#### 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

# PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE REDES DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO O CUSTO DA CONFIABILIDADE

#### Paulo Eduardo Abreu

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 Ciências em Engenharia Elétrica.

Fevereiro de 2011

São João del-Rei – MG – BRASIL

### Paulo Eduardo Abreu

# PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE REDES DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO O CUSTO DA CONFIABILIDADE

Banca Examinadora
Orientador: Luiz Antônio da Fonseca Manso
Coorientador: Leonidas Chaves de Resende
Lucione de Coura Maulia
Luciano de Souza Moulin
Valceres Vieira Rocha e Silva

Dedico este trabalho, à minha esposa Daniela, aos meus pais Marcelo e Neuza, aos meus irmãos Ana Flávia, Leandro e Amanda, e à minha filha Ana Beatriz.

### **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela dádiva da vida e por ter me dado força e saúde para que este momento pudesse se tornar realidade.

Ao professor Luiz Antônio da Fonseca Manso, responsável por despertar o meu interesse na área de sistemas elétricos de potência, pela orientação e pelos ensinamentos, não apenas durante a realização desta dissertação, mas também ao longo de muitos anos de trabalho.

Ao professor Leonidas Chaves de Resende, pela orientação, confiança, disponibilidade, e acima de tudo, pelos valiosos ensinamentos durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa Daniela, por me acompanhar nos momentos mais marcantes de minha vida, pela sua paciência e, principalmente, pela sua dedicação em prol da nossa felicidade.

Aos meus pais, Marcelo e Neuza, pelos ensinamentos que levarei para o resto de minha vida, e por terem investido e acreditado na minha formação. Aos meus irmãos Ana Flávia, Leandro e Amanda pelas inúmeras demonstrações de incentivo e companheirismo.

Um agradecimento especial aos amigos e professores do PPGEL, pelas imprescindíveis contribuições no desenvolvimento desta dissertação. Serei eternamente grato.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

### **RESUMO**

O planejamento da expansão da transmissão (PET) é uma tarefa de otimização complexa, pois deve assegurar o atendimento da demanda, com nível de confiabilidade adequado, ao longo do horizonte de planejamento. Tradicionalmente o PET consiste em determinar, dentre um conjunto prédefinido de circuitos candidatos, aqueles que deverão ser incorporados ao sistema de forma a minimizar os custos de investimento, tendo a manutenção do nível de confiabilidade como uma das restrições do problema. Geralmente, o horizonte de planejamento é dividido em curto, médio e longo prazo, de acordo com o tipo de decisão a ser tomada e com a qualidade das informações envolvidas no processo de planejamento.

A grande maioria dos trabalhos aplicados ao problema PET, encontrados na literatura, é voltada para o planejamento determinístico, sendo utilizadas diversas técnicas de otimização. Em geral, somente os custos de investimento são considerados na função objetivo e as incertezas internas, como àquelas associadas à disponibilidade dos equipamentos de geração e transmissão, são ignoradas ou modeladas de forma bastante simplificada.

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo investigar, de maneira criteriosa, o impacto da consideração da confiabilidade no PET, através da inclusão do índice LOLC (Loss of Load Cost), o qual fornece o valor esperado do custo de interrupção do fornecimento de energia, na função de avaliação do problema. Para tal, é proposta uma nova metodologia baseada na metaheurística Estratégia de Evolução e na simulação Monte Carlo não sequencial. O objetivo central é realizar estudos de expansão que incluam a avaliação da confiabilidade na análise de todas as configurações de expansão geradas durante o processo de busca. A eficiência da metodologia proposta é ilustrada por meio de estudos de caso utilizando o sistema IEEE Reliability Test System.

### **ABSTRACT**

The transmission expansion planning (TEP) is a complex optimization task, since it should ensure the supply of demand, with appropriate level of reliability throughout the planning horizon. Traditionally the objective of the TEP is to determine, among a predefined set of candidate circuits, those that should be incorporated into the system in order to minimize investment costs, under reliability level restrictions. Generally, the planning horizon is divided into short, medium and long term, according to the type of decision to be made and the quality of information involved in the planning process.

The vast majority of studies applied to the TEP problem, found in the literature, it is focused on the deterministic planning and various optimization techniques are used. In general, only the investment costs are considered in the objective function and the internal uncertainties, as those associated with the availability of the generation and transmission equipments, are ignored or modeled in a simplified way.

This dissertation aims to investigate, in a careful way, the impact of consideration of the reliability in the TEP problem, by including the index LOLC (Loss of Load Cost), which provides the expected cost of unsupplied energy, in the total cost objective function. For such, it is proposed a new methodology based on Evolution Strategy metaheuristic and also on the non-sequential Monte Carlo simulation. The central objective is to perform expansion planning studies that include the reliability assessment in the evaluation of the expansion configurations generated during the searching process. The efficiency of the proposed methodology is illustrated through case studies using the IEEE Reliability Test System.

## **SUMÁRIO**

LIST	A DE I	FIGURAS	ix
LIST	A DE	ΓABELAS	x
LIST	A DE	ABREVEATURAS E SÍMBOLOS	xi
CAPÍ	TULO	1: INTRODUÇÃO	1
1.1	CO	NSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	RE	VISÃO DE LITERATURA	5
1.3	СО	NCLUSÕES	8
1.4	ES	TRUTURA DA DISSERTAÇÂO	9
CAPÍ	TULO	2: PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO	. 11
2.1	INT	RODUÇÃO	11
2.2	LIN	IHAS DE ABORDAGEM	11
	2.2.1	Planejamento Estático	12
	2.2.2	Planejamento Dinâmico	12
	2.2.3	Planejamento Determinístico	13
	2.2.4	Planejamento Não Determinístico: Incertezas Internas	15
	2.2.5	Planejamento Não Determinístico: Incertezas Externas	16
2.3	PR	OCESSO DE OTIMIZAÇÃO	17
	2.3.1	Modelos Matemáticos	17
	2.3.2	Modelos Heurísticos	18
	2.3.3	Modelos Meta-Heurísticos	21
2.4	СО	NSIDERAÇÃO DA CONFIABILIDADE	25
2.5	co	NCLUSÕES	28

CAPÍ	TULO 3: PLANEJAMENTO COM CONFIABILIDADE A PRIORI	29
3.1	INTRODUÇÃO	29
3.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	29
3.3	APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA ES AO PROBLEMA PET	31
3.4	INICIALIZAÇÃO INTELIGENTE	33
3.5	AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA	36
3.6	IMPLEMENTAÇÃO DE HEURÍSTICAS	38
3.7	ARMAZENAMENTO DE DECISÕES	40
3.8	CONCLUSÕES	43
CAPÍ	TULO 4: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	44
4.1	INTRODUÇÃO	44
4.2	PARÂMETROS DA META-HEURÍSTICA	44
4.3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZADO	45
4.4	RESULTADOS	52
	4.4.1 Caso 1 – Investimento e corte de carga	52
	4.4.2 Caso 2 – LOLC a posteriori	53
	4.4.3 Caso 3 – LOLC a <i>priori</i>	55
4.5	CONCLUSÕES	64
CAPÍ	TULO 5: CONCLUSÕES	65

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 4.1: Curva Cronológica da Carga – Semana Pico	46
Figura 4.2: Sistema IEEE-MRTS	47
Figura 4.3: Diagrama unifilar da melhor solução encontrada para o Caso 3	57
Figura 4.4: Melhores soluções obtidas para cada valor de UC	62

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1: Dados de linhas de transmissão para área de 138 kV	48
Tabela 4.2: Dados dos transformadores 230/138 kV.	48
Tabela 4.3: Dados de linhas de transmissão para área de 230 KV	49
Tabela 4.4: Dados dos novos ramos/circuitos	. 50
Tabela 4.5: Dados estocásticos para área de138 KV.	. 50
Tabela 4.6: Dados estocásticos para área de 230 KV	. 51
Tabela 4.7: Dados estocásticos para os novos ramos	. 51
Tabela 4.8: Dados estocásticos para os transformadores	. 52
Tabela 4.9: Resultados para o Caso 1.	. 53
Tabela 4.10: Resultados para o Caso 2.	. 54
Tabela 4.11: Resultados para o Caso 3.	. 56
Tabela 4.12: Resultados para o Caso 3 com UC = US\$ 2.000,00 por MWh	. 58
Tabela 4.13: Resultados para o Caso 3 com UC = US\$ 500,00 por MWh	. 59
Tabela 4.14: Resultados para o Caso 3 com UC = US\$ 250,00 por MWh	60
Tabela 4.15: Reforços adicionados nas melhores soluções encontradas em cada estudo.	. 63

### LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

ACO – Ant Colony Optimization

AIS – Artificial Immnune Systems

CHA – Constructive Heuristic Algorithm

DE – Differential Evolution

EA – Evolutionary Algorithm

EENS - Expected Energy not Supplied

EPSO – Evolutionary Particle Swarm Optimization

ES – Evolution Strategies

FS - Fuzzy Sets

GA – Genetic Algorithms

GRASP - Greedy Randomized Search Procedure

LOLC – Loss of Load Cost

MTTR – Mean Time To Repair

NPL – Nonlinear Programming

PET – Planejamento da Expansão da Transmissão

PL – Programação Linear

PSO – Particle Swarm Optimization

SI – Swarm Intelligence

SMC – Simulação Monte Carlo

SS – Scatter Search

TS – Tabu Search

### **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O planejamento da expansão da transmissão (PET) é um problema clássico de sistemas de energia elétrica, e tem por finalidade encontrar o plano ótimo de expansão. O PET consiste em especificar quais os circuitos (linhas de transmissão e/ou transformadores) que deverão ser instalados na rede, a fim de permitir uma operação viável num ano-horizonte pré-definido a um custo mínimo. Os dados desse problema geralmente são: a topologia atual (ano base), os circuitos candidatos, a geração e a demanda para o ano-horizonte e as restrições de investimento.

Devido à característica discreta dos investimentos, o PET se configura em um problema de programação não linear e inteira mista. A principal dificuldade na sua resolução esta relacionada à natureza combinatória do processo de planejamento que normalmente leva a um número explosivo de alternativas, inclusive no caso de sistemas de médio porte. O problema PET apresenta ainda uma estrutura multimodal com elevado número de ótimos locais, o que leva a maioria dos métodos aproximados a convergir numa solução ótima local e às vezes não satisfatória. Devido a estas dificuldades, inúmeras propostas de soluções para o problema PET são encontradas na literatura especializada [BPG01,EGR04,FBRF05,LCAV03,RM94].

Geralmente, o horizonte de planejamento é dividido em curto, médio e longo prazo. Considerado o planejamento de longo prazo, o PET pode ser classificado através de linhas de abordagem que diferem entre si em função da consideração de incertezas, da interferência do planejador e da evolução temporal dos reforços.

Quanto à consideração de incertezas, têm-se as linhas:

- Determinística: Numa abordagem essencialmente determinística, a adição de reforços é baseada nos custos de investimento para um sistema com rede intacta e/ou considerando uma lista de contingências (e.g., critério "N-1" e "N-2"). Aspectos relacionados às incertezas são negligenciados ou muito simplificados. A demanda de potência futura é caracterizada por meio de cenários futuros mais ou menos otimistas e ponderações são feitas em relação às taxas de juros. Em geral, uma decisão baseada somente na utilização desse critério pode conduzir a investimentos elevados, além de não garantir níveis adequados de confiabilidade ao sistema.
- Não determinística: Numa abordagem não determinística várias incertezas são associadas ao processo de planejamento. Estas, por sua vez, podem ser divididas nas seguintes categorias:
  - Incertezas Externas: Envolvem indefinições relacionadas aos seguintes aspectos: taxas de interesse e câmbio; projeções de mercado (demanda e energia); regras do novo ambiente competitivo; custos de combustíveis; restrições ambientais; afluências hidrológicas; novas tecnologias, etc;
  - Incertezas Internas: Envolvem indefinições relacionadas às disponibilidades de equipamentos. O desempenho das redes pode ser avaliado mediante índices de confiabilidade, incluindo índices de custos de produção e interrupção de energia. Geralmente, o comportamento de incertezas inerentes aos sistemas elétricos é representado por meio de modelos estocásticos.

