pertencentes à faixa de investimento definida pelo planejador, pois apresentam pequenas violações residuais (inferiores a 2%).

A partir dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos fica definido o indivíduo da ES, composto por nRE + nRN = 17 genes, de acordo com a Equação (3.8), sendo os nRE primeiros correspondentes aos REs Candidatos (nRE = 5), podendo receber os valores 0 ou 1, e os nRN últimos correspondentes aos RNs Candidatos (nRN = 12), podendo assumir os valores 0, 1 ou 2.

A fim de ajustar o valor do passo mutacional (σ) e o número de indivíduos da população (nIND), utilizados pelo algoritmo ES, foram avaliados todos os pares obtidos com σ variando entre 0,3, 0,4 e 0,5 e utilizando-se populações com 30, 40 e 50 indivíduos. Para cada um dos pares de parâmetros obtidos o algoritmo de busca baseado na metaheurística ES foi executado 10 vezes. De posse dos resultados obtidos foi realizado um estudo estatístico visando avaliar a influência do passo mutacional e do tamanho da população não apenas na melhor solução obtida em cada simulação, mas também no conjunto das melhores soluções encontradas.

A seguir, com o intuito de apresentar os resultados e como estes são analisados nas avaliações consideradas nesta subseção, são exibidos os resultados e as análises de forma detalhada para o primeiro teste considerando $\sigma = 0.3$ e nIND = 30. Em seguida, são apresentados os resultados e análises de uma forma mais resumida para todas as 9 combinações de parâmetros considerados. Após a definição do par de parâmetros que permite o melhor ajuste para a metodologia quando aplicada ao SL, os respectivos resultados são detalhadamente apresentados e analisados.

Adicionalmente, a fim de verificar o desempenho da metodologia proposta neste capítulo quando não se considera o custo de investimento diretamente na função objetivo, ou seja, minimizando apenas o custo de perdas (mas ainda considerando as restrições do problema), é realizada a aplicação da metodologia ao sistema SL considerando o par de parâmetros definidos com os testes anteriores. Os resultados

provenientes desta aplicação são também apresentados e analisados nesta subseção.

Minimização do Custo Global

Para um passo mutacional $\sigma=0.3$ e populações com nIND=30, o menor custo global obtido em cada uma das execuções da rotina da metodologia baseada na metaheurística Estratégia de Evolução está presente na Tabela 3.4. A coluna "Execução" contém os números das execuções em que uma determinada solução, com seu respectivo custo global, foi encontrada. A coluna "Populações" informa o número de populações analisadas em cada simulação. Na coluna "Combinação" é feita uma referência às combinações apresentadas na Tabela 3.3, das melhores soluções obtidas pela busca exaustiva. O tempo médio gasto em cada execução foi de 50 minutos aproximadamente. Um número médio de 89 gerações foi necessário para a evolução da busca até atender ao critério de parada estabelecido.

Tabela 3.4: Melhores soluções por custo global (σ = 0,3 e nIND = 30) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} Custo Globate (R\$ × 10 6) (R\$ × 10 6)		Execução	Populações	Combinação
100,09	41,27	141,36	3 e 9	128 e 79	Comb_G3
100,15	41,51	141,66	2 e 8	72 e 73	Comb_G5
98,14	43,85	141,99	1	102	Comb_G6
98,04	44,56	142,60	5 e 7	80 e 89	Comb_G9
104,63	38,46	143,09	4 e 6	85 e 92	-
102,44	43,15	145,59	10	85	-

Para este teste, nenhuma das execuções encontrou a solução ótima (Comb_G1). Os melhores indivíduos identificados por 7 das 10 execuções encontraram soluções que estão entre as 10 melhores da Tabela 3.3.

A Tabela 3.5 apresenta os 10 melhores indivíduos encontrados ao longo das 10 execuções da metaheurística ES (utilizando uma semente inicial diferente para cada execução). Percebe-se, na Tabela 3.5, que 6 das melhores combinações de reforços estão entre as 10 melhores soluções encontradas pela metaheurística ES.

Tabela 3.5: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo
global (σ = 0,3 e $nIND$ = 30) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Combinação
100,09	41,27	141,36	3	2	Comb_G3
100,15	41,51	141,66	3	2	Comb_G5
98,14	43,85	141,99	3	2	Comb_G6
100,82	41,51	142,33	4	3	Comb_G8
98,04	44,56	142,60	4	3	Comb_G9
98,73	44,32	143,06	4	2	Comb_G10
104,63	38,46	143,09	3	3	-
98,78	44,79	143,57	5	1	-
98,86	44,79	143,65	4	3	-
99,60	44,32	143,92	4	1	-

A Tabela 3.6 apresenta, para cada uma das simulações realizadas com σ = 0,3 e nIND = 30, os desvios percentuais dos custos globais dos 6 melhores indivíduos encontrados em cada execução da metodologia em relação ao correspondente melhor indivíduo. Na última linha são apresentados os valores médios dos desvios para cada execução.

Tabela 3.6: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,3 e nIND = 30) – Sistema SL.

Indivíduo	Desvio Percentual										
maividuo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10	
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
2	0,2373	1,4096	0,4483	0,8943	0,3188	0,3963	0,6807	1,9848	0,6866	0,7324	
3	0,7478	1,7865	0,6866	1,6307	0,3392	0,8943	1,2365	2,1353	1,8123	0,7902	
4	1,6019	2,2014	0,8778	1,6384	1,4578	1,0841	1,9754	2,2014	1,9989	2,0434	
5	1,6695	2,2654	1,6212	1,9437	1,9754	1,6307	2,0943	2,2654	2,0574	2,4912	
6	1,8608	2,6564	2,1252	1,9891	2,2895	2,4769	2,2137	2,5179	2,1976	2,7547	
Média	1,0195	1,7199	0,9599	1,3493	1,0635	1,0804	1,3668	1,8508	1,4588	1,4686	

Na Tabela 3.7, estão presentes os desvios percentuais dos custos globais obtidos pelos 6 melhores indivíduos encontrados em cada uma das 10 execuções, em relação ao custo global de 141,36 milhões de reais, obtido para a melhor solução geral, que foi identificada neste teste, pelas execuções 3 e 9. Também nesta tabela,

na última linha, são apresentados os valores médios dos desvios para cada execução da metodologia.

Tabela 3.7: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,3 e nIND = 30) – Sistema SL.

Indivíduo	Desvio Percentual										
maividuo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10	
1	0,4483	0,2087	0,0000	1,2201	0,8778	1,2201	0,8778	0,2087	0,0000	2,9905	
2	0,6866	1,6212	0,4483	2,1252	1,1994	1,6212	1,5645	2,1976	0,6866	3,7448	
3	1,1994	1,9989	0,6866	2,8706	1,2201	2,1252	2,1252	2,3484	1,8123	3,8043	
4	2,0574	2,4147	0,8778	2,8784	2,3484	2,3174	2,8706	2,4147	1,9989	5,0950	
5	2,1252	2,4787	1,6212	3,1875	2,8706	2,8706	2,9905	2,4787	2,0574	5,5562	
6	2,3174	2,8706	2,1252	3,2334	3,1875	3,7272	3,1110	2,7318	2,1976	5,8276	
Média	1,4724	1,9321	0,9599	2,5859	1,9506	2,3136	2,2566	2,0633	1,4588	4,5031	

O valor do desvio percentual médio entre os custos globais dos 6 primeiros indivíduos de todas as execuções e o custo global do melhor indivíduo geral (Desvio Médio Percentual Coletivo) é de 2,1496. E o desvio percentual apresentado pelo melhor indivíduo de cada execução (Desvio Médio Percentual Individual) em relação ao melhor indivíduo geral vale 0,8052.

Os resultados encontrados para cada par de parâmetros considerado estão apresentados, de forma resumida, na Tabela 3.8. Nas colunas "Tempo Médio de Execução" e "Número Médio de Gerações" estão apresentados, respectivamente, o valor aproximado do tempo médio gasto em cada execução e o número médio de gerações necessárias para atingir o critério de parada, para cada par de parâmetros. Na coluna "Combinações Encontradas" é apresentado, para cada par de parâmetros considerado, o número de indivíduos visitados pela metaheurística ES que estão entre as 10 melhores soluções encontradas pela busca exaustiva (Tabela 3.3). Finalmente, nas duas últimas colunas estão presentes o Desvio Médio Percentual Coletivo e o Desvio Médio Percentual Individual, para cada um dos pares de parâmetros.

De acordo com os resultados da Tabela 3.8, concluiu-se que o par de parâmetros σ = 0,5 e nIND = 40 apresentou o menor valor para o Desvio Percentual Individual e o par de parâmetros σ = 0,4 e nIND = 50 apresentou o menor valor para o Desvio

Percentual Coletivo. Estes dois pares de parâmetros, durantes as 10 execuções da rotina ES, selecionaram as 10 soluções ótimas para o problema. Entretanto, os Desvios Percentuais Coletivos apresentados pelos dois pares possuem valores bem próximos, enquanto que o Desvio Percentual Individual apresentado pelo par $\sigma=0,5$ e nIND=40 é menor que a metade do Desvio Individual para $\sigma=0,4$ e nIND=50. Vale também destacar que o par $\sigma=0,5$ e nIND=40 apresentou valores menores para o tempo médio de execução e o número médio de gerações. Portanto, pode-se afirmar que este par de parâmetros permite uma maior eficiência da metodologia baseada em ES, quando aplicada ao Sistema SL. A seguir, os resultados obtidos com a utilização deste par de parâmetros são detalhadamente apresentados e analisados.

Tabela 3.8: Resultados para combinações dos parâmetros σ e nIND – Sistema SL.

Número de Indivíduos	Passo Mutacional	Tempo Médio de	Número Médio de	Combinações	Desvio Percentual		
nIND	σ	Execução (minutos)	Gerações	Encontradas	Individual	Coletivo	
30	0,3	50	89	6	0,8052	2,1496	
30	0,4	67	117	9	0,6362	1,7557	
30	0,5	64	113	10	0,5884	1,7687	
40	0,3	70	95	8	0,6484	2,1056	
40	0,4	75	103	10	0,6468	1,5482	
40	0,5	78	98	10	0,1510	1,3047	
50	0,3	94	98	10	0,3686	1,5302	
50	0,4	96	100	10	0,3348	1,1403	
50	0,5	100	104	10	0,4616	1,2518	

Os resultados presentes na Tabela 3.8, permitem observar ainda, que a metodologia baseada na metaheurística ES proposta neste capítulo é muito robusta, com sensibilidade muito baixa em relação à variação de seus parâmetros.

Na Tabela 3.9, é apresentado o menor custo global obtido em cada uma das execuções da rotina ES, quando se considera $\sigma = 0.5$ e nIND = 40. Os números das execuções em que uma determinada solução foi encontrada, com seu respectivo custo global, e o número de populações analisadas em cada simulação são também apresentados nesta tabela. O tempo médio gasto em cada execução da rotina foi de 78 minutos e um número médio de 98 gerações foi necessário para a evolução da

busca até atender ao critério de parada estabelecido, como já apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.9: Melhores soluções por custo global (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Execução	Populações	Combinação
98,47	41,98	140,45	5, 6 e 8	128, 76 e 81	Comb_G1
100,03	40,57	140,60	1, 2, 4, 7, 9 e 10	82, 95, 77, 146, 126 e 95	Comb_G2
100,15	41,51	141,66	3	73	Comb_G5

As execuções 5, 6 e 8, de acordo com a Tabela 3.9, encontraram a solução ótima (Configuração Comb_G1), com custo global de 140,45 milhões de reais.

A Tabela 3.10 apresenta os 10 melhores indivíduos encontrados ao longo das 10 execuções da metaheurística ES (utilizando uma semente inicial diferente para cada execução). Percebe-se, na Tabela 3.10, que as 10 melhores combinações de reforços estão entre as 10 melhores soluções encontradas pela rotina da metodologia proposta.

Tabela 3.10: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo de global (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Combinação
98,47	41,98	140,45	4	3	Comb_G1
100,03	40,57	140,60	3	6	Comb_G2
100,09	41,27	141,36	3	6	Comb_G3
100,56	40,80	141,37	4	3	Comb_G4
100,15	41,51	141,66	3	5	Comb_G5
98,14	43,85	141,99	3	4	Comb_G6
98,86	43,15	142,01	3	5	Comb_G7
100,82	41,51	142,33	4	5	Comb_G8
98,04	44,56	142,60	4	3	Comb_G9
98,73	44,32	143,06	4	5	Comb_G10

A Tabela 3.11 apresenta, para cada uma das simulações realizadas com σ = 0,5 e nIND = 40, os desvios percentuais das 6 melhores soluções encontradas em relação ao correspondente melhor indivíduo.