Em função da interferência do planejador podem ser definidas as abordagens:

- Automática: um algoritmo computacional é que define as decisões em relação à expansão da rede, sem a interferência do planejador;
- Interativa: o planejador interage com o algoritmo computacional, utilizando sua experiência para auxiliar na tomada de decisões ou estudos complementares.

Com relação à evolução temporal dos reforços, têm-se as abordagens:

- Estática: o planejador procura obter o conjunto ótimo de decisões de investimento para um determinado horizonte de planejamento. Nesta abordagem, o planejador está interessado em encontrar o estado ótimo final da rede para uma determinada situação futura.
- Dinâmica: a solução do problema de expansão deve produzir respostas a três questões básicas: quais reforços serão necessários, e ainda, onde e quando eles serão alocados na rede elétrica. Assim, o modelo de otimização deve minimizar o valor presente dos custos envolvidos na sua função objetivo.

Enfim, conclui-se que a expansão de sistemas de transmissão é um problema essencialmente dinâmico, de natureza não determinística, e que os estudos de planejamento devem considerar ao máximo as incertezas relacionadas ao processo. Ademais, processos de planejamento considerando todos estes aspectos dificilmente podem ser enfrentados utilizando-se apenas ferramentas automáticas, sendo o planejador essencial no processo de tomadas de decisões.

Para a solução do problema de planejamento, normalmente utilizam-se três conjuntos distintos de ferramentas:

- i) O primeiro conjunto de ferramenta baseia-se na análise das possíveis configurações do sistema de potência por um conjunto de programas já usualmente conhecidos: fluxo de potência (linear ou não linear), curtocircuito, estabilidade transitória, etc;
- ii) O segundo se refere à consideração de incertezas, sendo que técnicas probabilísticas e baseadas em *Fuzzy Sets* (FS) podem ser utilizadas na sua modelagem. 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, como as disponibilidades dos componentes. No entanto, 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 baseadas em FS pode ser mais conveniente. Por fim, vale ressaltar a existência de aplicações baseadas em técnicas de cenários e análise via árvores de decisões em sistemas elétricos de potência;
- iii) O terceiro conjunto está relacionado às técnicas de otimização, cujo objetivo principal é minimizar todos os custos envolvidos na função objetivo da expansão de redes de transmissão: investimento, operação e manutenção, perdas, interrupção, multas, etc. Ferramentas tradicionais de programação matemática e métodos heurísticos e meta-heurísticos são utilizados e incluem programação linear, não linear, dinâmica, inteira e/ou mista.

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

Essa dissertação aborda o problema do planejamento estático da expansão da transmissão considerando uma representação detalhada das incertezas internas. Para isto, o valor esperado do custo de interrupção do fornecimento de energia, dado pelo índice LOLC (Loss of Load Cost), é diretamente incorporado à função objetivo do problema, durante o processo de busca das melhores alternativas. Com a avaliação da LOLC é possível obter soluções de mínimo custo global, correspondente ao somatório dos custos de investimento e dos custos de interrupção de energia. Portanto, as decisões de expansão obtidas deverão assegurar um melhor balanço entre a minimização do investimento e o atendimento da demanda, com nível de confiabilidade adequado.

### 1.2 REVISÃO DE LITERATURA

Até a década de 70, o trabalho de planejar reforços em sistemas de transmissão era uma tarefa relativamente simples, onde apenas ferramentas de análise (e.g. fluxo de potência) eram utilizadas. Existiam poucas alternativas de expansão e as incertezas da demanda e fontes energéticas eram mínimas. Os planejadores eram os únicos responsáveis por definir *onde*, *quando* e *quais* reforços deveriam ser inseridos no sistema de transmissão.

A partir dos anos 70, houve um notório crescimento das redes e uma maior disponibilidade de recursos computacionais. Estes fatores contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento de programas baseados em técnicas de otimização com tendência para o planejamento automático [G70,DE73,F75].

Nos últimos anos, tem se observado um crescimento das pesquisas na área de modelos e técnicas de solução utilizadas no problema da expansão da transmissão. Uma grande quantidade de artigos e relatórios tem sido publicada na literatura especializada, devido principalmente à melhoria do desempenho dos computadores, ao surgimento de novos algoritmos de otimização e ao maior nível de incerteza introduzido pela nova regulamentação do setor elétrico [BK93,RQ98,LCAV03].

A dimensão dos atuais sistemas de transmissão, a natureza discreta das decisões de investimentos, o comportamento aleatório dos equipamentos de geração e transmissão, as incertezas no crescimento da carga e na localização de novas fontes de geração tornam o planejamento de expansão da transmissão um problema combinatório, estocástico e de grande complexidade. Dessa forma, a escolha de um modelo que represente adequadamente o problema torna-se essencial para a obtenção de bons resultados.

Os modelos determinísticos de planejamento de sistemas utilizados ao longo das últimas três décadas podem ser classificados como matemáticos e heurísticos. Alguns modelos, no entanto, fazem uma combinação destas duas vertentes e podem ser denominados meta-heurísticos [LCAV03]. Os modelos matemáticos utilizam técnicas clássicas de otimização como as programações: linear [G70,VGS85], dinâmica [DE73], não linear [YH89] e inteira mista [SSL89,BOPG01,AMC03]. Técnicas como a decomposição de Benders podem ser aplicadas para desacoplar os subproblemas: investimento e operação [PPC085,BPG01]. Dois fortes obstáculos à utilização destes modelos são a não linearidade e a não convexidade presentes no estudo da expansão da transmissão. Esta última característica pode acarretar na obtenção de ótimos locais.

Os modelos heurísticos e meta-heurísticos utilizam técnicas de otimização que, passo a passo, realizam um processo de geração, avaliação e seleção de opções de expansão. Estes modelos são mais atrativos, pois podem obter boas (i.e., economicamente competitivas) soluções factíveis a um baixo custo computacional. Ao mesmo tempo o processo de otimização pode utilizar estratégias que procuram evitar o aprisionamento em vales da função objetivo e, consequentemente, reduzem o risco de obtenção de mínimos locais de baixa qualidade.

Os modelos baseados em meta-heurísticas [LSMRRS09] têm apresentado um excelente potencial para encontrar boas soluções factíveis, mas não necessariamente ótimas. O sucesso destes modelos está relacionado à sua habilidade de evitar ótimos locais. Estes modelos podem fornecer soluções de

alta qualidade, com um tempo computacional aceitável, até mesmo para problemas de grande porte. Várias meta-heurísticas vêm sendo estudadas para resolver problemas PET [LSMRRS09], tais como: Busca Tabu (*Tabu Search* – TS) [GRM00,LMRR08]; Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* – GA) [EGR04]; Procedimento de Busca Aleatória Gulosa (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* – GRASP) [FBRF05]; Estratégias de Evolução (*Evolution Strategies* – ES) [LSRMSR06,MSLRSR07]; Evolução Diferencial (*Differential Evolution* – DE) [STIS07]; Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO) [R06,RLM08,LRMR10]; Otimização por Enxame Evolucionário de Partículas (*Evolutionary Particle Swarm Optimization* – EPSO) [MF02], Busca Dispersa (*Scatter Search* – SS) [FGMV96] e Sistema Imunológicos Artificiais (*Artificial Immnune Systems* – AIS) [RLH09].

A maior parte dos trabalhos desenvolvidos para a resolução de problemas PET emprega modelos lineares para a representação e avaliação das configurações de expansão. Em [RMGH02], são discutidos quatro modelos lineares: modelo DC, modelo de transporte, modelo híbrido e o modelo disjunto.

Atualmente são raros os trabalho que utilizam modelos não lineares (modelo AC) como parte do processo de otimização, sendo poucos trabalhos a considerar o assunto [Y01,SRC02,DLLW06,RGR07]. O modelo AC oferece vantagens tais como eficiente alocação de reforços, cálculo preciso de perdas no sistema e incorporação de operação de equipamentos não lineares. Entretanto, esse modelo apresenta dificuldade em ser adequado a uma eficiente técnica de otimização e de trabalhar com problemas de maior porte.

Portanto, a utilização deste modelo se mostra inviável caso seja considerada uma abordagem dinâmica e/ou incertezas na resolução do PET, sobretudo para sistemas de grande porte. Acredita-se que a aplicação do modelo AC seja mais adequada em uma segunda fase do planejamento, quando se deseja avaliar com maiores detalhes os planos já obtidos numa primeira fase do processo de otimização.

Para garantir o correto atendimento à demanda, os estudos de expansão devem considerar incertezas relativas à disponibilidade de equipamentos. Contudo, ao considerar tais incertezas, a função objetivo do problema se torna extremamente complexa e cara do ponto de vista computacional. Devido a esta dificuldade, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura utiliza o planejamento determinístico, não assegurando nas suas decisões níveis de confiabilidade adequados.

Alguns trabalhos, no entanto, realizam a avaliação da confiabilidade somente numa segunda fase do processo de busca [LSRMSR06,LMRR08,RLH09], 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. Estes modelos, apesar de incluir o estudo da confiabilidade no planejamento, não garantem o melhor balanço entre investimento e confiabilidade, pois a confiabilidade não está diretamente incluída na função objetivo, durante o processo de busca, i.e., a *priori*. Na literatura, até o momento, não foram encontrados trabalhos que utilizam a confiabilidade a *priori* nos estudos de expansão da transmissão, sendo esta a principal contribuição desta dissertação.

### 1.3 CONCLUSÕES

O presente capítulo apresentou conceitos gerais relacionados ao problema do planejamento da expansão da transmissão, o qual tem por finalidade determinar não apenas quais, e onde, reforços serão incorporados ao sistema, mas também o instante em que eles serão instalados. Dentre as ferramentas de otimização desenvolvidas nas últimas décadas empregadas no planejamento determinístico, as heurísticas e meta-heurísticas demonstraram ser mais eficazes por possuírem uma grande capacidade para encontrar soluções economicamente competitivas, principalmente na avaliação de sistemas de grande porte.

A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura utiliza modelos lineares na resolução do problema PET. Dentre eles, o modelo DC é atualmente o

modelo matemático mais aceito para representar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Os principais motivos para essa opção estão na diversidade de técnicas de solução capazes de resolvê-lo de maneira adequada e na precisão do modelo quando aplicado a estudos de planejamento de longo prazo.

Por outro lado, o uso de modelos não lineares ainda parece ser inviável numa primeira fase do problema PET, devido à dificuldade em ser adequado a um algoritmo de otimização eficiente e trabalhar com grandes problemas de programação não linear.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos descritos, de forma resumida, a seguir.

O presente capítulo teve como objetivo introduzir o problema PET, ressaltando a sua relevância e complexidades. Foram apresentadas algumas razões pelas quais se justifica a aplicação de técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas na resolução do problema PET. Identificaram-se, ainda, os fatores que têm inviabilizado a inclusão do valor da confiabilidade, ou custo de interrupção do fornecimento de energia, na função objetivo do problema, durante o processo de busca das melhores alternativas.

O Capítulo 2 apresenta as linhas de abordagem mais utilizadas e uma revisão das principais técnicas de otimização empregadas nas últimas décadas na resolução do problema PET. Nesta revisão, são discutidas as características dos principais algoritmos desenvolvidos nos últimos anos, sendo dada especial atenção à meta-heurística ES, a qual é utilizada no desenvolvimento desta dissertação. Ao final, é uma feita uma análise sobre a consideração da confiabilidade durante o processo de busca de soluções de mínimo custo global.

Inicialmente, o Capítulo 3 mostra a formulação matemática para o problema da expansão considerando o custo da confiabilidade na função objetivo do problema. Em sequência, é apresentado o mecanismo utilizado para a construção da população inicial inteligente, e realizada a definição dos parâmetros da meta-heurística ES. Posteriormente, são apresentadas duas heurísticas e um mecanismo de armazenamento das soluções, os quais são utilizados com o objetivo de reduzir o esforço computacional. Por fim, é discutida a importância da confiabilidade no problema PET e justificado o emprego da simulação Monte Carlo (SMC) não sequencial pela metodologia proposta.

Os dados referentes ao sistema teste empregado e os parâmetros utilizados na meta-heurística ES são expostos no Capítulo 4. São apresentados também, os resultados obtidos para diferentes estudos de caso considerando: apenas investimento, investimento e LOLC a *posteriori* e investimento e LOLC a *priori*.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões dos estudos realizados e as propostas de trabalhos futuros.

### **CAPÍTULO 2**

# PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

### 2.1 INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão de sistemas elétricos, em particular da transmissão, é uma área complexa que busca suprir a demanda prevista, ao longo do horizonte de planejamento, e, ao mesmo tempo, minimizar o investimento necessário. O principal objetivo é definir não somente os locais e os tipos de investimentos, mas o momento mais adequado para que tais investimentos sejam realizados, de modo que os crescimentos contínuos, da demanda e da geração, sejam sempre assimilados de forma otimizada pelo sistema.

Neste capítulo, são apresentados as linhas de abordagem utilizadas no problema PET e os conceitos das técnicas mais empregadas na resolução de problemas de otimização, e discutidos aspectos referentes à consideração da confiabilidade no planejamento.

#### 2.2 LINHAS DE ABORDAGEM

O horizonte de planejamento para o problema da expansão da transmissão é dividido em curto, médio e longo prazo. Em se tratando de horizontes de médio e longo prazo (10 anos ou mais), o PET pode ser classificado em diferentes linhas de abordagem. Nesta seção serão apresentadas as linhas de abordagem: Interativa ou Automática; Estática ou Dinâmica; Determinística ou Não determinística.

Na abordagem automática, as decisões de expansão da transmissão são realizadas por meio de um programa de planejamento automático. Neste caso, o planejador não tem qualquer interferência na tomada de decisão, sendo todo

o trabalho realizado pelo software. Já na abordagem interativa, o planejador interage com o algoritmo de expansão por meio da sua própria experiência. Esta interação também pode ocorrer por meio de estudos complementares realizados pelo planejador, visando um maior detalhamento do problema.

### 2.2.1 Planejamento Estático

Na abordagem estática, o sistema elétrico de potência possui uma configuração corrente (topologia inicial) e tem como objetivo chegar a um cenário futuro estimado (topologia final) por meio do melhor plano de expansão (adição de novos circuitos) para o sistema. O planejamento estático consiste em definir, para um horizonte de planejamento, a localização e o número de reforços necessários à expansão do sistema sem se preocupar com o aspecto temporal de adição dos mesmos. Em outras palavras, definir *onde* e *quais* circuitos devem ser alocados para que o sistema opere adequadamente considerando-se o crescimento previsto para a geração e demanda de energia elétrica. Por apresentar um nível de complexidade menor do que a abordagem dinâmica, grande parte dos trabalhos encontrados na literatura fazem uso desse modelo de planejamento. Assim, é possível realizar estudos incluindo vários tipos de incertezas e desenvolver novos modelos que visem não somente minimizar custos de investimentos, caracterizando o processo de otimização como um problema de multicritérios.

#### 2.2.2 Planejamento Dinâmico

Na abordagem dinâmica, a dimensão e o nível de complexidade dos sistemas proporcionam um elevado número de variáveis e restrições a serem consideradas, exigindo um maior esforço computacional para se encontrar os melhores planos. Isto se deve ao fato do planejamento dinâmico definir não apenas a localização e o número de reforços necessários, mas também a evolução temporal destas decisões. Devido à complexidade deste tipo de abordagem, apenas uma pequena parcela de trabalhos encontrados na literatura se dedica ao planejamento dinâmico. Aspectos relacionados a

incertezas dificilmente são tratados, e quando tratados, utilizam modelos simplificados.

A abordagem dinâmica, por muitas vezes, é implementada como a resolução de uma sequência de problemas estáticos, sendo o horizonte de planejamento dividido em estágios. Esta implementação obteve resultados satisfatórios ao considerar várias ordens de prioridade de avaliação destes estágios [R06,MSLRSR07,S07,LMRR08,RLM08,LSMRRS09]. Por princípio, a abordagem dinâmica é a que permite uma maior coordenação entre os reforços alocados ao longo do horizonte de planejamento, devendo, portanto, proporciona os melhores resultados [EGR04].

### 2.2.3 Planejamento Determinístico

Os modelos determinísticos têm a finalidade de encontrar configurações de expansão que minimizem tanto os custos de investimento quanto os custos de interrupção, advindos de cortes de carga, para a condição da rede intacta. Em alguns modelos, o planejamento também é realizado mediante ao critério chamado "N-1" (contingência simples). Em ambos os casos, aspectos relacionados às incertezas são negligenciados, contudo, os modelos determinísticos podem ser ferramentas importantes numa etapa inicial do planejamento, tendo a finalidade de reduzir o número de alternativas a serem investigadas por modelos mais completos.

Entre os trabalhos baseados na abordagem determinística, a grande maioria visa à minimização dos investimentos necessários para a eliminação do corte de carga, considerando a condição de rede intacta [LCAV03]. Somente uma pequena parcela [MSPCPP82,SSL89,SRRGM05,YHJX05,XZW07,TGS08] inclui o critério determinístico "N-1". A grande dificuldade da inclusão deste critério nos modelos diz respeito ao elevado esforço computacional necessário para se avaliar os planos de expansão candidatos mediante a ausência de qualquer um dos equipamentos do sistema de transmissão.

Uma das estratégias adotadas para a redução do esforço computacional exigido no PET consiste em utilizar o critério da rede intacta, em uma fase inicial, e aplicar uma lista de contingências somente aos melhores planos encontrados na primeira fase [MSPCPP82,SSL89,YHJX05]. Contudo, após esta inclusão de restrições de segurança (estática, i.e., considerando apenas a indisponibilidade adequação operativa do sistema mediante а equipamentos), não se pode garantir que os planos de expansão obtidos correspondam às melhores alternativas para o sistema estudado, tanto do ponto de vista da minimização de investimentos quanto da melhoria da confiabilidade.

A literatura indica que a consideração de uma lista de contingências que inclua todos os equipamentos pode se tornar inviável para sistemas de grande porte. Portanto, deve-se criar uma lista composta apenas pelos equipamentos mais críticos do sistema. Contudo, a criação de tal lista não é uma tarefa trivial, já que os equipamentos críticos podem ser diferentes para configurações distintas. Quando a abordagem dinâmica é tratada, este problema se torna ainda mais complexo, pois a criação de listas deve considerar as novas condições de carga e de geração para cada horizonte do planejamento.

Uma segunda estratégia consiste em incluir o critério "N-1" como parte problema, é, durante criação dos planos isto а [SRRGM05,XZW07,TGS08]. A consideração de restrições de segurança como parte do problema proporciona soluções diferentes de quando o problema é tratado em duas fases. No entanto, principalmente para sistemas de médio e grande porte, torna-se inviável a utilização desta metodologia uma vez que o número de análises realizadas pela função de avaliação aumenta substancialmente.

Portanto, o benefício de se usar o critério "N-1", baseado em uma lista de contingências, está relacionado a encontrar uma rede de transmissão mais robusta, a qual não se refere a um plano ótimo, já que as listas de contingências podem sofrer alterações na consideração de diferentes planos de expansão. A solução para este problema seria definir uma área de interesse

onde o critério "N-1" deva ser respeitado, resultando em um menor número de contingências a ser considerado para cada plano de expansão candidato.

Outra forma de se incluir critérios de segurança no estudo do PET é analisar índices de desempenho do sistema, obtidos por meio da avaliação da confiabilidade, conforme apresentado na próxima subseção.

#### 2.2.4 Planejamento Não Determinístico: Incertezas Internas

No planejamento em que são consideradas incertezas internas o objetivo é minimizar os custos envolvidos, levando em consideração incertezas inerentes ao sistema elétrico, como a indisponibilidade de equipamentos. Dentre os custos considerados podem ser citados os custos de produção, de investimento, de perdas na rede de transmissão e de interrupção de energia. Os custos de interrupção são obtidos por meio de índices de desempenho, tais como o índice LOLC.

Sendo o nível de confiabilidade uma variável do processo de otimização, é possível a obtenção de alternativas com baixo custo global e deteriorada qualidade no fornecimento de energia. Para evitar estas alternativas, alguns trabalhos [LPMM97,A97] propõem que as decisões de reforços sejam tomadas com base em índices de risco do custo de interrupção.

Existem diversos trabalhos na literatura que relacionam explicitamente os investimentos realizados à melhoria da confiabilidade do serviço prestado, mediante a avaliação de seus custos e benefícios econômicos [B04,WB93,BSS88]. Entretanto, a adoção de aproximações no cálculo do valor da confiabilidade tem restringido a aplicação desses trabalhos. Tais aproximações se referem a simplificações na utilização do custo unitário de interrupção de energia e incapacidade dos modelos de avaliação da confiabilidade em representar a evolução cronológica de cada interrupção. Uma discussão mais detalhada acerca da consideração da confiabilidade na solução do PET é deixada para a Seção 2.4.

### 2.2.5 Planejamento Não Determinístico: Incertezas Externas

Nas últimas décadas, o setor elétrico está sendo submetido a mudanças no mundo inteiro. Entre estas mudanças está a nova regulamentação do setor de geração de energia elétrica, o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição, alterações na regulamentação econômica, crescente preocupação com os impactos ambientais da produção e uso da eletricidade, e aumento da oposição pública à construção de linhas de transmissão [CIGRE93]. Além disso, têm-se verificado consideráveis incertezas quanto: ao futuro crescimento da carga, à disponibilidade e preços dos combustíveis e aos custos e tempos de construção de diferentes reforços. Para enfrentar essa realidade um novo modelo de atuação chamado Planejamento Integrado de Recursos (*Integrated Resource Planning* – IRP) foi desenvolvido [HG90,BSZ95a,BSZ95b]. O IRP avalia de forma consistente os recursos do lado da demanda e os recursos de fornecimento objetivando atender as necessidades dos consumidores, ao mais baixo custo econômico e social.

Para fazer frente às incertezas citadas anteriormente devem ser adotados planos de expansão flexíveis, capazes de adaptar a expansão planejada para o sistema, de forma rápida e a custos razoáveis, mediante mudanças não previstas em relação às condições presentes à época do planejamento [CIGRE95]. Para este fim, os métodos mais adequados são a técnica de cenários e a análise via árvore de decisões [GCCP93] para a obtenção das chamadas estratégias de expansão. Apesar dos constantes progressos na capacidade de desempenho dos computadores, a aplicação destes métodos é ainda muito limitada. Em geral, os trabalhos divulgados analisam um número muito reduzido de cenários, especialmente para o caso da transmissão [ML04], o qual apresenta requisitos computacionais mais elevados.

Uma forma mais simples de considerar incertezas externas é a definição de redes mais robustas, capazes de suportar os cenários futuros. Entretanto, para que a solução obtida não apresente uma baixa relação benefíciocusto, é necessário utilizar técnicas específicas para a tomada de

decisão, como, por exemplo, a minimização do máximo arrependimento [CIGRE95,FSGA96,MRSLR09].

Nota-se, portanto, que um dos principais desafios para o planejador é a identificação das incertezas mais relevantes, para que se possa dotar o sistema de meios para superá-las. Em princípio, as incertezas externas que devem receber mais atenção, no caso brasileiro, devem estar associadas à projeção de carga, à localização de novos produtores (geração distribuída) e à configuração futura do sistema elétrico.

### 2.3 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Nesta seção, é dada atenção as técnicas otimização mais utilizadas para o problema PET. Estas técnicas utilizam modelos que podem classificados como: matemáticos, heurísticos e meta-heurísticos.