Tabela 3.11: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

Indivíduo	Desvio Percentual										
maiviauo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10	
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
2	0,5396	0,5396	0,2391	0,5396	0,6488	0,6527	0,5396	0,6527	0,5396	1,0042	
3	0,7494	0,7494	0,2529	0,7494	0,6527	1,1139	0,7494	2,4729	0,9903	1,2299	
4	1,2299	1,2299	0,9887	0,9903	1,1000	1,8560	1,0042	2,7878	1,0042	1,4222	
5	1,4222	1,7662	1,3530	1,2299	1,5323	2,2805	1,7662	2,9812	1,2299	2,1695	
6	1,7455	2,1125	1,6003	1,7455	1,8560	2,7878	1,9533	3,1658	2,5492	2,6763	
Média	0,9478	1,0663	0,7390	0,8758	0,9650	1,4485	1,0021	2,0101	1,0522	1,4170	

Na Tabela 3.12 estão presentes os desvios percentuais dos custos globais obtidos pelos 6 melhores indivíduos encontrados em cada uma das 10 execuções, em relação ao custo global de 140,45 milhões de reais, obtido para a melhor solução geral (encontrada pelas execuções 5, 6 e 8).

Tabela 3.12: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL

Indivíduo		Desvio Percentual										
maividuo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10		
1	0,1086	0,1086	0,8588	0,1086	0,0000	0,0000	0,1086	0,0000	0,1086	0,1086		
2	0,6488	0,6488	1,1000	0,6488	0,6488	0,6527	0,6488	0,6527	0,6488	1,1139		
3	0,8588	0,8588	1,1139	0,8588	0,6527	1,1139	0,8588	2,4729	1,1000	1,3399		
4	1,3399	1,3399	1,8560	1,1000	1,1000	1,8560	1,1139	2,7878	1,1139	1,5323		
5	1,5323	1,8768	2,2234	1,3399	1,5323	2,2805	1,8768	2,9812	1,3399	2,2805		
6	1,8560	2,2234	2,4729	1,8560	1,8560	2,7878	2,0641	3,1658	2,6606	2,7878		
Média	1,0574	1,1760	1,6042	0,9853	0,9650	1,4485	1,1118	2,0101	1,1620	1,5272		

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos testes em que a opção de minimizar apenas as perdas ativas é avaliada, considerando os valores de taxa de mutação e de tamanho da população definidos.

Minimização do Custo de Perdas

A fim de verificar o comportamento da metodologia baseada na metaheurística ES sem considerar o custo de investimento diretamente na função objetivo, como um

estudo adicional, foram realizadas 10 execuções da rotina com 40 indivíduos e passo mutacional 0,5. Os resultados obtidos são apresentados nesta subseção.

Para este estudo, a faixa de montante a ser investido permanece como restrição ao problema, conforme estabelecido pela Equação (3.13).

$$\min \left\{ C_{perdas} + \alpha_{min} \times \Delta C_{inv-min} + \alpha_{max} \times \Delta C_{inv-max} \right\}$$
 (3.13)

Neste novo caso as penalidades associadas às violações do custo de investimento $(\alpha_{min} \in \alpha_{max})$ são mantidas com valor 1,0 ao longo de todo o processo de busca.

Porém, antes de aplicar a metodologia baseada em metaheurística, as 60.187 combinações envolvendo 1, 2, 3, 4, 5 e 6 reforços, obtidas pela busca exaustiva, foram ordenadas com base no custo de perdas. Como resultado, obtém-se a Tabela 3.13, por meio da qual verifica-se que a Combinação Comb_P1 proporciona o menor custo de perdas, igual a 36,35 milhões de reais.

 C_{perdas} (R\$ × 10⁶) **Custo Global** Configuração/ Número de Perdas C_{inv} (R\$ × 10⁶) Combinação $(R\$ \times 10^6)$ Reforços (MW) Base 00,00 66,83 66,83 0 28,5 Comb_P1 121,60 36,35 157,95 4 15,5 Comb_P2 36,58 152,70 4 116,12 15,6 Comb_P3 116,98 36,58 153,57 4 15,6 Comb_P4 36,58 156,38 4 119,79 15,6 Comb_P5 110,03 36,82 146,85 3 15,7 147,95 Comb_P6 110,90 37,05 3 15,8 Comb_P7 113,71 37,05 150,76 3 15,8 Comb_P8 121,13 37,05 158,18 4 15,8 Comb_P9 4 118,21 37,29 155,49 15,9 Comb_P10 115,04 152,56 3 37,52 16,0

Tabela 3.13: Melhores Combinações em termos de custo de perdas para o SL.

Na Tabela 3.13, as soluções Comb_P1 e Comb_P8 violam o limite superior de investimento de 120 milhões de reais, porém as violações correspondem a 1,34% e 0,94%, respectivamente. Com violações dentro dos 2% de tolerância, estas combinações são consideradas soluções factíveis para o problema. Após a execução da metodologia baseada na metaheurística ES, de posse dos resultados

obtidos, para este caso também foi realizado um estudo estatístico sobre os resultados encontrados.

A Tabela 3.14 apresenta o menor custo de perdas obtido em cada uma das execuções da metodologia, os números das execuções em que uma determinada solução foi encontrada, e o número de populações analisadas em cada simulação. O tempo médio gasto em cada execução da rotina implementada para a metodologia baseada em ES foi de 88 minutos. Um número médio de 112 gerações foi necessário para a evolução da busca até atender ao critério de parada estabelecido.

Tabela 3.14: Melhores soluções por custo de perdas (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Execução	Populações	Combinação
121,60	36,35	157,95	1, 3, 5 e 6	123, 80, 171 e 136	Comb_P1
116,12	36,58	152,70	2 e 9	89 e 107	Comb_P2
119,79	36,58	156,38	7 e 8	111 e 120	Comb_P4
110,90	37,05	147,95	4	109	Comb_P6
115,04	37,52	152,56	10	70	Comb_P10

A Tabela 3.15 apresenta os 10 melhores indivíduos, em termos de custo de perdas, extraídos das populações finais encontrados ao longo das 10 execuções da metaheurística ES (utilizando uma semente inicial diferente para cada execução).

Tabela 3.15: Melhores indivíduos por custo de perdas visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Combinação
121,60	36,35	157,95	4	4	Comb_P1
116,12	36,58	152,70	4	3	Comb_P2
116,98	36,58	153,57	4	2	Comb_P3
119,79	36,58	156,38	4	3	Comb_P4
110,03	36,82	146,85	3	8	Comb_P5
110,90	37,05	147,95	3	2	Comb_P6
113,71	37,05	150,76	3	3	Comb_P7
121,13	37,05	158,18	3	3	Comb_P8
118,21	37,29	155,49	4	8	Comb_P9
115,04	37,52	152,56	2	5	Comb_P10

A Tabela 3.16 apresenta, para cada uma das 10 simulações realizadas nesta subseção, os desvios percentuais dos custos de perdas ativas apresentados pelas 6 melhores soluções encontradas, em relação ao correspondente melhor indivíduo.

Tabela 3.16: Desvios percentuais em relação ao menor custo de perdas da execução (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

Indivíduo	Desvio Percentual									
	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,6452	0,0000	0,6452	0,0000	0,6452	0,6452	0,6410	0,6410	0,0000	0,6250
3	0,6452	0,6410	1,2903	0,6329	0,6452	0,6452	1,2821	1,2821	0,0000	1,8750
4	1,2903	1,9231	1,9355	1,2658	0,6452	0,6452	1,2821	1,9231	0,6410	2,5000
5	1,9355	3,2051	2,5806	2,5316	1,2903	1,2903	1,9231	3,2051	1,2821	3,1250
6	1,9355	3,2051	3,2258	2,5316	1,9355	1,9355	2,5641	3,2051	1,9231	5,6250
Média	1,0753	1,4957	1,6129	1,1603	0,8602	0,8602	1,2821	1,7094	0,6410	2,2917

Na Tabela 3.17 estão apresentados os desvios percentuais dos custos de perdas ativas obtidos pelos 6 melhores indivíduos encontrados em cada uma das 10 execuções, em relação ao valor presente do custo de perdas de 36,35 milhões de reais, obtido para a solução ótima do problema de minimização do custo de perdas ativas. Verifica-se, a partir das Tabelas 3.16 e 3.17, que a execução 10 apresenta valores de desvios mais elevados. Entretanto, essa execução identificou uma das 10 melhores soluções ótimas (Comb_P10), apontadas pela busca exaustiva. Neste ponto, vale ressaltar a importância da realização de mais que uma execução da metaheurística ES no estudo do planejamento.

Tabela 3.17: Desvios percentuais em relação ao menor custo de perdas geral (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

Indivíduo	Desvio Percentual									
	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10
1	0,0000	0,6452	0,0000	1,9355	0,0000	0,0000	0,6452	0,6452	0,6452	3,2258
2	0,6452	0,6452	0,6452	1,9355	0,6452	0,6452	1,2903	1,2903	0,6452	3,8710
3	0,6452	1,2903	1,2903	2,5806	0,6452	0,6452	1,9355	1,9355	0,6452	5,1613
4	1,2903	2,5806	1,9355	3,2258	0,6452	0,6452	1,9355	2,5806	1,2903	5,8065
5	1,9355	3,8710	2,5806	4,5161	1,2903	1,2903	2,5806	3,8710	1,9355	6,4516
6	1,9355	3,8710	3,2258	4,5161	1,9355	1,9355	3,2258	3,8710	2,5806	9,0323
Média	1,0753	2,1505	1,6129	3,1183	0,8602	0,8602	1,9355	2,3656	1,2903	5,5914

A Tabela 3.18 apresenta os 10 melhores indivíduos, em termos do custo global (investimento mais perdas), extraídos das populações finais encontradas ao longo das 10 execuções da metaheurística ES. Neste caso, o objetivo não é minimizar o custo global, mas sim as perdas ativas. Então, obtêm-se soluções de desempenho um pouco inferior, em termos do custo global, o que já era esperado de se encontrar, pois as populações finais apresentam configurações com perdas bastante reduzidas, porém com investimentos maiores.

Tabela 3.18: Melhores indivíduos das populações finais ordenados pelo custo global (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ $ imes$ 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Combinação
100,03	40,57	140,60	3	5	Comb_G2
100,09	41,27	141,36	4	1	Comb_G3
100,56	40,80	141,37	4	2	Comb_G4
100,15	41,51	141,66	3	1	Comb_G5
104,63	38,46	143,09	3	7	-
99,96	43,38	143,35	5	1	-
105,49	38,69	144,19	3	8	-
105,44	38,93	144,36	3	7	-
105,55	39,87	145,42	3	6	-
105,33	40,57	145,90	3	4	-

Considerando todos os indivíduos analisados ao longo de todo o processo de busca das 10 execuções da metaheurística ES realizadas, podem ser selecionados aqueles que apresentaram o menor custo global. A Tabela 3.19 apresenta os 10 melhores indivíduos selecionados.

Comparando-se a Tabela 3.18 com a Tabela 3.19, nota-se que as populações finais apresentam indivíduos geralmente um pouco inferiores, em termos do custo global. No entanto, durante a busca, principalmente em seus estágios iniciais, diversos indivíduos de melhor qualidade (com os mais baixos custos globais) são analisados, mesmo para o caso de minimização do custo de perdas ativas. Quando se utiliza objetivos diferentes (e.g., minimizar o custo global *versus* minimizar o custo de perdas), realizam-se buscas por regiões diferentes do espaço de soluções. A Figura 3.3 ilustra bem esta situação, ao apresentar as populações finais encontradas pela

metodologia ES (em execuções distintas), quando se minimiza o custo global e quando se tem por objetivo reduzir apenas o custo de perdas ativas.

Tabela 3.19: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,5 e nIND = 40) – Sistema SL.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Combinação
98,47	41,98	140,45	4	4	Comb_G1
100,03	40,57	140,60	3	9	Comb_G2
100,09	41,27	141,36	3	2	Comb_G3
100,56	40,80	141,37	4	4	Comb_G4
100,15	41,51	141,66	3	6	Comb_G5
98,14	43,85	141,99	3	2	Comb_G6
98,86	43,15	142,01	3	6	Comb_G7
100,82	41,51	142,33	4	2	Comb_G8
98,73	44,32	143,06	4	2	Comb_G10
104,63	38,46	143,09	3	7	-

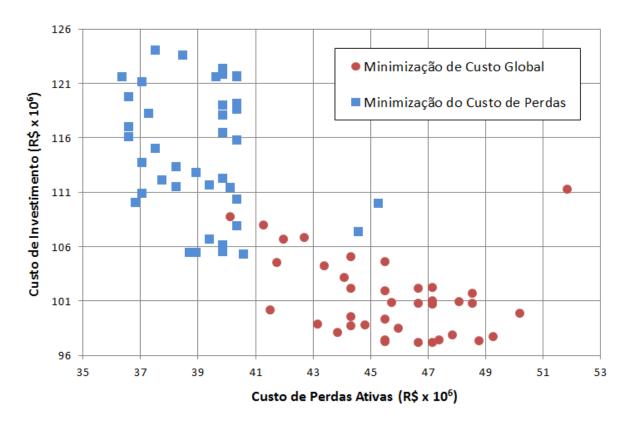


Figura 3.3: Populações finais encontradas pela metodologia ES - SL.