#### 2.3.1 Modelos Matemáticos

Nas últimas três décadas, diversas técnicas de otimização têm sido desenvolvidas com o objetivo de encontrar as melhores configurações de expansão para o problema PET. Salienta-se que uma parte dos trabalhos desenvolvidos utiliza técnicas clássicas de otimização, sendo classificadas como modelos matemáticos. Com esta característica podem ser citadas as programações: linear [G70,VGS85], dinâmica [DE73], não linear [YH89] e inteiro mista [SSL89,BOPG01,AMC03]. Em um dos primeiros modelos [G70], o problema foi formulado como um problema de fluxo e usado um algoritmo de programação linear (PL) para encontrar as rotas diretas do parque de geração às cargas. Os reforços são feitos nos pontos de maior sobrecarga e um novo fluxo linear é analisado.

O trabalho [AMC03] apresenta uma técnica baseada em programação linear inteiro mista incluindo a consideração de perdas ativas na solução do problema PET com abordagem estática. O modelo proposto minimiza os custos de investimento de novas linhas e os custos de operação das unidades geradoras.

As duas principais contribuições deste trabalho são: uma rigorosa representação de perdas, por meio de expressões lineares, e uma formulação para expansão de transmissão mediante a programação linear inteiro mista, a qual prescinde da decomposição de Benders. Apesar de fornecer soluções mais caras, a consideração de perdas pode fornecer alternativas de reforços mais consistentes, reduzindo gastos com os futuros ajustes do plano de expansão.

Um forte obstáculo à utilização destes modelos é a não linearidade (a formulação envolve o produto entre as variáveis: ângulo da tensão de barra e decisão de reforços). Em razão disto, alguns trabalhos [OBP07,GCGR09] utilizam uma formulação denominada disjuntiva para transformar o problema de programação inteira mista não linear em um problema de programação linear inteira mista através da substituição de equações de igualdades não lineares por equações de desigualdades lineares.

#### 2.3.2 Modelos Heurísticos

Os modelos heurísticos baseiam-se na realização de adições e remoções de reforços, de uma forma eficiente, analisando soluções interessantes do problema. O fato de adicionar e remover reforços guia o processo de busca em direção a soluções de alta qualidade. A definição de reforços nestes modelos é geralmente obtida realizando buscas direcionadas por regras lógicas e/ou sensibilidades sensibilidades (regras heurísticas). Tais podem estar relacionadas ao corte de carga [PP85], ao critério do mínimo esforço que visa uma melhor distribuição dos fluxos de potência [MSPCPP82] ou ainda o critério que estima o benefício em termos do índice de carga não suprida, o qual é baseado em mudanças nas susceptâncias dos ramos a partir de adições de novos reforços [BOA01].

Um tratamento interativo para o problema da expansão de longo prazo é proposto na referência [MSPCPP82], a qual incorpora análises de sensibilidade, fluxo de potência DC e análise de contingências. Este processo de planejamento é dividido em duas fases. Na primeira fase, os reforços são

automaticamente adicionados de modo a eliminar todas as sobrecargas do sistema. O critério de adição de reforços, denominado de mínimo esforço, visa uma melhor distribuição dos fluxos de potência. O sistema obtido é novamente reforçado, em uma segunda fase, quando são considerados os efeitos das contingências (remoção de circuitos) simples mais severas. Como todo processo interativo, a metodologia proposta não identifica a solução ótima. No entanto, ela é capaz de fornecer boas alternativas de reforços.

Técnicas como a Decomposição de Benders também têm sido usadas com o intuito de separar os subproblemas de investimentos e operação [PPCO85,BPG01]. Inicialmente, o subproblema de investimento seleciona um plano preliminar e, posteriormente, o subproblema de operação analisa o mesmo indicado 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. Em [TGS08], o subproblema de segurança também é considerado através do critério "N-1".

Em [RM94] um tratamento hierárquico é dado à representação da rede de transmissão. Neste trabalho, o processo de otimização começa com uma representação simples da rede (modelo de transporte). Em seguida é adotado um modelo híbrido, com utilização do modelo de transporte para novos circuitos e de fluxo de potência linearizado (fluxo DC) para circuitos existentes. O processo termina com a aplicação do fluxo DC a todos os circuitos. Em todas as fases a técnica de Decomposição de Benders é empregada para resolver os subproblemas de investimentos e de operação. Um Algoritmo Heurístico Construtivo (CHA - Constructive Heuristic Algorithm) é desenvolvido em [RRMM03], para a solução do problema PET. Um modelo de transporte, o qual consiste em eliminar as restrições não lineares do modelo DC, é usado para avaliar os planos candidatos. De forma a indicar os melhores pontos da rede a serem reforçados, são utilizados índices de sensibilidade baseados no carregamento das linhas de transmissão. Como as decisões são locais, posteriormente, uma tentativa de retirada de reforços excedentes é realizada seguindo uma ordem dos mais dispendiosos. A metodologia é aplicada às abordagens estática e dinâmica. Apesar de bons resultados obtidos para

sistemas de pequena dimensão, chega-se à conclusão que para sistemas maiores e mais complexos esta ferramenta torna-se ineficiente. Contudo, as topologias identificadas podem ser usadas para a definição de uma população inicial em outras técnicas de otimização mais eficientes como as meta-heurísticas.

Em [RRMS05,SRMR05], o CHA anterior é aperfeiçoado para a resolução do problema PET estático. Em ambos os trabalhos, o modelo de transporte é usado apenas para estimar índices de sensibilidade. A avaliação dos planos candidatos é feita usando um modelo DC completo. Apesar de o CHA ser capaz de encontrar soluções ótimas para sistemas de pequeno porte, somente soluções de boa qualidade são obtidas para sistemas de médio e grande porte. Em [SRMR05], o método de pontos interiores é empregado pra resolver o problema de programação não linear (*Nonlinear Programming* – NPL).

Em continuidade ao desenvolvimento da técnica CHA, em [RGR07] a mesma é apresentada usando o modelo AC para a solução do problema PET estático. A metodologia inclui o problema de alocação e potência reativa na resolução do problema PET. Ao final de um processo iterativo, também é verificada a possibilidade da retirada de fontes reativas excedentes. Contudo, o CHA não garante que sejam encontrados planos ótimos para o problema PET. No entanto, geralmente fornecem soluções de boa qualidade.

De acordo com os trabalhos desenvolvidos usando modelos heurísticos, notase que os mesmos representam uma melhor alternativa aos modelos matemáticos, principalmente por utilizar sensibilidades para a definição de reforços e tratar a não linearidade do problema através da consideração dos subproblemas de investimento e operação. Como as sensibilidades consistem de informações locais, os modelos heurísticos possuem grande dificuldade para identificar as melhores soluções para o problema, apesar de encontrarem soluções de boa qualidade.

Portanto, ainda se trata de um grande desafio desenvolver modelos heurísticos que resolvam de forma eficiente o problema PET, principalmente quando uma

abordagem dinâmica e sistemas de grande porte são considerados, devido ao elevado nível combinatório e custo computacional. Modelos meta-heurísticos são mais indicados já que são capazes de encontrar soluções de melhor qualidade a um menor custo computacional.

#### 2.3.3 Modelos Meta-Heurísticos

Os modelos baseados em meta-heurísticas têm apresentado um excelente potencial para encontrar boas soluções factíveis para uma série de problemas de otimização, incluindo o PET. Inúmeras vantagens podem ser atribuídas a estes modelos como a baixa complexidade dos programas, a capacidade em trabalhar com variáveis inteiro mista e não lineares, e um tempo de resposta satisfatório. O sucesso destes modelos está relacionado à capacidade de evitar ótimos locais, explorando a estrutura básica de cada problema.

Tradicionalmente, as meta-heurísticas podem ser classificadas em dois grandes grupos [LRHM11]: Algoritmos Evolucionários (Evolutionary Algorithm – EA) e Inteligência Coletiva (Swarm Intelligence - SI). Entretanto, algumas compartilham técnicas não as mesmas características dos grupos classificados mencionados anteriormente e, portanto, devem ser separadamente, como a Busca Tabu (Tabu Search – TS).

### • Algoritmos Evolucionários

Os algoritmos evolutivos pertencem a um subconjunto da Computação Evolucionária que utilizam mecanismos inspirados na evolução biológica, tais como: reprodução, mutação, recombinação (crossover), e seleção. Nestes algoritmos, as soluções representam uma população de indivíduos que são modificados ao longo da evolução das gerações (iterações) por meio da aplicação dos operadores mencionados anteriormente.

O Algoritmo Genético (*Genetic Algorithms* – GA) é um exemplo de EA bastante utilizado, sendo sua teoria baseada na evolução das espécies. Neste algoritmo, numa dada população de indivíduos, aquele mais adaptado ao meio terá

maiores chances de sobreviver e consequentemente de gerar mais descendentes, passando as suas características para gerações futuras. A população é o conjunto das soluções encontradas e os indivíduos desta população representam o espaço de busca do problema. O funcionamento do GA esta relacionado a um critério de seleção que vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. Os métodos de seleção são geralmente programados para escolher os indivíduos com melhores níveis de aptidão (melhores valores obtidos por meio da função objetivo), de maneira não exclusiva, a fim de se manter a diversidade da população. O processo evolutivo compreende as etapas de Seleção, Cruzamento e Mutação. Vários trabalhos são encontrados na literatura envolvendo a aplicação do GA no problema de planejamento da expansão [Y01,EGR04,XDW06,RRS07].

A meta-heurística Estratégia de Evolução (Evolution Strategies – ES) é outro exemplo de EA. Desenvolvida por Fogel, Schwefel e Rochenberg [F94,SR95], não necessita de codificação/decodificação (geralmente necessário no GA), uma vez que sua representação é baseada em variáveis reais do problema. Esta ferramenta procura as melhores soluções por meio da aplicação de operadores de evolução em um conjunto de soluções (população). A cada geração, ou iteração, as soluções (indivíduos) sofrem mutações e são avaliadas pela função objetivo do problema. Posteriormente, os melhores indivíduos entre a população original e mutada são selecionados para fazerem parte da população de progenitores da próxima geração. Este procedimento é repetido, geração após geração, até que um critério de interrupção de busca seja satisfeito. Como em cada geração os melhores indivíduos são selecionados e procriados, espera-se que as futuras gerações sejam constituídas de boa qualidade. Salienta-se que o ES, quando ao aplicado problema PET, sempre obteve excelentes resultados [LSRMSR06,MSLRSR07,S07,LSMRRS09]. Por essa razão, foi escolhido para os estudos realizados nesta dissertação. A descrição mais detalhada da metaheurística ES é apresentada na Seção 3.3.

A meta-heurística Evolução Diferencial (*Differential Evolution* – DE), assim como o GA e o ES, pertence ao grupo de Algoritmos Evolucionários, os quais utilizam alguns operadores de evolução durante o processo de busca. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida por Rainer Storn e Kenneth Price em 1995 [SP95]. Entretanto, a DE se difere das outras meta-heurísticas baseadas em EA em relação aos seus operadores de evolução. Ao contrário das técnicas GA e ES que seguem uma função de distribuição de probabilidades para produzir uma perturbação, o DE se baseia em diferenças ponderadas de indivíduos selecionados aleatoriamente, isto é, consiste de combinações aritméticas entre os indivíduos. Dentre as aplicações existentes na área de planejamento de sistemas de transmissão podem ser citados [DLLW06,STIS07].

Por fim, a técnica Sistema Imunológicos Artificiais (*Artificial Immune Systems* – AIS) é mais um exemplo de algoritmos da classe EA. Esta meta-heurística é baseda na resposta do sistema imunológico dos seres vivos à presença de um estímulo nocivo ao organismo conhecido por antígeno. Neste processo, os anticorpos que reconhecem os antígenos invasores são selecionados para a proliferação por meio de clonagens. Após um período de maturação, os que possuírem maior afinidade aos antígenos são escolhidos e os demais são descartados. Vários trabalhos, incluindo a área de sistemas de potência, têm sido desenvolvidos utilizando o AIS [RSM06,L06,ADP07,HLB07]. Para o problema PET ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos utilizando o AIS [RLH09].

### • Inteligência Coletiva

Inteligência Coletiva é um tipo de inteligência artificial baseda no comportamento coletivo de agentes organizados. As meta-heurísticas incluídas neste grupo são geralmente compostas por uma população de agentes simples que interagem localmente entre si e com o ambiente. Embora os agentes sigam regras bastante simples e não exista uma estrutura de controle responsável por guiar o comportamento dos mesmos, observa-se o surgimento de um comportamento global inteligente, desconhecida para os agentes individuais.

A Otimização por Colônia de Formigas (Ant Colony Optimization – ACO) é um exemplo de técnica de otimização que compartilha da Inteligência Coletiva. O ACO foi desenvolvido tendo como princípio a simulação do comportamento de formigas reais no processo de busca por alimento [DMC91]. As formigas, na natureza, exploraram aleatoriamente o ambiente em torno do formigueiro. Ao encontrarem uma fonte de alimento, retornam a este, deixando pelo caminho, o rastro de uma substância química (que é volátil) denominada feromônio, a qual deverá ser detectada pelas outras formigas que porventura utilizarem a mesma rota. Com o passar do tempo, as formigas são capazes de encontrar o caminho mais curto entre o formigueiro e a fonte de alimento, devido ao acúmulo de feromônio nos rastros, podendo este mecanismo ser visto, portanto, como uma forma de cooperação entre estes indivíduos, e, também, como um meio de comunicação indireta entre eles. As formigas artificiais utilizadas no ACO são modeladas por meio de procedimentos estocásticos que constroem uma solução fazendo a adição iterativa de componentes a uma solução parcial. Em sistema de potência, algumas importantes aplicações de ACO podem ser encontradas em áreas como o planejamento da expansão da transmissão [R06,JCYZ07,RLM08,LSMRRS09], planejamento de distribuição [GKOOYVU04], expansão de geração [KSP05] e fluxo de potência [VHL05].

A observação do movimento de bandos de pássaros, o qual possui certa sincronia e não há colisões entre seus membros, resultou no surgimento de outra meta-heurística baseada na SI conhecida por Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* — PSO). Foi observado que embora cada pássaro aparentemente se movimente de forma independente, existe alguma informação compartilhada entre os membros do enxame. A cada pássaro (partícula) é atribuída uma velocidade e então as mesmas voam através do espaço de estados do problema seguindo as melhores partículas. A meta-heurística PSO foi primeiramente apresentada em [KE95], onde partículas colaboram entre si, como em uma população, para alcançar sua própria velocidade, sua melhor posição alcançada até o momento e a melhor posição geral obtida por todas as partículas. Na área de sistemas de potência, a técnica PSO tem sido bastante aplicada [YCZ07] como ao problema de despacho econômico [PLSL05], controle de tensão

e potência reativa [YKFTN00], minimização de perdas de potência [ELZ05], planejamento de geração [KSBN07], planejamento de transmissão [SRC02,YHJX05,JCYZ07,YGD08].

#### Busca Tabu

A TS é um procedimento heurístico proposto nos anos 80 [G86] para resolver problemas de otimização combinatória. A ideia básica é evitar que a busca por soluções ótimas termine ao encontrar um mínimo local. Dessa forma, a TS é um procedimento de otimização local que admite soluções de pior qualidade para escapar de ótimos locais. Em sua forma original, a cada iteração procurase um ótimo local selecionando-se o melhor vizinho da solução corrente. Para evitar o retorno a uma solução previamente visitada, o algoritmo usa o conceito de lista tabu. Esta lista define todos os movimentos com um certo atributo como sendo tabu por um determinado número de iterações, conhecido como tempo tabu. Tais movimentos são proibidos a menos que a solução satisfaça um critério de aspiração, em geral que essa solução seja melhor que a melhor solução encontrada até então. Os atributos são escolhidos para prevenir o retorno a soluções visitadas recentemente e por possuírem características fáceis de detectar. Vários trabalhos têm sido publicados adotando a metaheurística TS como ferramenta de otimização para a resolução do problema PET [WC97,GMR98b,MS01,MI07,S07,LMRR08,LSMRRS09].

### 2.4 CONSIDERAÇÃO DA CONFIABILIDADE

O planejamento da expansão de sistemas de potência tem como objetivo atender aos requisitos do mercado de energia elétrica, a um custo mínimo e obedecendo a parâmetros que assegurem uma qualidade satisfatória dos serviços prestados aos consumidores. Nos estudos relativos ao planejamento de sistemas é necessário avaliar as condições do atendimento da carga em um instante futuro.

A fim de garantir níveis adequados de confiabilidade, os estudos de expansão também devem considerar as incertezas relativas à disponibilidade de equipamentos. Assim, algoritmos de avaliação da confiabilidade devem ser

utilizados para avaliar índices associados ao desempenho do sistema planejado, quanto ao atendimento da carga futura prevista. O índice LOLC [ML04,RLM08], o qual fornece o valor esperado do custo de interrupção do fornecimento de energia, tem grande aplicação em estudos de expansão, pois pode ser diretamente incorporado ao problema [ML04]. Com a avaliação da LOLC é possível obter a solução de mínimo custo global, correspondente ao somatório dos custos de investimento e dos custos de interrupção de energia. Algoritmos baseados em SMC e na Enumeração de Estados podem ser aplicados em diferentes fases do processo de planejamento da expansão, tendo em vista aspectos como a velocidade de processamento dos algoritmos e a precisão das estimativas obtidas para o índice LOLC [M99].

Em geral, a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura não consideram a confiabilidade como parte do processo de otimização, devido às funções de avaliação dos sistemas apresentarem um alto custo computacional, principalmente para sistemas de grande porte e/ou muito robustos. Por esta razão, o número de alternativas não pode ser elevado, principalmente para a abordagem dinâmica. Neste caso, técnicas de otimização, quando empregadas, são bem simples, fazendo uso de árvores de expansão truncadas [ML04], ou de técnicas de decomposição interativa [SB95,B04].

Na referência [ML04] o problema de planejamento de sistemas compostos de geração e de transmissão considera uma abordagem dinâmica. É proposto um modelo de planejamento dedicado à inclusão do valor da confiabilidade, expresso em termos do índice LOLC, na função objetivo do problema. Para viabilizar a avaliação rigorosa dos custos de produção e de interrupção de energia, é desenvolvido um processo de planejamento dividido em quatro etapas. Nas etapas iniciais são utilizados modelos de avaliação mais simples e velozes, sendo descartadas diversas alternativas de expansão com base no valor da energia esperada não suprida (*Expected Energy not Supplied* – EENS). À medida que o processo evolui são utilizados modelos mais complexos. Em todas as etapas do planejamento são utilizados critérios baseados em índices de confiabilidade, evitando degradações na qualidade do atendimento aos consumidores. A cada ano do planejamento, heurísticas são

empregadas para restringir o crescimento/ramificação da árvore das alternativas do sistema.

A tese de doutorado [B04] propõe uma metodologia para o planejamento da expansão de: redes de transmissão, interligação entre subsistemas e suporte de reativos em derivação. A metodologia é baseada em heurísticas, análises probabilísticas e decisão multicritérios, englobando, além dos custos de investimento e de perdas ativas, o valor de confiabilidade, e os custos marginais de confiabilidade, os custos de congestionamento e os custos associados a penalidades por indisponibilidades dos equipamentos. Este trabalho representa um importante passo para a incorporação de critérios de confiabilidade no planejamento de sistemas de transmissão. No entanto, o valor da confiabilidade é avaliado de maneira simplificada, considerando apenas as contingências mais críticas, através do método de Enumeração de Estados.

Uma outra forma de incorporar a confiabilidade no planejamento da expansão da transmissão é avaliá-la somente numa segunda fase do processo. Esta avaliação a *posteriori* da confiabilidade é uma forma simplificada de incluir o custo de interrupção de energia ao problema PET, a qual tem apresentado resultados satisfatórios [LSRMSR06,MSLRSR07,LMRR08]. Na primeira fase do planejamento são obtidas as decisões de expansão com menor custo de investimento, isto é, utilizando o planejamento determinístico. Na segunda fase do planejamento, somente as melhores soluções encontradas, na primeira fase, são avaliadas quanto à confiabilidade. Dessa forma é obtido o custo total para cada decisão de expansão através da soma do custo de investimento e do custo de interrupção do fornecimento de energia. Apesar dessa metodologia não inserir *a priori* o custo da confiabilidade na função objetivo do problema, ela representada um avanço nos modelos utilizados no planejamento da expansão em longo prazo [MSLRSR07,MRSLR09].

Esta dissertação tem como objetivo a avaliação *a priori* da confiabilidade no processo de otimização. Dessa forma, todas as alternativas de expansão geradas pelo algoritmo de busca são avaliadas quanto à confiabilidade.

Pretende-se assim, analisar o impacto da confiabilidade na solução do problema PET, por meio do índice LOLC, durante o processo de busca.

#### 2.5 CONCLUSÕES

A resolução do problema PET deve responder a três questões básicas: quais reforços são necessários para atender o crescimento do consumo de energia elétrica, e ainda, onde e quando eles serão alocados.

Este capítulo apresentou as principais linhas de abordagem e os modelos de otimização utilizados no planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Pode-se concluir que, a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura são dedicados ao planejamento determinístico e estático, sendo empregada uma grande diversidade de técnicas de otimização, desenvolvidas com o propósito de explorar as características combinatórias do problema.

A consideração da confiabilidade durante o processo de busca (i.e., *a priori*) é fundamental para que se tenha um melhor equilíbrio entre os investimentos realizados e o nível de confiabilidade das configurações obtidas. Contudo, incorporar a confiabilidade diretamente na função objetivo é uma tarefa extremamente complexa que pode elevar significativamente o custo computacional. No intuito de contornar estas dificuldades e realizar estudos com maior nível de informações sobre o problema, o Capítulo 3 apresentada a metodologia desenvolvida para estudos de expansão considerando a confiabilidade *a priori*. Em seguida, o Capítulo 4 mostra, por meio dos resultados encontrados, a importância da consideração da confiabilidade *a priori* na resolução do problema PET.

## **CAPÍTULO 3**

# PLANEJAMENTO COM CONFIABILIDADE A PRIORI

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada no estudo do planejamento estático da expansão da transmissão considerando o custo da confiabilidade. Neste problema, o interesse está voltado na definição de quais reforços deverão ser adicionados aos sistemas de forma a minimizar os custos de investimento e os custos de interrupção do fornecimento de energia.

A metodologia proposta baseia-se na meta-heurística ES, técnica de otimização escolhida para realizar o processo de busca pelas melhores alternativas de expansão. Verifica-se que para a inclusão do custo de interrupção na função objetivo do problema PET é necessário obter estimativas para o índice de confiabilidade LOLC, sendo utilizada a SMC não sequencial para avaliação das alternativas.

Nas seções deste capítulo, inicialmente é dada atenção à formulação matemática adotada para o planejamento estático considerando incertezas internas. Em sequência, é detalhada a aplicação da meta-heurística ES ao problema PET. Posteriormente, são apresentados conceitos relacionados à avaliação dos índices de confiabilidade composta. Por fim, são descritas as heurísticas e o método de armazenamento de soluções, utilizados como ferramentas para redução do custo computacional.

## 3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo matemático para o planejamento da expansão estática de longo prazo considerando a LOLC utiliza o desacoplamento do problema da expansão em dois subproblemas: investimento e confiabilidade. Então, para

uma dada decisão de investimento (*M*) deve-se resolver o subproblema de confiabilidade, para a obtenção do custo de interrupção de energia (LOLC). Salienta-se que a LOLC é o resultado do produto do valor esperado de energia não suprida (EENS), dado em MWh/ano, pelo custo unitário de interrupção, dado em US\$/MWh. Durante a avaliação da confiabilidade, cada estado amostrado é avaliado por um algoritmo de fluxo de potência DC com otimização das medidas corretivas, que vem a ser o problema de programação linear dado pela Equação (3.1).

$$z = Min \sum_{i=1}^{n} e_i r_i \tag{3.1}$$

s.a.

$$g + r + B\theta = d \tag{3.1.2}$$

$$|f| \le f_{max} \tag{3.1.3}$$

$$0 \le g \le g_{max} \tag{3.1.4}$$

$$0 \le r \le d \tag{3.1.5}$$

#### sendo:

e- custo do corte de carga na barra i;

 $r_i$  – corte de carga na barra i;

*n* – número de barras;

g – vetor contendo o despacho da geração;

*r* – vetor contendo os cortes de carga;

B – matriz de susceptância de barra;

 $\theta$  – vetor contendo os ângulos das tensões de barra;

d – vetor contendo as cargas das barras;

 $g_{max}$  – vetor contendo os limites de geração;

f – vetor contendo os fluxos nos circuitos;

 $f_{max}$  – vetor contendo os limites de capacidade dos circuitos.