Quando se minimiza o custo global, são encontradas soluções com grande variabilidade para o custo de perdas ativas, ficando o custo de investimento mais estabilizado em valores próximos ao limite inferior da faixa de investimento. Este fato comprova a necessidade da restrição imposta ao montante a ser investido, sem a qual, provavelmente, a decisão ótima resultaria em investimento zero. Por outro lado, minimizar apenas o custo de perdas ativas implica em soluções finais com perdas significativamente menores, e com o custo de investimento excursionando ao longo da faixa de investimento, com predominância de pontos nas proximidades do limite superior. Salienta-se que soluções com perdas muito reduzidas, como aquelas obtidas pelas combinações Comb_P1, Comb_P2, Comb_P3 e Comb_P4, devem ser detalhadamente avaliadas pelos planejadores, pois incluem reforços que podem ser estratégicos para o sistema de subtransmissão.

Por fim, vale destacar que considerar a minimização das perdas ativas, utilizando faixas mais amplas de investimento (ou em torno de montantes mais elevados) podem fornecer importantes subsídios para o planejador. Subconjuntos de reforços contidos em soluções com os menores custos de perdas ativas podem propiciar alternativas de baixo investimento e com reduções substanciais das perdas ativas. Espera-se, ainda, que estas alternativas resultem em benefícios mais acentuados para os demais aspectos operativos (confiabilidade, perfil de tensão e nível de carregamento dos circuitos).

Análise de Configurações Semelhantes

A fim de exemplificar o estudo de configurações semelhantes, de acordo com o passo (vi) do algoritmo da metodologia baseada em metaheurística (Subseção 3.3.5), foram escolhidas três configurações reforçadas identificadas pela rotina da metaheurística ES para o estudo. As configurações escolhidas foram:

- Comb_G1: Obtida pela solução de menor custo global quando se minimiza o custo global (primeiro indivíduo da Tabela 3.3);
- Comb_P1: Obtida pela solução de menor custo de perdas quando se minimiza o custo de perdas (primeiro indivíduo da Tabela 3.13);

 Comb_P5: Quinta melhor solução em termos de custo de perdas quando se minimiza o custo de perdas (quinta solução da Tabela 3.13). Esta solução foi escolhida por apresentar um baixo custo de investimento, em relação às demais soluções obtidas na busca orientada pela minimização de perdas.

A configuração Comb_G1 é composta por 4 reforços, sendo um circuito duplo entre as barras 435 e 540 e outro circuito duplo entre as barras 715 e 850. Destes circuitos, apenas o primeiro possui ramo semelhante, e, portanto, a configuração Comb_G1 possui apenas uma configuração semelhante a ser analisada. Os custos dessa configuração estão presentes na Tabela 3.20 a seguir, onde a primeira linha corresponde à configuração Comb_G1.

Tabela 3.20: Configuração semelhante à configuração Comb_G1.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Perdas (MW)
98,47	41,98	140,45	17,9
81,47	45,96	127,43	19,6

Espera-se, que na substituição de um ramo semelhante, o nível de investimento apresentado pelas configurações seja o mesmo. Entretanto, na Tabela 3.20 observa-se que a configuração semelhante apresenta um custo de investimento muito reduzido em relação à Comb_G1. Para este caso, constata-se que um dos ramos semelhantes possui uma barra terminal localizada em SE conectada com a rede básica, e o outro não, implicando na utilização de cabos diferentes para adição dos reforços. A diferença nos valores de perdas ativas também pode ser, em grande parte, explicada pelo mesmo fato. Este é um ponto interessante, que deve passar a receber uma atenção especial durante a fase de identificação de ramos semelhantes.

Ainda na Tabela 3.20, percebe-se que a configuração semelhante possui custos global e de investimento menores. No entanto, a mesma, por apresentar um maior valor de perdas ativas, não deve substituir a Comb_G1. Como já mencionado nesta dissertação, a configuração que apresenta um valor reduzido de perdas ativas, deve apresentar também benefícios em outros aspectos operativos para o sistema [S12].

A configuração Comb_P1 também é composta por 4 reforços, sendo um circuito duplo entre as barras 715 e 850, e dois circuitos simples: um entre as barras 435 e 540 e o outro entre as barras 620 e 650. Os dois ramos com reforços simples possuem ramos semelhantes, e, portanto, a configuração Comb_P1 possui 3 configurações semelhantes a serem analisadas. Os custos dessas configurações estão presentes na Tabela 3.21 a seguir, onde a primeira linha corresponde à configuração Comb_P1.

Tabela 3.21: Configurações semelhantes à configuração Comb_P1.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Perdas (MW)
121,60	36,35	157,95	15,5
115,30	40,34	155,64	17,2
114,42	40,34	154,76	17,2
108,12	44,09	152,21	18,8

A partir da Tabela 3.21, verifica-se que as 3 configurações semelhantes à configuração Comb_P1 possuem custos global e de investimento um pouco menores. Entretanto, as perdas ativas apresentadas por essas configurações são, consideravelmente, maiores que as perdas ativas da configuração Comb_P1. Sendo assim, pelo mesmo motivo considerado no estudo da configuração semelhante à Comb_G1, a configuração Comb_P1 não será substituída por nenhuma de suas semelhantes.

Por fim, a configuração Comb_P5 possui 3 reforços, sendo um simples entre as barras 520 e 660 e um duplo entre as barras 435 e 540. Os dois ramos possuem ramos semelhantes e, portanto, a configuração Comb_P5 possui também 3 configurações semelhantes. Os custos dessas configurações estão presentes na Tabela 3.22 a seguir:

Tabela 3.22: Configurações semelhantes à configuração Comb_P5.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	<i>C_{perdas}</i> (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Perdas (MW)
110,03	36,82	146,85	15,7
103,73	40,80	144,53	17,4
93,02	40,80	133,83	17,4
86,72	44,56	131,28	19,0

Verifica-se pela Tabela 3.22, que as 3 configurações semelhantes possuem custos global e de investimento menores e perdas maiores que Comb_P5. Para este caso, a configuração com custo de investimento de 93,02 milhões de reais apresenta o valor de perdas ativas no mesmo nível das melhores soluções presentes na Tabela 3.3, apontadas pela busca exaustiva. Este fato leva a crer que a realização de buscas com pequenas reduções do limite inferior para o custo de investimento podem ser relevantes. Certamente esta configuração semelhante deve ser selecionada para ser avaliada sob outros aspectos operativos (em fase posterior do planejamento).

Neste ponto, cabe destacar novamente a importância da utilização das duas funções de busca (minimização de custo global e minimização do custo de perdas) durante o estudo do planejamento da expansão. A partir dos resultados apresentados pelos dois processos, cabe ao planejador, por exemplo, definir se é interessante investir um pouco mais (porém, dentro da faixa de investimento), para obter configurações com menores perdas e, consequentemente, apresentando melhores desempenhos em termos de outros aspectos operativos.

3.4.3 – Sistema Leste Centro Norte Cemig – SLCN

O sistema utilizado nos estudos de aplicação desta subseção é, em princípio, igual ao sistema Leste Cemig. No entanto, visando a consideração de problemas de maior porte, será realizada a investigação de reforços não apenas na área Leste, mas também incluindo as áreas vizinhas: Centro e Norte. Portanto, o número de barras de 138 kV, e por consequência, de ramos existentes e novos, são bem maiores.

O sistema completo contém a representação de toda a rede básica do sistema brasileiro, sendo composto por 4.998 barras, sendo 742 barras de geração (incluindo pequenas centrais hidrelétricas e produtores independentes), e 7.061 circuitos, dos quais, 4.387 são linhas de transmissão e 2.674 são transformadores. A carga total deste sistema atinge o montante de 71.610 MW.

Especificamente em relação às áreas Leste, Centro e Norte da Cemig, o sistema tem 365 barras dentre as quais 13 barras são de geração (excluídas as PCHs),

perfazendo uma capacidade instalada de 1.760 MW. Além disto, a respectiva rede possui 451 circuitos sendo que destes circuitos, 127 são LTs de 138 kV.

Para compor o sistema teste desta subseção, denominado nesta dissertação como Sistema Leste Centro Norte Cemig – SLCN, são consideradas 81 barras de 138 kV das áreas de interesse, sendo 21 na Leste, 41 na Centro e 19 na Norte. Interligando as 81 barras de interesse existem 88 circuitos já existentes, sendo que 7 são circuitos duplos, o que determina a existência de 81 circuitos simples que podem ser duplicados no processo de expansão do sistema.

3.4.3.1 – Seleção dos Conjuntos de Ramos Candidatos – SLCN

Assim como foi feito para o SL, na obtenção dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos a serem considerados no estudo do SLCN, os procedimentos apresentados na Seção 3.2 desta dissertação, também foram utilizados.

Dentre as barras de interesse, para o sistema SLCN, foram identificados 441 RNs não semelhantes e que possuem comprimento dentro dos limites especificados (8 e 150 km). Ao todo, 19 RNs foram selecionados para compor o Conjunto de RNs Candidatos, sendo que 16 foram selecionados de acordo com o passo (ix) do algoritmo da Subseção 3.2.1, e os outros 3 em concordância com os passos (x) a (xii) do mesmo algoritmo.

Foram identificados, dentre os 81 REs que podem ser duplicados, 11 REs com comprimento inferior ao limite máximo de 150 km e carregamento superior ao limite mínimo de 0,6 pu, especificados pelo planejador. Para compor o Conjunto de REs Candidatos foram selecionados 8 REs de acordo com os procedimentos apresentados na Subseção 3.2.2.

No total, foram gastos aproximadamente 2 horas e 28 minutos para seleção dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos.

3.4.3.2 – Aplicação da Metodologia Baseada em Metaheurística – SLCN

Devido a maior dimensão do sistema SLCN, torna-se inviável a realização de uma busca exaustiva pela solução ótima utilizando os Conjuntos de REs e RNs

Candidatos. Para avaliar todas as 579.166 configurações possíveis envolvendo até 6 reforços, seriam necessárias 160,9 horas de simulação, considerando o tempo de 1 segundo para avaliar cada configuração. As combinações que seriam obtidas para N_{REF} igual a 1, 2, 3, 4, 5 e 6 reforços resultariam nos subtotais de 27, 370, 3.419, 23.896, 134.405 e 417.049 configurações, respectivamente. Salienta-se, ainda, que considerar até 6 reforços pode não ser suficiente para avaliar este novo caso. Portanto, o emprego da busca exaustiva para problemas de maior porte não é recomendável.

O indivíduo da ES para este sistema fica definido a partir dos Conjuntos de REs e RNs Candidatos, contendo nRE + nRN = 27 genes. De acordo com a Equação (3.8), os nRE primeiros genes correspondem aos REs Candidatos (nRE = 8), podendo receber os valores 0 ou 1. Já os nRN últimos correspondem aos RNs Candidatos (nRN = 19), podendo assumir os valores 0, 1 ou 2. O universo de possibilidades de investimento obtido por este formato de indivíduo (8 REs e 19 RNs) atinge a cifra de 1.162.261.723 ($2^8 + 3^{19} = 256 + 1.162.261.467$) diferentes soluções. Com o microcomputador utilizado nos testes apresentados neste relatório, seriam necessários, aproximadamente, 36,86 anos de simulação para avaliar todas as configurações resultantes.

Para delimitar a faixa de investimento foram adotados os valores de 100 milhões de reais para o limite inferior e de 125 milhões de reais para o limite superior do custo de investimento. Além disso, durante a simulação, a tolerância de 2% também é adotada para a violação destes valores neste estudo.

Dada a dimensão do sistema e a partir dos testes realizados, foram adotados para a aplicação da metodologia baseada na metaheurística ES a este sistema, um passo mutacional de σ = 0,3 e populações contendo 80 indivíduos (nIND). Os resultados obtidos para a função objetivo que minimiza o Custo Global, assim como para a condição em que o objetivo é apenas a minimização do Custo de Perdas Ativas são apresentados a seguir. Em ambos os casos foram realizadas 10 execuções da metaheurística ES.