Vê-se que a função objetivo z resulta no ponto de operação que minimiza o corte de carga para cada estado amostrado a partir da configuração definida pela decisão de investimento M. Concluída a avaliação da confiabilidade temse a LOLC obtida para esta decisão M, a qual será inserida na solução do subproblema investimento, que é representado pela Equação (3.2).

$$w = Min\left(\sum_{k=1}^{nr} Cinv_k M_k + LOLC_M\right)$$
s. a.
$$\sum_{i=1}^{n} r_i = 0$$

$$0 \le M \le M_{max}$$
(3.2)

onde  $Cinv_k$  é o custo de investimento da adição de um reforço no ramo k;  $M_k$  é o número de reforços adicionado ao ramo k, na decisão M; e  $M_{max}$  é o vetor que contém o número máximo de adições para cada ramo.

Para a solução do subproblema investimento, Equação (3.2), utiliza-se a metaheurística ES na busca das melhores decisões. Para a inclusão do custo de
interrupção na função objetivo do subproblema investimento é necessário
obter, de maneira eficiente, estimativas para o índice de confiabilidade LOLC.
Para tal, os modelos de avaliação da confiabilidade baseados na
representação a espaço de estados, os quais apresentam maior velocidade de
processamento, são os mais indicados. Neste trabalho é utilizada a SMC não
sequencial que será discutida mais detalhamente na Seção 3.5.

## 3.3 APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA ES AO PROBLEMA PET

A meta-heurística ES busca soluções ótimas através da evolução de uma população (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, antes do critério de convergência ser atingindo.

A representação de cada indivíduo (ou cromossomo)  $X_k$ , composto por n genes, é dada pelo vetor:

$$X_k = [X_k^1, X_k^2, \dots, X_k^i, \dots, X_k^n]$$
(3.3)

Neste vetor, cada elemento  $X_k^i$  é uma variável inteira, a qual contém a quantidade de reforços adicionados ao ramo i.

Geralmente, no ES, seleção e mutação são os operadores utilizados para simular a evolução. Esses dois mecanismos são descritos a seguir:

#### Seleção

Os diversos modelos ES derivam do modelo geral  $(\mu, k, \lambda, \rho)ES$ , cujos parâmetros têm os seguintes significados:  $\mu$  é o número de progenitores numa geração; k corresponde ao número de gerações que um indivíduo sobrevive;  $\lambda$  indica o número de descendentes criados numa geração; e  $\rho$  é o número de progenitores de um indivíduo. Neste trabalho é utilizado o modelo  $(\mu + \lambda)ES$ . Portanto, k e  $\rho$  são feitos iguais a 1, e os novos  $\mu$  progenitores são selecionados do conjunto  $\mu + \lambda$ . Esta forma de seleção garante que, no conjunto, os indivíduos da geração futura nunca serão piores que seus progenitores.

#### 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)  $X_k$  sofre uma perturbação pela adição de um vetor aleatório  $Z_k$ , criando um novo indivíduo  $\widetilde{X}_k$ .

$$\tilde{X}_k = X_k^{(g)} + Z_k \tag{3.4}$$

em que

$$Z_k = \sigma[N_1(0,1), \dots, N_j(0,1), \dots, N_n(0,1)]$$
(3.5)

onde  $N_j$  (0,1) corresponde a uma distribuição gaussiana com média zero e variância unitária e  $\sigma$  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:

$$X_{k}^{i} = \begin{cases} 0, & se \ \tilde{X}_{k}^{i} < 0 \\ Round(\tilde{X}_{k}^{i}), & se \ \tilde{X}_{k}^{i} \in [0, N_{max}] \\ N_{max}, & se \ \tilde{X}_{k}^{i} > N_{max} \end{cases}$$
(3.6)

onde  $Round(\tilde{X}_k^i)$  corresponde à função de arredondamento que retorna o número inteiro mais próximo do valor da variável real  $\tilde{X}_k^i$  e  $N_{max}$  é o máximo de reforços permitido entre dois ramos.

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 mutação e seleção. O processo auto adaptativo tem o objetivo de encontrar o valor ótimo do parâmetro estratégico  $\sigma$ . Desta forma, se o processo conseguir selecionar bons  $\sigma$ , o ponto ótimo global poderá ser obtido com menor custo computacional. Para o problema PET, o modelo não adaptativo tem apresentado melhor desempenho [LSRMSR06,LSMRRS09], sendo também escolhido neste trabalho.

## 3.4 INICIALIZAÇÃO INTELIGENTE

Alguns trabalhos [CN99,BOA01,EGR04,RRS07,MS07,S07,YGD08,LSMRRS09], comentam sobre a importância de se usar um mecanismo para a construção de soluções iniciais, as quais contribuem para um melhor desempenho da busca das meta-heurísticas. Neste caso, a chance de se encontrar as melhores

decisões de expansão são maiores através dos operadores das metaheurísticas. A maioria destas ferramentas se baseia em populações que se interagem e evoluem ao longo de gerações. Portanto, é interessante construir uma população inicial de boa qualidade.

Os multiplicadores de *Lagrange* (variáveis duais) associados às restrições da Equação (3.1.2), que correspondem a um subproduto da solução do PL, são de grande interesse, uma vez que eles podem auxiliar na construção de soluções iniciais de melhor qualidade para as meta-heurísticas ou até mesmo auxiliar o processo de busca. Estes multiplicadores estimam o benefício em termos do índice de carga não suprida, o qual é baseado em mudanças nas susceptâncias dos ramos pela adição de novos reforços. Sendo  $\pi^d$  o valor destes multiplicadores de *Lagrange*, o benefício pode ser estimado por [BOA01]:

$$\pi_{ij}^d = (\theta_i - \theta_j)(\pi_i^d - \pi_j^d) \tag{3.7}$$

onde  $\pi^d_{ij}$  é multiplicador de *Langrange* associado à susceptância do ramo conectando as barras i e j.

Portanto, a função gulosa definida a seguir, a qual considera também os custos de investimento associados aos novos reforços, pode ser de grande utilidade para aumentar a eficiência das meta-heurísticas na busca por soluções de melhor qualidade.

$$h(i,j) = -\frac{\pi_{ij}^d}{Cinv_k} \tag{3.8}$$

onde  $Cinv_k$  é o custo do reforço (linha de transmissão ou transformador) que pode ser adicionado ao ramo entre as barras i e j.

A partir desta função gulosa é possível construir uma lista ordenada de reforços candidatos, mediante as variáveis mais promissoras. O algoritmo a seguir fornece um conjunto de boas soluções factíveis a serem utilizadas na metodologia proposta.

- i) Executar um fluxo de potência ótimo DC para uma dada carga prevista, isto é Equação (3.1), considerando o sistema elétrico sem nenhum reforço (caso base);
- ii) Avaliar a função gulosa, isto é Equação (3.8) e ordenar os circuitos usando os parâmetros h(i,j);
- iii) Amostrar dentre os *nc* melhores circuitos ordenados, através de uma distribuição uniforme, um único reforço para ser adicionado à rede e executar um novo fluxo de potência ótimo DC;
- iv) Se a nova solução é factível, ir para o passo (v), senão, retornar ao passo (ii);
- v) Se o tamanho pré-especificado do Conjunto Inicial Inteligente for alcançado, o algoritmo ES pode iniciar a busca, senão deve-se retornar ao passo (i).

Observe que a função gulosa deve estar relacionada com a função objetivo a ser utilizada pelo algoritmo ES. Vale destacar que os multiplicadores de Langrange e a função gulosa foram empregados nos estudos envolvendo o planejamento determinístico. Também é importante destacar que, nesta dissertação, apenas 50% dos indivíduos da população inicial foram gerados pelo algoritmo acima. Os demais indivíduos foram gerados aleatoriamente, o que introduz uma maior diversidade para a população inicial.

No entanto, quando as incertezas internas são consideradas no planejamento, caso com consideração da confiabilidade no processo de busca, é utilizada uma população inicial composta pelos melhores indivíduos obtidos para o caso determinístico e por indivíduos gerados de forma aleatória, sendo também empregada uma proporção de 50% para cada grupo. O objetivo desta nova população inicial é utilizar as informações obtidas no caso determinístico e inserir aleatoriedade ao processo, a fim de evitar que o algoritmo fique preso a mínimos locais.

## 3.5 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE COMPOSTA

Para os sistemas de geração e transmissão, as estimativas dos custos de perda de carga são obtidas através de algoritmos de avaliação de confiabilidade composta, os quais são baseados em duas representações distintas: espaço de estados e modelagem cronológica. Em geral, os algoritmos de confiabilidade são compostos de três passos principais [PB92]:

- a) Selecionar um estado do sistema, definindo suas condições operativas,
   a disponibilidade de seus equipamentos e os níveis de carga;
- b) Analisar o desempenho do estado selecionado (i.e., verificar se esta configuração de geradores e circuitos é capaz de atender à carga definida para este estado sem violar limites operativos; se necessário, acionar medidas corretivas tais como redespacho de geração, correção de tensões, corte de carga, etc.);
- c) Estimar índices de confiabilidade (i.e., índices de perda de carga). Se a precisão da estimativa dos índices for aceitável, parar. Caso contrário retornar ao passo (a).

O método de Enumeração de Estados e a simulação Monte Carlo não sequencial são exemplos de algoritmos baseados na representação por espaço de estados, a qual utiliza modelos de Markov para reproduzir as transições de estado de equipamentos e carga. Portanto, os estados são selecionados sem qualquer conexão cronológica ou memória. Os passos necessários para avaliar índices de confiabilidade, considerando a representação cronológica (SMC sequencial) são conceitualmente os mesmos descritos para a representação por espaço de estado [S90,LMMB00]. A diferença básica está na forma como os estados são gerados (i.e., etapa (a) do algoritmo). Neste caso, é necessário que os estados sejam selecionados sequencialmente no tempo, enquanto que a abordagem não sequencial seleciona os estados do sistema de forma aleatória.

Os métodos baseados na Enumeração de Estados são adequados somente quando o número de cenários severos/prováveis é relativamente pequeno. Este é o caso dos estudos de confiabilidade da transmissão, nos quais as indisponibilidades dos circuitos são usualmente baixas. Nestes estudos, excluindo-se eventos de modo comum e originado em subestações, as contingências de níveis mais elevados ficam muito improváveis.

Por outro lado, os métodos baseados em SMC não sequencial são mais atrativos quando a ocorrência de contingências de maior ordem é mais provável. Isto ocorre em estudos de confiabilidade composta devido às elevadas taxas de indisponibilidade dos geradores. Por esta razão, a SMC não sequencial é o modelo escolhido para os estudos de expansão da transmissão propostos nesta dissertação.

Através da simulação não sequencial, os índices de perda de carga podem ser estimados como a média dos valores de funções teste aplicada aos estados amostrados [PB92]:

$$\tilde{E}[F] = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{N} F(x^k)$$
 (3.9)

O objetivo destas funções teste é verificar se, e/ou de que forma, uma determinada configuração de geradores e circuitos é capaz de suprir uma dada carga. A estimativa da incerteza é dada pela variância do estimador:

$$V(\tilde{E}[F]) = V(F)/N \tag{3.10}$$

onde V(F) é a variância da função teste. Esta incerteza é geralmente representada como o coeficiente de variação [PB92]:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\tilde{E}[F])}}{\tilde{E}[F]} \tag{3.11}$$

Todos os índices básicos de confiabilidade podem ser obtidos por (3.9), dependendo da definição da função teste F. Assim, a SMC não sequencial pode facilmente fornecer estimativas não tendenciosas para a probabilidade, a energia, e os índices de frequência. Por exemplo, a energia esperada não suprida (EENS) pode ser estimada utilizando a função teste apresentada pela Equação (3.12):

$$F_{EENS}(x^k) = \begin{cases} 0 & se \quad x^k \in X_{Sucesso} \\ \Delta P_k \times T & se \quad x^k \in X_{Falha} \end{cases}$$
(3.12)

onde  $X = X_{Sucesso} \cup X_{Falha}$  é o conjunto de todos os estados possíveis de x (i.e., o espaço de estados), dividido em dois subespaços: estados de sucesso  $(X_{Sucesso})$  e estados de falha  $(X_{Falha})$ ;  $\Delta P_k \times T$  é o montante de carga não suprida para o estado de falha  $x^k$  (i.e.,  $\Delta P_k$ ), multiplicado pelo período de análise, e.g. T=8760 horas anuais de energia não suprida.

Para o problema PET, o índice de confiabilidade de maior importância é a LOLC, a qual fornece o custo anual de interrupção do fornecimento de energia. O índice LOLC pode ser calculado por meio da equação:

$$LOLC = EENS \times UC \tag{3.13}$$

onde UC (*Unit Cust*) é o custo unitário de interrupção de interrupção.

Por fim, é importante ressaltar que, a fim de resolver o problema PET, um número elevado de análises de confiabilidade (milhares ou mais) pode ser realizado. Dessa forma, o uso de algoritmos eficientes e precisos é fundamental na resolução do problema. Neste intuito, as Seções 3.6 e 3.7 apresentam as heurísticas e o mecanismo implementados na metodologia proposta.

## 3.6 IMPLEMENTAÇÃO DE HEURÍSTICAS

Neste trabalho, foram desenvolvidos novos mecanismos com o objetivo de reduzir o custo computacional necessário para a realização do processo de

busca, o qual se tornou crítico em decorrência da complexidade da função objetivo empregada. Um importante mecanismo adotado, voltado para o armazenamento de indivíduos já visitados, é apresentado na Seção 3.7. Outros dois mecanismos, ou heurísticas, que exploram a composição da função objetivo (Custo de Investimento e LOLC) e características da meta-heurística empregada são apresentados a seguir.

O modelo de Estratégia de Evolução adotado neste trabalho é o  $(\mu + \lambda)ES$ , sendo  $\mu$  o número de indivíduos da geração atual (pais) e  $\lambda$  o número de descendentes (filhos) criados por mutação. Neste modelo os filhos concorrem com os pais para a composição da próxima geração. Para que um filho possa pertencer à próxima geração, seu custo total deve ser menor que o custo total do pior pai (indivíduo da população atual). Considerando que o custo total é a soma do custo de investimento e da LOLC, foi implementada a primeira heurística, a qual impede a análise de confiabilidade da configuração de rede produzida por todo e qualquer filho que tenha um custo de investimento maior que o custo total do pior pai. Obviamente, por menor que possa ser a LOLC deste filho, o seu custo de investimento é elevado o bastante para provocar o seu descarte. Portanto, é desnecessária a análise de sua confiabilidade.

Explorando novamente a composição do custo total, foi desenvolvida uma segunda heurística, a qual permite a interrupção precoce da análise de confiabilidade de filhos que certamente não pertencerão à próxima geração. Conforme já foi mencionado, esta dissertação utiliza a SMC não sequencial para avaliar a confiabilidade dos indivíduos gerados durante a busca pela decisão ótima. O critério de parada da SMC é a obtenção de um coeficiente de variação ( $\beta$ ) menor que uma dada tolerância. A aplicação da segunda heurística se dá através de uma pausa da simulação não sequencial assim que o coeficiente  $\beta$  atinge um determinado valor, maior que a tolerância (e.g. duas vezes maior). Neste momento da simulação é obtida uma estimativa otimista para o índice LOLC, igual a  $(1-\beta)\times LOLC$ . Se esta estimativa for grande o bastante para impedir que o indivíduo em análise possa pertencer à próxima geração (i.e., produzir um custo total maior que o custo total do pior pai), a análise de confiabilidade é interrompida, evitando-se um esforço computacional

inútil, pois a probabilidade deste indivíduo vir a pertencer à próxima geração será praticamente igual a zero.

#### 3.7 ARMAZENAMENTO DE DECISÕES

A ES é uma meta-heurística baseada na evolução de populações de indivíduos. Portanto, durante o processo de busca, por diversas vezes, o algoritmo ES pode encontrar indivíduos já pesquisados/avaliados. Em estudos determinísticos (i.e., considerando apenas o Custo de Investimento), a função objetivo é bem mais simples, pois o atendimento à carga futura é verificado para apenas uma condição de operação (rede intacta). Porém, a função objetivo utilizada pela metodologia proposta neste trabalho é extremamente complexa e cara do ponto de vista computacional, pois implica na realização de análise de confiabilidade. Portanto, torna-se relevante a utilização de procedimentos que evitem a análise de indivíduos já obtidos em populações antecedentes. Para tal, é necessário armazenar todos os indivíduos analisados e seus respectivos valores de LOLC. A dificuldade em desenvolver este tipo de armazenamento está na quantidade de dados e na forma de codificar os indivíduos, para que tanto o seu armazenamento quanto o seu acesso, e às suas respectivas LOLCs, seja realizado rapidamente e com baixos requisitos de memória.

Para sistemas de pequeno porte, e com poucos ramos candidatos, uma alternativa viável seria a utilização de um vetor para conter os valores de LOLC de todos os possíveis indivíduos. Este vetor seria indexado pelo número obtido através da conversão da representação de cada indivíduo (genes com valores inteiros variando entre  $0 e n_r$ ) para a base decimal. Entretanto, para sistemas de médio e grande, esta alternativa se torna inviável devido ao elevado número de combinações. Por exemplo, para um sistema com 41 ramos candidatos para expansão, sendo permitidos no máximo 3 reforços por ramo, seria necessário um vetor com  $4^{41}$  (aproximadamente  $5x10^{24}$ ) posições para representar todas as combinações possíveis. Para fazer frente a esta explosão combinatória, vislumbrou-se, inicialmente, uma nova estrutura de ordenação, na qual as soluções são armazenadas por faixas, ou intervalos, de custo de investimento.

Se esta estrutura fosse adotada, seriam utilizadas duas matrizes de armazenamento, uma para conter os custos de interrupção (LOLC) e outra que receberia as decisões de investimento (indivíduo), armazenadas sob a forma de palavras (variáveis do tipo string) com n caracteres (genes). Em ambas as matrizes, cada coluna corresponderia a um intervalo de custo de investimento, o qual seria obtido pela divisão do máximo valor de investimento adotado  $(INV_{max})$  pelo número de colunas das matrizes.

Através dessas matrizes, indivíduos já avaliados poderiam ser facilmente acessados, assim como os respectivos valores de LOLC, obtidos em análises de confiabilidade realizadas em iterações (gerações) passadas do processo de busca. Infelizmente, até mesmo estas matrizes teriam dimensões muito elevadas, pois para algumas de suas faixas haveria uma grande quantidade de decisões armazenadas, implicando em matrizes com elevada quantidade de linhas e, consequentemente, de elementos. Certamente, a grande maioria das faixas receberia poucas, ou até mesmo nenhuma decisão, acarretando em matrizes com elevado grau de esparsidade.

Portanto, adotou-se um procedimento de armazenagem semelhante ao utilizado pela referência [VST92] para a alocação/manipulação de matrizes esparsas. O modelo de armazenamento adotado pela metodologia proposta utiliza um conjunto de apenas 4 vetores. O primeiro (vetor *V\_inte*) possui dimensão igual ao número de intervalos de investimento (igual ao número de colunas das matrizes citadas anteriormente). Cada elemento deste vetor aponta para a primeira decisão de investimento do respectivo intervalo, encontrada durante o processo de busca. Os outros 3 vetores terão dimensão sempre inferior ao máximo número de indivíduos pesquisados (nº. de gerações × tamanho da população). Tais vetores são utilizados para armazenar, para cada decisão encontrada:

- o valor da respectiva LOLC vetor V\_lolc;
- a sua representação (na forma de variável string) vetor V\_repr;

a posição da próxima decisão pertencente ao seu intervalo de investimento
vetor V\_prox.

#### Algoritmo proposto

A seguir são apresentados os passos do algoritmo desenvolvido para o armazenamento e busca de soluções:

- a) Faça o número de decisões avaliadas pela SMC não sequencial igual a 1 ( $i_D=1$ );
- b) Para a decisão de expansão corrente, determine o respectivo custo de investimento (Cinv, igual ao somatório dos custos de todas as linhas adicionadas);
- c) Verifique a faixa de investimento  $(j_F)$ , em  $V_inte$ , correspondente ao valor Cinv. Se  $V_inte(j_F)$  é nulo vá para o passo (f); caso contrário faça  $k = V_inte(j_F)$  e siga para o próximo passo;
- d) Compare a representação da decisão corrente com V\_repr(k). Se forem iguais, a decisão corrente já foi avaliada, portanto, vá para o passo (g); caso contrário siga para o próximo passo;
- e) Verifique se  $V_prox(k)$  é diferente de zero. Se verdadeiro, faça  $k = V_prox(k)$  e volte ao passo (d); caso contrário siga para o passo (f);
- f) Faça  $V\_repr(i_D)$  igual à representação da decisão corrente. Em seguida, estime o custo de interrupção da decisão e armazene o valor obtido em  $V\_lolc(i_D)$ . Se k é diferente de zero faça  $V\_prox(k) = i_D$ ;
- g) Caso exista uma nova decisão (processo de busca não convergido), faça  $i_D = i_D + 1$  e volte ao passo (b).

#### 3.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para o planejamento da expansão da transmissão considerando o custo de interrupção do fornecimento de energia diretamente na função objetivo durante o processo de busca. Esta metodologia utiliza a decomposição do problema PET em dois subproblemas: Investimento e Confiabilidade.

Em seguida, foi apresentada a metodologia utilizada para aplicação da metaheurística ES no problema PET, assim como o mecanismo para construção de soluções iniciais de melhor qualidade.

Dando sequência à exposição da metodologia desenvolvida nesta dissertação, foi realizada uma breve discussão sobre a avaliação da confiabilidade, a qual apontou a SMC não sequencial como a mais indicada para a análise das alternativas de expansão geradas durante o processo de busca. Adicionalmente, foi realizada uma descrição sucinta do algoritmo de simulação não sequencial utilizado.

Ao final, foram apresentadas duas heurísticas e o mecanismo de armazenamento de soluções, ferramentas desenvolvidas com o objetivo de reduzir o custo computacional.

# **CAPÍTULO 4**

# **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA**

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos de caso, realizados visando avaliar a aplicação da metodologia proposta, nesta dissertação, para o planejamento estático da expansão da transmissão, considerando o custo de interrupção no fornecimento de energia. Em todos os estudos realizados foi utilizado o sistema IEEE-MRTS (*Modified IEEE Reliability System*), o qual resulta de modificações feitas no sistema IEEE-RTS [I79], com o objetivo de estressar a rede de transmissão.

Inicialmente, o capítulo mostra os parâmetros utilizados na meta-heurística ES. Em seguida, é realizada a descrição do sistema IEEE-MRTS. Ao final, são apresentados os resultados para os estudos de caso propostos na resolução do problema PET.

#### 4.2 PARÂMETROS DA META-HEURÍSTICA

A técnica estratégia de evolução foi implementada utilizando o modelo  $(\mu + \lambda)ES$ , com  $\mu$ = $\lambda$ . Neste modelo, os  $\mu$  progenitores de uma geração (g+1) são selecionados entre os  $\mu$  indivíduos da geração (g) mais os seus  $\lambda$  descendentes criados por clonagem e mutação. O modelo de ES utilizado é o não adaptativo, ou seja, os parâmetros são ajustados antes da execução do algoritmo e não se modificam até o seu término.