Minimização do Custo Global

A Tabela 3.23 apresenta o melhor indivíduo (com menor custo global) obtido em cada uma das 10 execuções da metaheurística ES. Os números das execuções em que uma determinada solução foi encontrada, com seus respectivos custos, e o número de gerações necessárias a cada execução para satisfazer o critério de parada, estão também presentes na Tabela 3.23. O tempo médio gasto em cada execução da metaheurística foi de aproximadamente 3 horas e 26 minutos. Um número médio de 152 gerações foi necessário para que a evolução convergisse de acordo com o critério de parada estabelecido. Das soluções apresentadas na Tabela 3.23, apenas a melhor solução da execução 4 não apresentou violação do limite inferior do custo de investimento (100 milhões de reais). Entretanto, a maior violação das soluções encontradas pelas outras execuções foi de 1,95%, que respeita a tolerância de 2% adotada.

Tabela 3.23: Melhores soluções por custo global ($\sigma = 0.3$ e nIND = 80) – Sistema SLCN.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	<i>C</i> _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Execução	Populações
98,09	134,14	232,23	1, 5, 7, 9 e 10	178, 103, 138, 110 e 139
98,39	134,14	232,52	3, 6, e 8	158, 114 e 128
100,13	134,14	234,27	4	132
98,05	136,95	235,00	2	132

A Tabela 3.24 apresenta os 10 melhores indivíduos "visitados" em termos de custo global, ao longo das 10 execuções da metaheurística ES, quando a busca é realizada considerando a minimização do custo global. Já a Tabela 3.25 apresenta os 10 melhores indivíduos, em termos de custo de perdas.

Destaca-se que os 10 indivíduos da Tabela 3.24 apresentam perdas ativas muito semelhantes (57,2 a 58,0 MW) e razoavelmente acima das perdas obtidas para os indivíduos da Tabela 3.25, que variam entre 55,8 e 56,4 MW. Porém, os valores de custo global apresentados na Tabela 3.24 são significativamente menores, variando entre 232,23 a 234,28 milhões de reais, contra uma variação de 242,74 a 258,35 milhões de reais, para os indivíduos da Tabela 3.25.

Tabela 3.24: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo global (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Perdas (MW)
98,09	134,14	232,23	4	5	57,2
98,39	134,14	232,52	4	6	57,2
98,09	134,61	232,70	6	2	57,4
98,04	134,84	232,88	4	6	57,5
98,38	134,61	232,99	6	3	57,4
98,03	135,31	233,34	6	2	57,7
99,40	134,14	233,53	4	6	57,2
98,09	136,01	234,11	6	2	58,0
100,13	134,14	234,27	4	5	57,2
98,50	135,78	234,28	5	5	57,9

Tabela 3.25: Melhores indivíduos por custo de perdas visitados durante a minimização do custo global (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ $ imes$ 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Perdas (MW)
120,84	130,85	251,69	4	1	55,8
118,02	131,32	249,35	6	1	56,0
113,73	131,56	245,28	6	1	56,1
125,85	131,56	257,41	3	1	56,1
110,95	131,79	242,74	5	1	56,2
111,98	131,79	243,77	5	1	56,2
115,43	131,79	247,23	4	1	56,2
119,83	131,79	251,63	5	1	56,2
126,56	131,79	258,35	7	1	56,2
111,59	132,26	243,85	6	3	56,4

A Tabela 3.26 apresenta, para cada uma das execuções, os desvios percentuais das 6 melhores soluções encontradas em relação ao correspondente melhor indivíduo, para a aplicação das 10 execuções da metodologia baseada na metaheurística ES ao sistema SLCN.

Na Tabela 3.27 estão apresentados os desvios percentuais dos custos globais obtidos pelos 6 melhores indivíduos encontrados em cada uma das 10 execuções, em relação ao custo global de 232,23 milhões de reais, obtido para a melhor solução geral (encontrado pelas execuções 1, 5, 7, 9 e 10).

Tabela 3.26: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

Indivíduo		Desvio Percentual								
marviduo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,1256	0,1725	0,0743	0,0029	0,2776	0,1518	0,2000	0,7550	0,1256	0,1256
3	0,2776	0,2477	0,7521	0,0545	0,5605	0,4344	0,2776	0,8805	0,2776	0,2776
4	0,3256	0,3236	0,7550	0,1274	0,8787	1,2483	0,3256	1,1163	0,5605	0,3256
5	0,4776	0,4275	0,8805	0,1558	0,8816	1,3594	0,5605	1,1332	0,8787	0,4776
6	0,5605	0,4793	0,9530	0,3782	1,0072	1,5208	0,8081	1,2384	1,4867	0,5605
Média	0,2945	0,2751	0,5692	0,1198	0,6009	0,7858	0,3620	0,8539	0,5549	0,2945

Tabela 3.27: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

Indivíduo					Desvio P	ercentual				
maividuo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10
1	0,0000	1,1910	0,1256	0,8787	0,0000	0,1256	0,0000	0,1256	0,0000	0,0000
2	0,1256	1,3655	0,2000	0,8816	0,2776	0,2776	0,2000	0,8816	0,1256	0,1256
3	0,2776	1,4417	0,8787	0,9337	0,5605	0,5605	0,2776	1,0072	0,2776	0,2776
4	0,3256	1,5185	0,8816	1,0072	0,8787	1,3755	0,3256	1,2434	0,5605	0,3256
5	0,4776	1,6236	1,0072	1,0358	0,8816	1,4867	0,5605	1,2602	0,8787	0,4776
6	0,5605	1,6760	1,0798	1,2602	1,0072	1,6483	0,8081	1,3655	1,4867	0,5605
Média	0,2945	1,4694	0,6955	0,9995	0,6009	0,9124	0,3620	0,9806	0,5549	0,2945

Para a função objetivo que considera a minimização do custo global o desvio percentual médio entre os custos globais dos 6 primeiros indivíduos de todas as execuções e o custo global do melhor indivíduo geral (Desvio Médio Percentual Coletivo) é de 0,7164. Já o desvio percentual apresentado pelo melhor indivíduo de cada execução (Desvio Médio Percentual Individual) em relação ao melhor indivíduo geral é de 0,2447. Estes pequenos desvios, ou seja, a baixa variabilidade do custo global, demonstram a robustez da metodologia proposta, a qual apresentou, em todas as execuções, soluções de boa qualidade, próximas da melhor solução geral.

Minimização do Custo de Perdas

A Tabela 3.28 apresenta o melhor indivíduo (com menor custo de perdas) obtido em cada uma das 10 execuções da metaheurística ES. Assim como na subseção anterior, a coluna "Execução" contém os números das execuções em que uma

determinada solução, com seus respectivos custos, foi encontrada, e a coluna "Gerações" apresenta o número de gerações necessárias a cada execução para que o critério de parada fosse satisfeito.

Para esta função objetivo, o tempo médio gasto em cada execução da metaheurística foi de aproximadamente 2 horas e 44 minutos. Um número médio de 118 gerações foi necessário para que a evolução convergisse de acordo com o critério de parada estabelecido.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Execução	Populações
126,98	129,68	256,66	7, 9 e 10	111, 97 e 126
127,27	129,68	256,96	3	146
125,18	130,15	255,33	2, 4 e 6	122, 108 e 151
121,58	130,62	252,20	1 e 8	113 e 105
121,87	130,62	252,49	5	99

Tabela 3.28: Melhores soluções por custo de perdas (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

As três melhores soluções da Tabela 3.28 apresentam custo de investimento violando o limite superior adotado (125 milhões de reais), entretanto, a maior violação corresponde a 1,82%, que está dentro da tolerância de 2% considerada.

A Tabela 3.29 apresenta os 10 melhores indivíduos "visitados" pela rotina da metodologia baseada na metaheurística ES em termos do custo global, ao longo de 10 execuções da rotina, quando a busca é realizada considerando a minimização do custo de perdas. Já a Tabela 3.30 apresenta os 10 melhores indivíduos "visitados" em termos do custo de perdas ativas, ao longo das mesmas de 10 execuções da rotina da metaheurística ES.

A Tabela 3.29 apresentou maior variabilidade para os custos de investimento (o maior deles ficando em 100,14 milhões de reais), sendo que as soluções com maiores investimentos são confrontadas por menores custos de perdas. Já a Tabela 3.30 fornece soluções com investimentos de ordem mais elevada, contrapostos por perdas ativas com significativas reduções (até 1,9 MW menores que as perdas apresentadas pela melhor solução de custo global). Entende-se, portanto, que é válido utilizar os dois processos de busca (ou funções objetivo), pois soluções

obtidas quando se minimiza o custo de perdas podem apontar investimentos com grande impacto não somente nas perdas ativas, mas também nos demais aspectos operativos (sobretudo na confiabilidade ou robustez da configuração resultante).

Tabela 3.29: Melhores indivíduos por custo global visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Perdas (MW)
98,09	134,14	232,23	4	2	57,2
98,39	134,14	232,52	4	2	57,2
98,09	134,61	232,70	6	1	57,4
98,04	134,84	232,88	4	1	57,5
98,38	134,61	232,99	6	1	57,4
100,13	134,14	234,27	4	2	57,2
98,50	135,78	234,28	5	1	57,9
98,02	136,72	234,74	5	1	58,3
98,77	136,72	235,49	6	1	58,3
100,14	135,55	235,68	4	1	57,8

Tabela 3.30: Melhores indivíduos por custo de perdas visitados durante a minimização do custo de perdas (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

C_{inv} (R\$ × 10 6)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Repetições	Perdas (MW)
126,98	129,68	256,66	5	2	55,3
127,27	129,68	256,96	5	2	55,3
125,18	130,15	255,33	7	2	55,5
125,22	130,15	255,37	7	3	55,5
125,51	130,15	255,66	7	1	55,5
125,57	130,39	255,95	7	5	55,6
126,88	130,39	257,27	5	1	55,6
119,13	130,62	249,75	6	4	55,7
121,58	130,62	252,20	5	2	55,7
121,87	130,62	252,49	5	1	55,7

Comparando-se a minimização do custo global com a minimização do custo de perdas (i.e., a Tabela 3.24 com a Tabela 3.29) percebe-se que as 5 melhores soluções em termos do custo global também foram encontradas pelo processo de busca orientado pelo mínimo custo de perdas. Entretanto, o número de "visitas" (repetições) a cada solução durante a busca orientada pela minimização do custo de

perdas é menor que o número de "visitas" na busca orientada pela minimização do custo global. Isso se deve ao fato de que após algumas gerações, os processos de busca convergem para diferentes regiões do espaço de soluções. Entende-se, portanto, que é válido utilizar os dois processos de busca (ou funções objetivo), pois soluções obtidas quando se minimiza o custo de perdas podem apontar investimentos com grande impacto não somente nas perdas ativas, mas também nos demais aspectos operativos (sobretudo na confiabilidade ou robustez da configuração resultante).

A Tabela 3.31 apresenta, para cada uma das execuções, os desvios percentuais dos custos de perdas ativas das 6 melhores soluções encontradas em relação ao correspondente melhor indivíduo.

Tabela 3.31: Desvios percentuais em relação ao menor custo global da execução (σ = 0,3 e nIND = 80) – Sistema SLCN.

Indivíduo		Desvio Percentual								
maividuo	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,3617	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5425	0,3617
3	0,0000	0,0000	0,3617	0,0000	0,0000	0,0000	0,3617	0,0000	0,7233	0,3617
4	0,0000	0,1802	0,3617	0,1802	0,0000	0,1802	0,3617	0,0000	0,7233	0,3617
5	0,0000	0,3604	0,3617	0,3604	0,0000	0,3604	0,7233	0,3591	0,7233	0,3617
6	0,0000	0,3604	0,5425	0,3604	0,0000	0,3604	0,7233	0,3591	0,7233	0,5425
Média	0,0000	0,1502	0,3315	0,1502	0,0000	0,1502	0,3617	0,1197	0,5726	0,3315

Na Tabela 3.32 estão apresentados os desvios percentuais dos custos de perdas dos 6 melhores indivíduos encontrados em cada uma das 10 execuções, em relação ao custo de 129,68 milhões de reais, obtido pela melhor solução identificada na minimização do custo de perdas ativas.

Para a função objetivo que considera a minimização do custo de perdas, o desvio percentual médio entre os custos de perdas dos 6 primeiros indivíduos de todas as execuções e o custo de perdas do melhor indivíduo geral (Desvio Médio Percentual Coletivo) é de 0,5425. Já o desvio percentual apresentado pelo melhor indivíduo de cada execução (Desvio Médio Percentual Individual) em relação ao melhor indivíduo geral é de 0,3255.

Tabela 3.32: Desvios percentuais em relação ao menor custo global geral (σ = 0,3 e $nIND$ = 80)
- Sistema SLCN.

Indivíduo	Desvio Percentual									
	Exec. 1	Exec. 2	Exec. 3	Exec. 4	Exec. 5	Exec. 6	Exec. 7	Exec. 8	Exec. 9	Exec. 10
1	0,7233	0,3617	0,0000	0,3617	0,7233	0,3617	0,0000	0,7233	0,0000	0,0000
2	0,7233	0,3617	0,3617	0,3617	0,7233	0,3617	0,0000	0,7233	0,5425	0,3617
3	0,7233	0,3617	0,3617	0,3617	0,7233	0,3617	0,3617	0,7233	0,7233	0,3617
4	0,7233	0,5425	0,3617	0,5425	0,7233	0,5425	0,3617	0,7233	0,7233	0,3617
5	0,7233	0,7233	0,3617	0,7233	0,7233	0,7233	0,7233	1,0850	0,7233	0,3617
6	0,7233	0,7233	0,5425	0,7233	0,7233	0,7233	0,7233	1,0850	0,7233	0,5425
Média	0,7233	0,5124	0,3315	0,5124	0,7233	0,5124	0,3617	0,8439	0,5726	0,3315

A Figura 3.4 apresenta as diferentes regiões do espaço de soluções selecionadas pelos dois objetivos utilizados (minimizar o custo global *versus* minimizar o custo de perdas). Para a construção da Figura 3.4 foram utilizadas as populações finais encontradas pela rotina da metodologia proposta (em uma das 10 execuções da metaheurística ES), quando se minimiza o custo global e quando se tem por objetivo reduzir apenas o custo de perdas ativas.

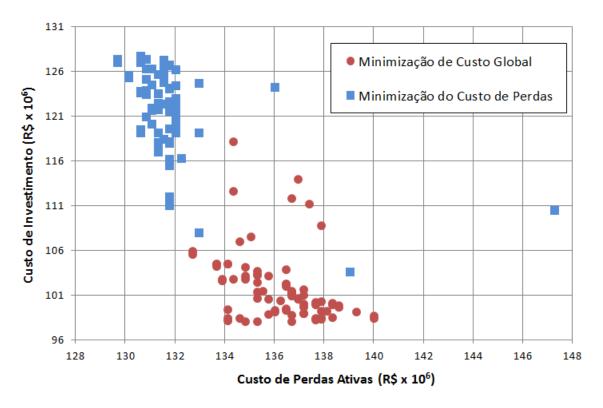


Figura 3.4: Populações finais encontradas pela metodologia ES – SLCN.

Assim como ocorrido para o Sistema Leste Cemig – SL, no sistema SLCN, quando se minimiza o custo global, são encontradas soluções com grande variabilidade para o custo de perdas ativas, ficando o custo de investimento mais estabilizado em valores próximos ao limite inferior da faixa de investimento. Este fato comprova a necessidade da restrição imposta ao montante a ser investido, sem a qual, provavelmente, a decisão ótima resultaria em investimento zero. Por outro lado, minimizar apenas o custo de perdas ativas implica em soluções finais com perdas significativamente menores, e com o custo de investimento excursionando ao longo da faixa de investimento, com predominância de pontos nas proximidades do limite superior. Novamente, ressalta-se que soluções com perdas muito reduzidas, devem ser detalhadamente avaliadas pelos planejadores, pois incluem reforços que podem ser estratégicos para o sistema de subtransmissão.

Análise de Configurações Semelhantes

Com o intuito de exemplificar o processo de recuperação de configurações semelhantes para as soluções obtidas no estudo do sistema SLCN, foram escolhidas duas configurações reforçadas, identificadas pelo algoritmo da metaheurística ES. As configurações escolhidas foram:

- Configuração 1: Obtida pela solução de menor custo global quando se minimiza o custo global (primeiro indivíduo da Tabela 3.24);
- Configuração 2: Obtida pela solução de menor custo de perdas quando se minimiza o custo de perdas (primeiro indivíduo da Tabela 3.30).

A Configuração 1 é composta por 4 reforços, todos correspondentes a circuitos simples alocados em ramos novos. Desses ramos, 1 possui 3 semelhantes e os outros 3 possuem 1 ramo semelhante cada um. Portanto, para a Configuração 1, são geradas 31 configurações semelhantes ((4×2×2×2)-1). Devido o número elevado de configurações semelhantes geradas, apenas os custos das 7 configurações mais relevantes são apresentados na Tabela 3.33, onde a primeira linha corresponde à Configuração 1.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Perdas (MW)
98,09	134,14	232,23	57,2
86,66	139,53	226,19	59,5
88,15	139,53	227,69	59,5
90,92	137,89	228,81	58,8
93,84	135,78	229,62	57,9
92,41	137,89	230,30	58,8
95,33	135,55	230,88	57,8
99,59	133,90	233,49	57,1

Tabela 3.33: Configurações semelhantes à Configuração 1.

Na Tabela 3.33, verifica-se que 6 configurações semelhantes apresentam custos global e de investimento menores que a Configuração 1 (de menor Custo Global). Porém, 4 delas possuem perdas ativas razoavelmente maiores (em 1,6 MW ou mais). As outras 2 possuem perdas ativas menos elevadas (57,9 e 57,8 MW) e até mesmo compatíveis com 3 soluções da Tabela 3.24 (melhores indivíduos "visitados" em termos de custo global, pela minimização do custo global). Estas duas configurações semelhantes, apesar de violarem a faixa de investimento, devem ser selecionadas para análise sob o foco de outros aspectos operativos. Assim como ocorrido para o Sistema SL, tem-se uma situação que permite afirmar que a flexibilização da faixa de investimento deve ser adotada, ao menos em uma fase inicial dos estudos.

A Configuração 2 é composta de 5 reforços, sendo 1 circuito duplo e 3 circuitos simples, todos alocados em ramos novos. Dos 4 ramos reforçados, 1 possui 3 ramos semelhantes e os outros 3 possuem 1 semelhante cada. Assim, para a Configuração 2 também existem 31 configurações semelhantes. Na Tabela 3.34 estão presentes as 8 configurações semelhantes de maior relevância.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.34, percebe-se que nenhuma configuração semelhante deve ser selecionada para análises mais detalhadas, pois todas elas apresentam ou Custo Global bem superior a 234,28 milhões de reais (maior Custo Global da Tabela 3.34) ou Custo de Perdas muito acima do maior valor obtido na Tabela 3.30 (130,62 milhões de reais).

C_{inv} (R\$ × 10 6)	C_{perdas} (R\$ × 10 6)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Perdas (MW)
126,98	129,68	256,66	55,3
103,67	137,42	241,09	58,6
105,17	137,19	242,35	58,5
103,09	140,24	243,32	59,8
109,98	133,67	243,64	57,0
111,47	133,43	244,90	56,9
109,39	136,48	245,87	58,2
110,12	136,48	246,60	58,2
110,89	136,48	247,37	58,2

Tabela 3.34: Configurações Semelhantes à Configuração 2.

3.5 - CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia baseada em metaheurística para auxílio no planejamento da expansão de sistemas de subtransmissão. Nesta dissertação, foi utilizada a metaheurística Estratégia de Evolução. A metodologia é capaz de identificar boas soluções de expansão sem que seja definida previamente a quantidade de reforços que deverá ser adicionada ao sistema. Para identificação das alternativas de reforços, a metodologia utiliza Conjuntos (reduzidos) de REs e RNs Candidatos, com o objetivo de reduzir o esforço computacional necessário.

Para ilustrar o comportamento das perdas ativas, assim como as opções de uso da metodologia, foram realizados estudos visando apenas a minimização das perdas ativas, adotando-se o custo de investimento, ou mais precisamente, a faixa de investimento, como uma restrição ao problema. Além de escolher entre incluir ou não o custo de investimento na função objetivo, o planejador pode realizar diversas simulações, para diferentes faixas de investimento, com maior ou menor amplidão.

Testes iniciais, utilizando-se o Sistema Leste Cemig (SL), comprovaram a eficiência e robustez da metodologia proposta neste capítulo. Dos 9 pares de parâmetros considerados para o ajuste da metodologia, quando aplicada a este sistema, 7 acertaram 100% das 10 soluções ótimas identificadas pela busca exaustiva. Para os outros 3 pares de parâmetros, pelo menos 60% destas soluções foram encontradas. Nestes testes, os *speed-ups*, em relação à busca exaustiva, variaram de 13,1 a 26,3, o que corresponde a uma redução do tempo demandado de 92,4% a 96,2%.

Para o Sistema Leste Centro Norte Cemig (SLCN), a baixa variabilidade dos custos apresentada pelos resultados obtidos nos dois processos de busca (minimização do custo global e minimização do custo de perdas) comprova a robustez da metodologia proposta. Destacam-se, nestes resultados, os tempos de processamento reduzidos, se comparados com o tempo esperado de execução de uma busca exaustiva pelas soluções ótimas para este sistema.

As avaliações das configurações semelhantes, realizadas ao final das aplicações, apontam para a boa seletividade dos índices de desempenho propostos, tanto para a identificação do ramo novo semelhante a ser mantido, quanto para a criação dos Conjuntos de RNs Candidatos.

Cabe, ainda, destacar as vantagens de se utilizar os dois processos de busca (ou funções objetivo). Soluções obtidas pela minimização do custo de perdas, embora apresentem maiores Custos Globais, podem produzir alternativas de expansão com perdas ativas bastante reduzidas e com grandes benefícios em outros aspectos operativos. Cabe, então, ao planejador avaliar a viabilidade de investir em opções de reforço um pouco mais caras, porém dentro da faixa de investimento estabelecida.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA

4.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é proposta uma metodologia baseada em um algoritmo heurístico construtivo, capaz de fornecer um conjunto de boas soluções para a adição de reforços em sistemas de subtransmissão de energia. Baseado em índices de desempenho, capazes de medir a atratividade de novos reforços para o sistema, o algoritmo proposto neste capítulo é capaz de capturar o efeito combinado da adição de reforços. Assim como adotado no Capítulo 3, considera-se a possibilidade de se adicionar circuitos simples ou duplos em Ramos Novos do sistema (RNs) e de duplicar circuitos simples em Ramos Existentes (REs).

Deste modo, neste capítulo são descritas as características da metodologia heurística proposta e os parâmetros e procedimentos adotados na construção das rotinas computacionais desenvolvidas. Os resultados, obtidos a partir de estudos realizados em sistemas reais da Cemig [CFU13], são também apresentados e discutidos. Para simular as aplicações da metodologia heurística proposta, um processador Intel Core i7 de 2,93 GHz foi utilizado. O cálculo das perdas ativas é realizado por meio de análises de fluxo de potência realizadas pelo Programa Anarede [C11].

4.2 – HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PROPOSTA

A metodologia baseada em heurística construtiva, proposta neste capítulo, pretende identificar boas alternativas para a expansão de sistemas de subtransmissão, tendo como parâmetro a redução no montante de perdas ativas decorrentes da adição de reforços. Com base em uma estrutura em árvore, a metodologia proposta neste capítulo busca capturar a atratividade dos ramos a serem adicionados à Configuração Base do sistema e para condições posteriores, ou seja, para configurações do sistema já reforçadas. A ideia é ir selecionando REs e RNs Candidatos tanto para a Configuração Base do sistema, quanto para possíveis configurações com 1 reforço, 2 reforços, e assim por diante, como ilustrado pela Figura 3.1, apresentada no Capítulo 3.

Com o objetivo de reduzir o esforço computacional, a identificação dos ramos existentes e novos mais promissores a serem adicionados a cada nível da árvore (i.e., aqueles que irão produzir um impacto mais significativo nos aspectos operacionais do sistema), é realizada com o auxílio de dois índices de desempenho, os índices Ind_{θ} e Ind_{V} . Estes índices já foram apresentados na Subseção 3.2.1, para definição do Conjunto de RNs Candidatos.

4.2.1 – Algoritmo da Metodologia Heurística Construtiva

Na fase inicial do algoritmo heurístico construtivo, assim como realizado no algoritmo para construção do Conjunto de RNs Candidatos (Subseção 3.2.1), são realizadas ações que visam eliminar a presença de configurações reforçadas semelhantes. Para isso, é realizada a identificação de ramos novos semelhantes (i.e., que tenham uma mesma barra terminal, sendo as segundas barras terminais interligadas e próximas, geralmente localizadas em um mesmo município). O critério de escolha do ramo que permanecerá no estudo, dentre os semelhantes identificados, é o maior valor de soma normalizada dos índices Ind_{θ} e Ind_{V} . No final do processo, para as melhores soluções com a presença de um ou mais ramos semelhantes, é realizada a recuperação dos ramos semelhantes descartados, sendo analisadas as correspondentes configurações semelhantes.

Para tornar mais claro o processo adotado nesta metodologia, os passos do algoritmo heurístico construtivo são apresentados a seguir:

- i) determinar o Conjunto de Ramos Candidatos a receber reforços, a partir das especificações fornecidas pelo planejador. Os ramos que farão parte deste conjunto devem possuir comprimento dentro do intervalo estabelecido (e.g., 8 a 150 km). Adicionalmente, os ramos já existentes, devem apresentar carregamento, em pu da capacidade do mesmo, maior ou igual ao limite estabelecido pelo planejador (e.g., 0,6 pu);
- ii) eliminar a presença de ramos novos semelhantes dentro do Conjunto de Ramos Candidatos. Para tal, deve-se avaliar a Configuração Base do sistema de subtransmissão e calcular os índices Ind_{θ} e Ind_{V} de cada ramo novo. Em seguida, utilizando como critério a maior soma normalizada destes índices,

- deve-se selecionar, para cada par ou grupo de ramos semelhantes, aquele a ser mantido;
- iii) criar o primeiro nível da árvore de expansão (i.e., o nível para apenas 1 reforço), selecionando os NR (quantidade definida pelo planejador, e.g., 6 ramos) ramos candidatos mais atrativos, em termos dos índices de desempenho. Metade dos ramos selecionados deve ser apontada pelos maiores valores do índice Ind_{θ} , ficando a outra metade estabelecida pelo índice Ind_{V} . Definir o nível atual da árvore de expansão como sendo o primeiro;
- iv) avaliar cada configuração do nível atual da árvore, a fim de calcular os respectivos valores de Ind_{θ} e Ind_{V} , assim como o respectivo montante de perdas ôhmicas;
- v) selecionar as configurações que apresentarem os menores montantes de perdas para comporem o conjunto das melhores Configurações Candidatas do nível atual da árvore de expansão;
- vi) partindo de cada configuração avaliada no passo (iv) selecionar, por meio dos índices Ind_{θ} e Ind_{V} , um conjunto com o mesmo número de ramos candidatos (NR) utilizado no passo (iii), criando, assim, as configurações que poderão pertencer ao próximo nível da árvore;
- vii) realizar a poda natural da árvore, eliminando as repetições (configurações com a mesma combinação de reforços) entre as configurações geradas no passo (vi). Se após a poda natural houver um número de configurações maior que o valor máximo (NC) determinado pelo usuário (e.g., 300), avaliar todas estas configurações e realizar uma poda forçada da árvore de expansão, selecionando apenas as NC configurações com os menores valores de perdas ôhmicas para fazerem parte do próximo nível da árvore;
- viii) incrementar o nível atual da árvore. Se o nível final da árvore de expansão (i.e., aquele contendo o número máximo de reforços permitido pelo planejador) for atingido, ir para o passo (ix); senão, retornar ao passo (iv);

- ix) avaliar cada configuração do nível final da árvore em termos de perdas ôhmicas, selecionando aquelas que apresentarem os menores montantes de perdas para comporem o conjunto das melhores Configurações Candidatas do nível final da árvore;
- x) criar um Conjunto de Configurações Candidatas contendo todas as configurações dos conjuntos das melhores Configurações Candidatas de todos os níveis da árvore. Todas as configurações devem ser avaliadas e ordenadas em termos do custo de perdas, eliminando-se as configurações que violam o custo de investimento em mais que 2% dos limites inferior e superior, especificados pelo planejador (e.g., 100 e 120 milhões de reais);
- xi) para as melhores Configurações Candidatas avaliadas no passo anterior, gerar e avaliar eventuais configurações semelhantes, ficando a critério do planejador proceder, ou não, a troca de configurações;
- xii) definir o conjunto com as melhores opções de reforço para estudo de outros aspectos operativos, em uma fase posterior do planejamento.

Cabe destacar que a poda forçada, realizada no passo (vii) do algoritmo, é uma ação muito agressiva, para a qual o uso dos índices de desempenho pode, eventualmente, não produzir bons resultados. Portanto, adotou-se o emprego direto das perdas ativas, apesar do decorrente acréscimo no esforço computacional, o qual pode ser considerado aceitável.

4.3 – APLICAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados e análises da aplicação da metodologia proposta neste capítulo aos dois sistemas considerados no estudo da metodologia apresentada no Capítulo 3, sendo eles o Sistema Leste Cemig – SL, e o Sistema Leste Centro Norte Cemig – SLCN. Um caso de referência que realiza uma busca exaustiva pelas melhores soluções, e um caso adicional que considera as perdas ôhmicas diretamente na escolha dos reforços a serem adicionados ao sistema, são também estudados nesta seção, a fim de apontar a eficiência da metodologia proposta.

Todas as rotinas da metodologia proposta neste capítulo foram também desenvolvidas no Programa Scilab [S14]. A seguir são apresentadas as principais considerações adotadas na aplicação da metodologia e os resultados obtidos.

4.3.1 – Considerações Gerais das Aplicações

As principais considerações adotadas na aplicação da metodologia heurística proposta estão presentes nesta subseção. Neste capítulo são considerados os mesmos valores adotados na Subseção 3.4.1 para os parâmetros comuns entre as metodologias deste capítulo e do Capítulo 3, itens de (i) até (xi) a seguir:

- i) período de vida útil dos equipamentos igual a 30 anos;
- ii) taxa de remuneração do capital de 7,5% ao ano;
- iii) duração do patamar de carga de 4 horas/dia (Dur = 4 para Equação (3.12));
- iv) custo unitário de perda de energia de 136 reais por MWh;
- v) uso do cabo Grosbeak quando ao menos uma das barras terminais for de conexão com a rede básica, tanto para LT de circuito simples quanto duplo;
- vi) uso do cabo Linnet quando nenhuma das barras terminais for de conexão com a rede básica, tanto para LT de circuito simples quanto duplo;
- vii) custo do Bay igual a R\$1.665.419,00 (por subestação);
- viii) carregamento (em pu da capacidade do circuito) mínimo para ramos existentes, com circuito simples, igual a 0,6 pu;
- ix) comprimento máximo para ramos existentes e novos igual a 150 km;
- x) comprimento mínimo para ramos novos igual a 8 km;
- xi) distância máxima entre as subestações (SEs) para identificação de ramos novos semelhantes igual a 8 km;
- xii) número de ramos candidatos mais atrativos (NR) igual a 6;

xiii) valor máximo de configurações para cada nível da árvore de expansão (NC) igual a 300;

Os cabos considerados no estudo da metodologia heurística construtiva são os mesmos adotados no estudo da metodologia baseada na metaheurística ES. Portanto, os valores dos custos de investimento e das impedâncias e susceptâncias, são aqueles apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

4.3.2 - Sistema Leste Cemig - SL

Para a validação da metodologia proposta, quando esta é aplicada ao sistema Leste Cemig – SL, Caso AHC (Algoritmo Heurístico Construtivo), as melhores soluções obtidas para cada nível da árvore de expansão são comparadas com os resultados obtidos a partir de uma busca exaustiva em árvore (Caso Referência, que considera todas as possíveis combinações de reforços utilizando-se o Conjunto de Ramos Candidatos definido nos passos (i) e (ii) do algoritmo), tendo o montante de perdas ôhmicas como parâmetro de seleção. A busca exaustiva, assim como foi feito na aplicação da metodologia proposta no Capítulo 3, só é realizada na aplicação que utiliza o Sistema SL, o qual além de possuir um número reduzido de ramos candidatos, necessita de um número menor de reforços para solução do PES.

Adicionalmente, com o objetivo de comprovar a eficiência dos índices de desempenho propostos (quanto à identificação dos reforços que terão maior impacto sobre o montante de perdas), é utilizado um terceiro caso (Caso AHC $_{Perdas}$), baseado em uma adaptação do Caso AHC para viabilizar o emprego direto das perdas ôhmicas para a seleção das melhores configurações de reforços. Tanto o Caso Referência quanto o Caso AHC $_{Perdas}$ utilizam uma adaptação do algoritmo exposto na Subseção 4.2.1, o qual produz o Caso AHC. Nos Casos Referência e AHC $_{Perdas}$ os índices de desempenho (Ind_{θ} e Ind_{V}) são substituídos pelo montante de perdas ativas, o que implica em um substancial acréscimo de análises de fluxo de potência. Salienta-se, ainda, que para o Caso Referência o esforço computacional é absurdamente maior, principalmente para problemas de maior porte, pois todas as ramificações partindo de cada nó da árvore de expansão devem ser consideradas.

Para os limites de investimento, inferior e superior, necessários para avaliação das configurações identificadas no passo (x) do algoritmo da Subseção 4.2.1, foram considerados os mesmos valores adotados no Capítulo 3, com a aplicação da metodologia baseada na metaheurística ES ao sistema SL, 100 milhões e 120 milhões de reais, respectivamente.

Para execução do Caso AHC e para o Caso AHC_{Perdas}, foi utilizado um número de ramos candidatos mais atrativos (NR) igual a 6 (passos (iii) e (vi) do algoritmo da Subseção 4.2.1). Já para a busca exaustiva (Caso Referência) nenhuma restrição (NR) é imposta ao processo de construção da árvore, sendo aplicada apenas a poda natural do passo (vii).

Na execução do Caso Referência, as informações de custos e de número de reforços para cada uma das 10 melhores configurações identificadas estão apresentadas na Tabela 4.1. Para este caso, que utiliza, diretamente, as perdas ativas para a obtenção dos Ramos Candidatos, foram selecionados 5 REs e 34 RNs. O tempo de processamento necessário para execução do Caso Referência, com até 4 reforços, foi de, aproximadamente, 1.791 minutos. Ressalta-se que as melhores soluções identificadas pela busca exaustiva neste capítulo são distintas daquelas obtidas pela busca exaustiva do Capítulo 3, em decorrência da utilização de diferentes conjuntos de Ramos Candidatos para o Sistema SL.

Tabela 4.1: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SL - Caso Referência.

Configuração	C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Perdas (MW)
CR_1	121,60	36,35	157,95	4	15,5
CR_2	116,12	36,58	152,70	4	15,6
CR_3	116,69	36,58	153,27	4	15,6
CR_4	116,98	36,58	153,57	4	15,6
CR_5	119,79	36,58	156,38	4	15,6
CR_6	121,21	36,58	157,79	4	15,6
CR_7	110,03	36,82	146,85	3	15,7
CR_8	110,60	37,05	147,66	3	15,8
CR_9	110,90	37,05	147,95	3	15,8
CR_10	113,71	37,05	150,76	3	15,8

Na Tabela 4.1, as configurações CR_1 e CR_6 violam em menos que 2% do limite superior de investimento considerado, e, portanto, são consideradas soluções do problema. Salienta-se que (nesta e demais tabelas) quando duas ou mais configurações fornecem o mesmo valor de perdas ativas, as mesmas são ordenadas decrescentemente, em termos dos respectivos custos de investimento.

Na Tabela 4.2 estão presentes as 10 melhores soluções, em termos de custo de perdas, identificadas pelo Caso AHC. Na coluna "Configuração" é feita uma referência às melhores configurações do Caso Referência (vide Tabela 4.1). Para a execução deste caso, com adição de até 4 reforços, foram gastos, aproximadamente, 26 minutos. No Caso AHC, foram selecionados também 5 REs e 34 RNs para compor o Conjunto de Ramos Candidatos. Entretanto, 3 RNs deste conjunto são distintos do conjunto selecionado pelo Caso Referência, uma vez que o Caso AHC utiliza os índices de desempenho para eliminação de ramos semelhantes.

Das 10 soluções apresentadas na Tabela 4.2, identificadas pelo Caso AHC, 4 estão entre as 10 melhores apontadas pelo Caso Referência, inclusive a solução ótima, CR_1. O *speed-up* obtido pelo Caso AHC em relação ao Caso Referência foi de 68,6. A média de perdas ativas das soluções da Tabela 4.2 é de 16,1 MW e a média dos custos de investimento é de 114,11 milhões de reais. Para o Caso Referência (Tabela 4.1) as médias das perdas e dos custos de investimento são iguais a 15,7 MW e 115,76 milhões de reais, respectivamente.

Tabela 4.2: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SL - Caso AHC.

C _{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Perdas (MW)	Configuração
121,60	36,35	157,95	4	15,5	CR_1
110,03	36,82	146,85	3	15,7	CR_7
110,90	37,05	147,95	3	15,8	CR_9
113,71	37,05	150,76	3	15,8	CR_10
115,04	37,52	152,56	3	16,0	-
112,12	37,76	149,88	3	16,1	-
105,49	38,69	144,19	3	16,5	-
115,80	38,69	154,50	4	16,5	-
118,35	38,69	157,04	4	16,5	-
118,06	38,93	156,99	4	16,6	-

Das soluções identificadas pelo Caso AHC (Tabela 4.2), algumas merecem destaque. As configurações CR_7, CR_9 e CR_10, apresentam um ligeiro aumento dos valores de perdas ativas em relação à configuração CR_1 (solução considerada ótima), entretanto, possuem custos globais bem reduzidos. O mesmo pode ser verificado para a sétima solução da Tabela 4.2, que possui custo de investimento de 105,49 milhões de reais. A qualidade, em termos do custo global, dessas soluções analisadas é devida às características, ou concepção, dos índices de desempenho utilizados, os quais consideram, mesmo que indiretamente, o custo de instalação do reforço em cada ramo.

Com relação ao Caso AHC_{Perdas}, as 10 melhores soluções ordenadas pelo custo de perdas são apresentadas na Tabela 4.3. A execução do Caso AHC_{Perdas}, para adição de até 4 reforços, demandou um tempo aproximado de 75 minutos. Para este caso, o Conjunto de Ramos Candidatos é idêntico ao do Caso Referência. Das 10 melhores soluções apresentadas na Tabela 4.3, 4 são comuns às soluções identificadas pelo Caso Referência, apresentadas na Tabela 4.1, sendo que nenhuma das 6 soluções ótimas foram identificadas. O *speed-up* obtido para este caso foi de 23,9 em relação ao Caso Referência. A média dos valores de perdas para as 10 melhores soluções identificadas pelo Caso AHC_{Perdas} e o valor médio do custo de investimento são, respectivamente, 16,1 MW e 112,67 milhões de reais.

Tabela 4.3: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SL - Caso AHC_{Perdas}.

C _{inv} (R\$ × 10 ⁶)	C _{perdas} (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Perdas (MW)	Configuração
110,03	36,82	146,85	3	15,7	CR_7
110,60	37,05	147,66	3	15,8	CR_8
110,90	37,05	147,95	3	15,8	CR_9
113,71	37,05	150,76	3	15,8	CR_10
118,96	37,99	156,95	3	16,2	-
113,34	38,22	151,56	4	16,3	-
117,48	38,22	155,71	4	16,3	-
104,63	38,46	143,09	3	16,4	-
113,39	38,46	151,85	4	16,4	-
113,68	38,46	152,14	4	16,4	-

Todos os resultados apresentados demonstram a eficácia da metodologia proposta, que apresenta boas soluções com uma redução significativa do esforço

computacional envolvido. Mesmo com a priorização da minimização das perdas ativas no processo de busca, o Caso AHC apresentou algumas soluções com baixos níveis de Custo Global (e.g., CR_7, CR_9 e a sétima solução da Tabela 4.2).

Após a execução de todos os casos considerados, foi, ainda, realizado um estudo em cada nível da árvore a fim de identificar o desempenho do Caso AHC e Caso AHC_{Perdas} em relação ao Caso Referência.

A Tabela 4.4 apresenta o valor médio dos custos de perdas ativas e o valor médio dos custos de investimento para as 10 melhores configurações encontradas por cada caso em cada nível, sendo que para o primeiro nível, tanto para o valor médio dos custos de perdas ativas quanto para o valor médio dos custos de investimento, apenas 6 configurações são utilizadas, já que o Caso AHC e Caso AHC_{Perdas} identificam apenas esse número de configurações para este nível. Obviamente, as 6 configurações (reforços) selecionadas pelos Casos Referência e AHC_{Perdas} são as mesmas, pois correspondem às configurações com menores montantes de perdas ativas dentre as 39 configurações reforçadas possíveis para o primeiro nível da árvore.

Tabela 4.4: Valores médios dos custos de perdas e dos custos de investimento.

Nível	Valor Médio	do Custo de Po (R\$ × 10 ⁶)	erdas Ativas	Valor Médio dos Custos de Investimento (R\$ × 10 ⁶)		
141701	Referência	AHC	AHC _{Perdas}	Referência	AHC	AHC _{Perdas}
1	56,56	58,16	56,56	32,70	36,42	32,70
2	45,12	46,71	45,99	69,54	72,03	68,69
3	36,93	37,73	37,31	115,07	114,80	113,17
4	31,79	32,17	32,06	152,80	155,26	148,24

Para o primeiro nível da árvore, o Caso Referência avaliou um total de 39 configurações reforçadas, e os Casos AHC e AHC_{Perdas} avaliaram 6 configurações.

No segundo nível da árvore de expansão, informa-se que existe um total de 775 possibilidades de configurações (i.e., combinações de 2 reforços), todas elas avaliadas pelo Caso Referência. Das 36 possíveis configurações geradas pelo algoritmo heurístico construtivo (6 melhores opções de reforço para cada uma das 6 configurações selecionadas no primeiro nível da árvore), 31 são mantidas após a

poda natural, quando se utiliza o Caso AHC. Já para o Caso AHC_{Perdas} apenas 22 configurações permanecem após a poda natural. Porém, para este último caso foi preciso avaliar 218 configurações para a obtenção dos respectivos montantes de perdas ativas, necessários para a identificação dos NR reforços partindo de cada nó (configuração) da árvore de expansão.

Para o terceiro nível, existem 10.431 configurações reforçadas formadas por 3 reforços, todas elas avaliadas pelo Caso Referência. Já para os Casos AHC e AHC_{Perdas}, foram avaliadas 147 e 777 configurações, respectivamente. Para o Caso AHC_{Perdas} permaneceram 70 configurações após a poda natural.

Finalmente, para o quarto nível, a combinação de reforços do Conjunto de Ramos Candidatos resulta em 106.714 configurações reforçadas diferentes. Quando se emprega a metodologia proposta, Caso AHC, 652 configurações são obtidas após a seleção pelos índices (Ind_{θ} e Ind_{V}) e posterior poda natural da árvore de expansão. Em seguida, estas 652 configurações devem ser avaliadas para se aplicar uma poda forçada, selecionando-se as 300 (NC) configurações com os menores montantes de perdas ativas, conforme passo (vii) do algoritmo. Já para o Caso AHC_{Perdas}, 2.416 configurações devem ser avaliadas para a aplicação do passo (vi) do algoritmo (i.e., para usar as perdas, em substituição aos índices de desempenho, no critério de seleção). Após a poda natural, permaneceram para este nível, 201 configurações.

Na Tabela 4.5 é apresentado o número de configurações identificadas pelo Caso AHC e pelo Caso AHC_{Perdas} que são comuns às melhores configurações identificadas pelo Caso Referência em cada nível da árvore de expansão.

Tabela 4.5: Número de configurações comuns àquelas obtidas pelo Caso Referência.

Nível	AHC	AHC _{Perdas}
1	3	6
2	4	6
3	6	6
4	7	6

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5, verifica-se que, com o avanço dos níveis, o Caso AHC, que corresponde à metodologia proposta neste capítulo, apresenta uma melhora dos resultados, demonstrando sua capacidade de

capturar o efeito combinado da adição de reforços. Fica também comprovada a eficiência dos índices de desempenho na consideração do impacto na redução das perdas ativas decorrentes da adição de um reforço em um determinado ramo.

Neste ponto, as configurações semelhantes às melhores soluções obtidas pela metodologia proposta podem ser geradas e avaliadas. Entretanto, como este estudo já foi detalhadamente apresentado para as soluções do Capítulo 3, ele não foi realizado para este capítulo.

4.3.3 – Sistema Leste Centro Norte Cemig – SLCN

Para este problema de maior porte não é mais recomendável realizar uma busca exaustiva em árvore. Na aplicação da metodologia heurística construtiva proposta neste capítulo, Caso AHC, e do Caso AHC_{Perdas}, ao Sistema SLCN, os limites inferior e superior considerados foram de 100 milhões e 125 milhões de reais. Na execução dos Casos AHC e AHC_{Perdas}, foi considerado um número de ramos candidatos mais atrativos (NR) igual a 6 e a busca foi realizada até o sexto nível da árvore.

A Tabela 4.6 apresenta as 10 melhores soluções apontadas pelo Caso AHC, referente à metodologia proposta, em termos de custo de perdas e que respeitam os limites considerados para o custo de investimento. Para execução deste caso, sendo permitida a adição de até 6 reforços, o tempo necessário de processamento foi de, aproximadamente, 153,6 minutos. Para o Caso AHC, o Conjunto de Ramos Candidatos, obtido pelos passos (i) e (ii) do algoritmo heurístico construtivo, foi formado por 11 REs e 441RNs.

Para os resultados da Tabela 4.6, referente ao Caso AHC, a média de perdas ativas corresponde a 57,1 MW e o valor médio dos custos de investimento é de 115,80 milhões de reais.

Na Tabela 4.7 estão presentes as 10 melhores soluções, em termos de custo de perdas e que possuem custo de investimento dentro dos limites inferior e superior especificados, identificadas pelo Caso AHC_{Perdas}.

Tabela 4.6: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SLCN - Caso AHC.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	<i>C_{perdas}</i> (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Perdas (MW)
127,07	133,43	260,50	5	56,9
112,16	133,67	245,83	6	57,0
112,46	133,67	246,13	6	57,0
120,76	133,67	254,43	6	57,0
115,42	134,14	249,56	6	57,2
115,72	134,14	249,85	6	57,2
116,31	134,14	250,45	6	57,2
116,60	134,14	250,74	6	57,2
116,73	134,14	250,86	6	57,2
104,72	134,84	239,56	5	57,5

Um tempo de processamento aproximado de 7.992 minutos foi necessário para a execução do Caso AHC_{Perdas}, quando se permite soluções com a adição de até 6 reforços. Com a aplicação do Caso AHC_{Perdas}, um total de 11 REs e 456 RNs foram selecionados para compor o Conjunto de Ramos Candidatos. O número de RNs para este caso difere do caso anterior devido ao critério de eliminação de ramos semelhantes, que neste caso é baseado no montante de perdas ativas.

Tabela 4.7: Melhores soluções em termos de custo de perdas para o SLCN - Caso AHC_{Perdas}.

C_{inv} (R\$ × 10 ⁶)	<i>C_{perdas}</i> (R\$ × 10 ⁶)	Custo Global (R\$ × 10 ⁶)	Número de Reforços	Perdas (MW)
125,97	130,39	256,36	5	55,6
126,95	130,39	257,33	5	55,6
120,84	130,85	251,69	4	55,8
125,68	130,85	256,54	5	55,8
126,66	130,85	257,51	5	55,8
121,41	131,09	252,50	4	55,9
121,70	131,09	252,79	4	55,9
124,15	131,56	255,70	5	56,1
125,85	131,56	257,41	4	56,1
115,43	131,79	247,23	4	56,2

A partir dos resultados da Tabela 4.7, verifica-se que a média de perdas ativas e o valor médio dos custos de investimento correspondem, respectivamente a 55,9 MW e 123,46 milhões de reais. O *speed-up* apresentado pelo Caso AHC em relação ao Caso AHC_{Perdas} é de 53,03.

Com relação às melhores configurações obtidas em cada nível da árvore de expansão, constatou-se uma menor coincidência entre os resultados obtidos pelos Casos AHC e AHC_{Perdas}. Conforme destacado na Tabela 4.8, as perdas ativas médias apresentadas pelas soluções do Caso AHC são superiores àquelas obtidas para o Caso AHC_{Perdas}. Já em relação ao investimento médio, o comportamento é inverso. À medida que o número de reforços aumenta percebe-se claramente que a metodologia proposta fornece soluções com nível de investimento substancialmente menor. Estes resultados permitem afirmar que o uso dos índices de desempenho propostos proporciona (além de elevadíssimos *speed-ups*) soluções bem balanceadas em termos dos investimentos realizados e das decorrentes reduções nos montantes de perdas ativas, com comprovada repercussão em outros aspectos operativos relevantes [S12], [MSRS12] e [CFU13].

Tabela 4.8: Valores médios dos custos de perdas e dos custos de investimento em cada nível da árvore.

Nível		to de Perdas Ativas (10 ⁶)	Valor Médio dos Custos de Investimento (R\$ × 10 ⁶)		
	AHC	AHC _{Perdas}	AHC	AHC _{Perdas}	
1	167,36	155,32	28,55	32,70	
2	152,34	144,57	71,38	68,95	
3	141,99	135,52	104,10	102,65	
4	136,58	130,01	125,24	137,22	
5	132,07	125,34	142,14	167,67	
6	128,44	122,06	163,81	193,48	

Para as soluções obtidas pela metodologia heurística construtiva, relativas ao sistema SLCN, as configurações semelhantes também não foram geradas e avaliadas, uma vez que este estudo já foi apresentado de forma detalhada no Capítulo 3.

4.4 - CONCLUSÕES

Neste Capítulo foi apresentada uma nova metodologia para o planejamento de sistemas de subtransmissão. Esta metodologia utiliza um algoritmo heurístico construtivo baseado em uma árvore de expansão, que é capaz de capturar o efeito

combinado da adição de reforços. Para medir a atratividade de novos reforços para a rede, dois índices de desempenho são utilizados, os índices Ind_{θ} e Ind_{V} .

A eficiência da metodologia proposta neste capítulo é comprovada por meio dos resultados obtidos com a utilização do Caso AHC, quando comparados com os resultados obtidos pelos Casos Referência e AHC_{Perdas}. Para o estudo utilizando o Sistema SL, com um *speed-up* de 68.9 em relação ao Caso Referência contra um *speed-up* de 23,9 obtido pelo Caso AHC_{Perdas}, a metodologia proposta (Caso AHC) comprova sua capacidade de encontrar boas soluções para o planejamento da expansão com um esforço computacional reduzido.

Os resultados obtidos pelo Caso AHC em relação ao Caso AHC_{Perdas}, quando aplicados ao Sistema SLCN, demonstram a capacidade da metodologia proposta de trabalhar com sistemas de grande porte. Além do *speed-up* de 53,03 apresentado pelo Caso AHC em relação ao Caso AHC_{Perdas}, o aumento da qualidade das soluções apresentados pela metodologia proposta, sobretudo em termos do custo de investimento, confirmam a eficácia dos índices de desempenho utilizados.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou duas metodologias para o auxílio ao planejamento da expansão de sistemas de subtransmissão, direcionadas às peculiaridades destes sistemas. Para isso, o aspecto de perdas ôhmicas é considerado na função objetivo durante o processo de busca. Com o intuito de encontrar boas alternativas de expansão, essas metodologias utilizam técnicas de otimização e ferramentas de análise estática do sistema.

Nas soluções do problema do planejamento, fornecidas pelas metodologias propostas neste estudo, são permitidas a construção de circuitos simples ou duplos em Ramos Novos (RNs) e/ou a duplicação de circuitos em Ramos Existentes (REs) do sistema de subtransmissão. Vale ressaltar, que a estratégia de planejamento adotada nesta dissertação baseia-se na rede de transmissão principal projetada para o ano horizonte, o que é mais adequado para redes em países com grande território, como no caso brasileiro. Outro aspecto relevante considerado no estudo desta dissertação é a modelagem da rede AC, que é essencial tanto para a análise de fluxos de potência ativa e reativa quanto para avaliar características de desempenho necessárias ao planejamento de médio prazo, ou seja, entre 5 e 10 anos.

A primeira metodologia proposta é baseada em uma técnica metaheurística. Em virtude de ser uma técnica robusta e com poucos parâmetros a serem ajustados, a metaheurística Estratégia de Evolução foi a técnica escolhida. Nesta metodologia, para a realização do processo de busca pelas melhores soluções de reforços, são considerados dois objetivos: a minimização do custo global e a minimização apenas do custo de perdas ativas. Em ambos os casos é empregada uma faixa de investimento como restrição ao problema. A busca é realizada a partir de Conjuntos de REs e RNs Candidatos, de dimensões reduzidas e obtidos por um algoritmo heurístico baseado em uma estrutura de árvore.

Para ajuste de parâmetros e validação da metodologia baseada em metaheurística, foi utilizado um sistema de subtransmissão real, que corresponde à área Leste do Sistema Cemig. Posteriormente, foi considerada a aplicação da metodologia a um

problema de maior porte, quando mais duas áreas do Sistema da Cemig (Centro e Norte) foram incorporadas ao estudo. Em ambos os casos a metodologia proporcionou bons resultados, principalmente para o problema de maior porte (que demanda maior quantidade de reforços e possui elevado número de ramos existentes e novos), para o qual a explosão combinatória torna-se muito mais acentuada. Os casos analisados para a definição do melhor ajuste de parâmetros da metaheurística demonstraram a robustez da metodologia. Os desvios percentuais apresentados pelas populações finais de cada execução evidenciam a qualidade das soluções encontradas pela metodologia proposta.

A segunda metodologia proposta nesta dissertação se baseia em um algoritmo heurístico construtivo, capaz de identificar boas alternativas de expansão para sistemas de subtransmissão. Durante o processo de busca, a metodologia procura capturar a atratividade dos ramos a serem adicionados à Configuração Base do sistema e para condições posteriores, ou seja, para configurações do sistema já reforçadas. A atratividade dos ramos é medida por meio de índices de desempenho.

A metodologia baseada no algoritmo heurístico construtivo foi também aplicada aos dois sistemas reais da Cemig. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência dos índices de desempenho considerados. Soluções com valores reduzidos de custo de perdas ativas de custo de investimento foram obtidas demandando tempos de processamento reduzidos.

Diante dos estudos realizados nesta dissertação é possível perceber que alguns aspectos podem ser aprimorados em estudos futuros. A seguir, são listadas propostas de continuidade deste trabalho:

 Incorporar a consideração de incertezas externas (e.g., nas taxas de remuneração do capital, na localização de novas fontes geradoras ou em cenários diferentes para o crescimento da carga ou de despacho do Caso Base) visando à identificação de redes de subtransmissão mais robustas.
 Para tal, podem ser aplicados critérios de auxílio ao processo de decisão, como por exemplo, a minimização do máximo arrependimento;

- Inserir no estudo a possibilidade de construção de linhas em ramos com outros níveis de tensão e/ou outros tipos de reforços, tais como recondutoramento, recapacitação, etc.;
- Tratar o planejamento da expansão da subtransmissão como um problema dinâmico, a fim de determinar quando os reforços devem ser inseridos no sistema ao longo do horizonte de planejamento;
- Elaborar mecanismos para a proposição de ajuste dos parâmetros mais importantes considerados nas técnicas utilizadas nas metodologias propostas, visando torná-las mais robustas e "insensíveis" às dimensões do problema;
- Avaliar as configurações obtidas quanto a outros aspectos operativos além das perdas ôhmicas, tais como confiabilidade, perfil de tensão e nível de carregamento dos circuitos. Quanto à confiabilidade, vale destacar a necessidade de se obter critérios e valores de referência mais adequados aos sistemas de subtransmissão, os quais, em função de suas características, não são capazes de suportar o critério N-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [A10] ANEEL. (2010, Janeiro) Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST. [Online]. http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_revisao_1.pdf
- [A04] ANEEL. (2004, Junho) Resulução Normativa nº 67. [Online]. http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2004067.pdf
- [BOA01] S. Binato, G. C. Oliveira, J. L. Araújo, "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 16, no. 2, pp. 247-253, May 2001.
- [BPG01] S. Binato, M. V. F. Pereira, S. Granville, "A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 16, pp. 235–240, May 2001.
- [CFU13] CEMIG, FAUF, UFJS, "Metodologia para Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição," São João del-Rei, 6º Relatório, Etapas 7, 8, 9 e 10 P&D 372, 2013.
- [C11] CEPEL, Programa Anarede Sistema Computacional para Análise de Redes, 2011.
- [DMC91] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni, "Positive Feedback as a Search Stratagy," *Technical Report*, no. 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- [DE73] Y. P. Dusonchet, A. H. El-Abiad, "Transmission Planning Using Discrete Dynamic Optimization," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, pp. 1358-1371, July 1973.
- [FBRF05] H. Faria Jr., S. Binato, M. G. C. Resende, D. M. Falcão, "Power Transmission Network Design by Greedy Randomized Adaptive Path

- Relinking," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 43-49, Feb 2005.
- [F75] R. Fischl, "Optimal System Expansion: A Critical Review," *System Engineering for Power: Status & Prospects*, ERDA & EPRI Conf., Henniker, 1975.
- [GMR98] R. A. Gallego, A. Monticelli, R Romero, "Comparative Studies on Nonconvex Optimization Methodos for Transmission Network Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 822-828, Aug 1998.
- [GRM00] R. A. Gallego, R. Romero, A. Monticelli, "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 490-495, May 2000.
- [G70] L. L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688-1697, Sep 1970.
- [GGSV09] E. Gutiérrez, T. Gómez, A. Sánchez, J. M. Vicente, "ANDREA: A Long-Term Dynamic Planning Tool for Subtransmission Electricity Networks," 6th International Conference on the European Energy Market, pp. 1-6, 2009.
- [JB10] S. Jalilzade, A. Bagheri, "A New Approach for Subtransmission System Expansion Planning with Genetic Alghorithm," *International Congress on Ultra Modern Telecomunications and Control Systems and Workshop*, pp. 381-388, 2010.
- [LRHM03] L. D. Latorre, J. M. Cruz, J. M. Areiza, A. Villegas, "Cassification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 938-946, 2003.

- [LE08] K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, "Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Application to Power Systems," *Wiley-IEEE Press*, 2008.
- [LRHM11] A. M. Leite da Silva, L.S. Rezende, L.M. Honório, L.A.F. Manso, "Perfromance Comparison of Meta-Heuristics to Solve the Multi-Stage Transmission Expansion Planning Problem," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011.
- [LRMR10] A. M, Leite da Silva, L. S. Rezende, L. A. F. Manso, L. C. Resende, "Reliability Worth Applied to Transmission Expansion Planning Based on Ant Colony System," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 10, pp. 1077-1084, 2010.
- [LSMR08] A. M. Leite da Silva, C. E. Sacramento, L. A. F. Manso, L. S. Rezende, L. C. Resende, W. S. Sales, "Metaheuristic Based Optimization Methods for Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs," Metaheuristic Based Optimization Methods for Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs. New York, USA: Nova Science Publishers, 2008, vol. 1, ch. 4, pp. 59-86.
- [LSRM06] A. M. Leite da Silva, W. S. Sales, L. C. Resende, L. A. F. Manso, C. E. Sacramento, L. S. Rezende, "Evolution Strategies to Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs," *Proceedings of the 9thPMAPS Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, Sweden, Jun 2006, pp. 11-15.
- [MARL12] L. A. Manso, P. E. Abreu, L. C. Resende, A. Leite da Silva, "Transmission Expansion Planning Including Unreliability Costs," The 12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems -PMAPS, 2012.
- [MRSL09] L. A. F. Manso, L. C. Resende, C. E. Sacramento, A. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, "Planejamento da Expansão da Transmissão sob Incertezas Internas e Externas," XX SNPTEE, Recife, Pernambuco, 2009.

- [MSRS12] L. A. F. Manso, F. L. Santos, L. C. Resende, W. S. Salles, A. M. Leite da Silva, A. F. Rocha, "Expansão de Sistemas de Subtransmissão com Enfoque em Aspectos Operativos," CBA - XIX Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1956-1962, Sep 2012.
- [MMSM11] I. M. Mendonça, T. G. Moreira, I. C. Silva Junior, A. L. M. Marcato, B. H. Dias, E. J. Oliveira, "Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Otimização por Enxame de Partículas," XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional SBPO, pp. 756-766, 2011.
- [MF02] V. Miranda, N. Fonseca, "EPSO Evolucionary Particle Swarm Optimization, a New Algorithm with Applications in Power Systems," *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, vol. 2, pp. 745-750, October 2002.
- [MSPC82] A. Monticelli, A. Santos Jr., M. V. F. Pereira, S. H. F. Cunha, B. J. Parker, J. C. G. Praça, "Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion," *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3919-3925, Oct 1982.
- [OSPC05] E. J. Oliveira, I. C. Silva, J. L. R. Pereira, S. Carneiro, "Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1616-1621, August 2005.
- [O13] ONS. (2013, Dezembro) Operador Nacional do Sistema Mapas do SIN. [Online]. http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx
- [PPCO85] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, S. H. F. Cunha, G. C. Oliveira, "A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3074-3083, Nov 1985.

- [R06] L. S. Rezende, Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão através de Otimização por Colônia de Formigas, 2006, Dissertação de Mestrado - UNIFEI.
- [R11] L. S. Rezende, Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão: Avaliação de Metaheurísticas e Critérios de Segurança, 2011, Tese de Doutorado - UNIFEI.
- [RLH09] L. S. Rezende, A. M. Leite da Silva, L. M. Honório, "Artificial Immune Systems and Differential Evolution Based Approaches Applied to Mult-Stage Transmission Expansion Plannig," 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, pp. 1-6, November 2009.
- [RMGH02] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, S. Haffner, "Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, no. 1, pp. 27-36, Jan 2002.
- [S07] C. E. Sacramento, Planejamento Dinâmico da Exapansão de Sistemas de Subtransmissão através de Metaheurísticas, 2007, Tese de Doutorado - UNIFEI.
- [S12] F. L. Santos, Planejamento da Expansão de Sistemas de Subtransmissão de Energia Elétrica, 2012, Dissertação de Mestrado -UFSJ.
- [S14] Scilab. (2014) Free Open Source Software for Numerical. [Online]. http://www.scilab.org/
- [SB11] H. Shayeghi, A. Bagheri, "Considering DG in Expansion Planning of Subtransmission System," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 1, pp. 357-362, Jan 2011.

- [S72] B. Stott, "Decoupled Newton Load Flow," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, pp. 1955-1959, 1972.
- [VGS85] R. Villasana, L. L. Garver, S. J. Salon, "Transmission Network Planning Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, pp. 349-356, 1985.