Na etapa de ajuste de parâmetros, vários valores, no intervalo [0,1], foram atribuídos à variável  $\sigma$ . Durante as simulações, foi possível constatar que um valor de  $\sigma$  elevado (e.g.  $\sigma$  = 0,4) pode tornar o algoritmo muito susceptível a mínimos locais, pois na fase final da simulação, o algoritmo ainda realiza diversas mutações em um número elevado de genes, quando o indicado para

esta etapa da simulação é um número relativamente baixo. Assim, os testes realizados revelaram que o melhor valor seria  $\sigma$  igual a 0,25.

Caso semelhante ocorreu ao dimensionar o tamanho da população. Populações com um número muito elevado de indivíduos (até 150 indivíduos) apresentavam um alto custo computacional e nem sempre produziam boas soluções (i.e economicamente competitivas). Ao mesmo tempo, um número relativamente baixo de indivíduos (50 indivíduos) implicava em convergência precoce do algoritmo. Assim, após inúmeras simulações definiu-se que a tamanho que apresentou os melhores foi igual a 120 indivíduos.

O critério de parada considerado para o ES interromper sua busca foi atingir o máximo de 200 gerações ou a repetição do melhor valor encontrado num intervalo de 20 gerações. O máximo de reforços permitidos entre duas barras adotado foi igual 3.

## 4.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZADO

A metodologia proposta foi aplicada em estudos de caso utilizando o sistema *IEEE Reliability Test System* [I79]. Vários trabalhos utilizaram este sistema para ilustrar o problema de planejamento da expansão da transmissão [FH03,ACRG05,S04,SRRGM98].

Por se tratar de um sistema muito robusto, a geração e carga foram duplicadas com o objetivo de exigir um maior esforço do sistema de transmissão. Assim, o aumento foi realizado apenas na capacidade dos geradores e não no aumento do número de unidades de geração. Vale ressaltar que mesmo para tamanho aumento, o sistema com a rede intacta ainda é capaz de atender a demanda, isto é, não existe corte de carga para o caso base. O sistema com estas características é definido como IEEE-MRTS.

Assim, foi proposto um planejamento estático para um horizonte de 8 anos, partindo do IEEE-MRTS (geração e cargas duplicadas), com crescimento anual da carga de 5,2%. Dessa forma, ao final de 8 anos, a carga terá um aumento

de 50%. Este mesmo acréscimo foi aplicado à capacidade de geração. Portanto, no ano horizonte do planejamento a capacidade instalada de geração será de 10.215 MW e o valor de pico anual da carga atingirá 8.550 MW. A curva de carga original do sistema [I79], com pontos horários, é convertida em um modelo de Markov não agregado (i.e., com 8736 estados), o qual é utilizado para a análise de confiabilidade, via simulação não sequencial.

Uma ilustração da curva de carga anual do sistema é feita através da Figura 4.1, a qual apresenta o comportamento da carga para a semana pico (semana 51). A Figura 4.2 ilustra o diagrama unifilar do sistema IEEE-MRTS.

Como o objetivo desta dissertação é inserir o custo de interrupção de energia na função objetivo do PET, foi necessário decompor o custo de investimento em desembolsos anuais para viabilizar a sua comparação com o índice LOLC, que é obtido apenas para um ano de operação do sistema (o ano horizonte). Neste estudo, o custo de investimento foi decomposto em 25 parcelas anuais (período de vida útil dos equipamentos) com taxa de juros de 10% ao ano.



Figura 4.1: Curva Cronológica da Carga – Semana Pico.

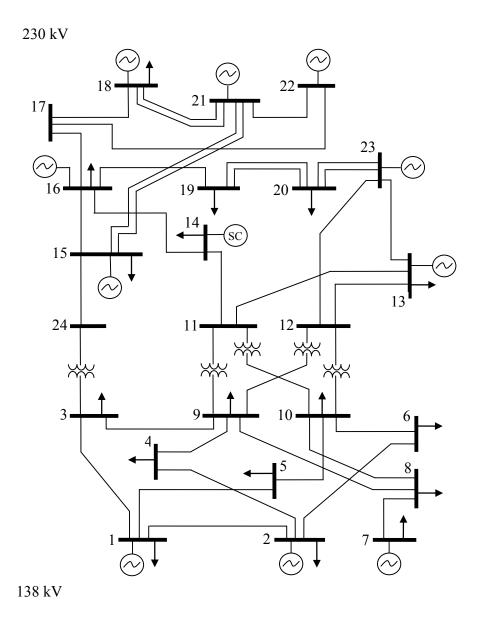


Figura 4.2: Sistema IEEE-MRTS.

Os custos de investimentos empregados nesta dissertação foram baseados em valores reais praticados no Brasil. Cada opção de reforço em linha de transmissão é composta por um custo fixo, a entrada de linha ou *Bay*, e por um custo por milha. Salienta-se que o custo total da linha é definido pelo somatório do seu respectivo custo fixo mais o custo por milha multiplicado por sua extensão. Os valores utilizados nas simulações do problema PET foram:

- Custo de entrada de linha de transmissão ou Bay:
  - o 138 kV US\$491.000,00
  - o 230 kV US\$934.000,00

- Custo das linhas de transmissão:
  - o 138 kV US\$88.000,00 por milha
  - o 230 kV US\$130.000,00 por milha
- Custo do transformador: US\$3.000.000,00

Os dados de linha para o sistema proposto são apresentados através das Tabela 4.1 a Tabela 4.4. A Tabela 4.1 mostra, respectivamente, o comprimento, a capacidade e o custo total das alternativas de expansão para a área de 138 KV. Na Tabela 4.2, estão definidas as opções de expansão e os custos para os transformadores 230/138 kV.

Tabela 4.1: Dados de linhas de transmissão para área de 138 kV.

DE	PARA	COMPRIMENTO (milhas)	CAPACIDADE (MVA)	CUSTO TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
1	2	3	175	1,246
1	3	55	175	5,822
1	5	22	175	2,918
2	4	33	175	3,886
2	6	50	175	5,382
3	9	31	175	3,710
4	9	27	175	3,358
5	10	23	175	3,006
6	10	16	175	2,390
7	8	16	175	2,390
8	9	43	175	4,766
8	10	43	175	4,766

Tabela 4.2: Dados dos transformadores 230/138 kV.

DE	PARA	CAPACIDADE (MVA)
3	24	400
9	11	400
9	12	400
10	11	400
10	12	400

A Tabela 4.3 fornece os dados de linhas de transmissão para a área de 230 kV. Assim como a Tabela 4.1, são definidos o comprimento, a capacidade e custo total de inclusão das linhas.

Tabela 4.3: Dados de linhas de transmissão para área de 230 KV.

DE	PARA	COMPRIMENTO (milhas)	CAPACIDADE (MVA)	CUSTO TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
11	13	33	500	6,158
11	14	29	500	5,638
12	13	33	500	6,158
12	23	67	500	10,578
13	23	60	500	9,668
14	16	27	500	5,378
15	16	12	500	3,428
15	21	34	500	6,288
15	24	36	500	6,548
16	17	18	500	4,208
16	19	16	500	3,948
17	18	10	500	3,168
17	22	73	500	11,358
18	21	18	500	4,208
19	20	27,5	500	5,443
20	23	15	500	3,818
21	22	47	500	7,978

Para o sistema teste proposto, foram criados novos ramos (corredores) de expansão, conforme mostra a Tabela 4.4. Estas novas alternativas são apresentadas na referência [FH03] que propõem o mesmo crescimento da carga e da geração adotados nesta dissertação. A Tabela 4.4 mostra o comprimento, a área, a capacidade e custo total para as novas linhas propostas.

É permitida adição de reforços nos ramos existentes e nos novos ramos, apresentados na Tabela 4.4. Portanto, existem 41 ramos candidatos, sendo 5 destinados para alocação de transformadores e 36 para linhas de transmissão.

Tabela 4.4: Dados dos novos ramos/circuitos.

DE	PARA	COMPRIMENTO (milha)	ÁREA (kV)	CAPACIDADE (MVA)	CUSTO TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
1	8	35	138	175	4,062
2	8	33	138	175	3,886
6	7	50	138	175	5,382
13	14	31	230	500	5,898
14	23	43	230	500	7,458
16	23	57	230	500	9,278
19	23	42	230	500	7,328

Para estudos considerando a análise de confiabilidade das alternativas de expansão, as Tabelas 4.5 a Tabela 4.8, mostram, respectivamente, os dados estocásticos (taxa de falha e MTTR – *Mean Time To Repair*) para os circuitos existentes nas áreas de 138 kV e 230 kV e para os novos ramos e os transformadores.

Tabela 4.5: Dados estocásticos para área de138 KV.

DE	PARA	TAXA DE FALHA (1/ano)	MTTR (h)
1	2	0,24	16
1	3	0,51	10
1	5	0,33	10
2	4	0,39	10
2	6	0,48	10
3	9	0,38	10
4	9	0,24	10
5	10	0,36	10
6	10	0,34	35
7	8	0,30	10
8	9	0,44	10
8	10	0,44	10

Tabela 4.6: Dados estocásticos para área de 230 KV.

DE	PARA	TAXA DE FALHA (1/ano)	MTTR (h)
11	13	0,40	11
11	14	0,39	11
12	13	0,40	11
12	23	0,52	11
13	23	0,49	11
14	16	0,38	11
15	16	0,33	11
15	21	0,41	11
15	24	0,41	11
16	17	0,35	11
16	19	0,34	11
17	18	0,32	11
17	22	0,54	11
18	21	0,35	11
19	20	0,38	11
20	23	0,34	11
21	22	0,45	11

Tabela 4.7: Dados estocásticos para os novos ramos.

DE	PARA	ÁREA (kV)	TAXA DE FALHA (1/ano)	MTTR (h)
1	8	130	0,40	10
2	8	130	0,39	10
6	7	130	0,48	10
13	14	230	0,40	11
14	23	230	0,44	11
16	23	230	0,49	11
19	23	230	0,43	11

DE	PARA	TAXA DE FALHA (1/ano)	MTTR (h)
3	24	0,02	768
9	11	0,02	768
9	12	0,02	768
10	11	0,02	768
10	12	0,02	768

Tabela 4.8: Dados estocásticos para os transformadores.

#### 4.4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados encontrados para os estudos de caso realizados para o problema do planejamento da expansão da transmissão. Estes estudos foram realizados considerando os seguintes aspectos:

- Investimento e corte de carga;
- Investimento e confiabilidade a posteriori;
- Investimento e confiabilidade a priori.

Nas simulações foi utilizado um computador Intel Core 2 Duo 2.0 GHz, com 4 Gigabytes de memória RAM.

#### 4.4.1 Caso 1 – Investimento e corte de carga

Para o Caso 1, as simulações foram realizadas com o objetivo de encontrar planos de expansão com menor custo de investimento, capazes de atender à carga futura para condição em que todos os equipamentos estão em operação (rede intacta). Inicialmente, visando à comparação com resultados já publicados na literatura, foram utilizados os custos de investimento apresentados na referência [FH03]. Com estes custos a ES encontrou a seguinte decisão ótima: alocação de um reforço/circuito entre as barras 6-10, 10-12 e 14-16, e de dois circuitos entre as barras 7-8. Esta decisão é a mesma obtida pela referência [SRRGM05], sendo de melhor qualidade (mais econômica) que aquela apresentada pela referência [FH03].

Utilizando os custos de expansão apresentados na Seção 4.3 as 25 melhores decisões de expansão obtidas com estes novos custos de investimento são

apresentadas na Tabela 4.9. A decisão com o menor custo anual de investimento (D1 com custo de US\$1.712.893,13) apresentou o mesmo conjunto de reforços da melhor solução encontrada com os custos de referência [SRRGM05]. Para a solução do Caso 1, 4.920 indivíduos foram avaliados, em um tempo total de processamento de 5,1 segundos.

Tabela 4.9: Resultados para o Caso 1.

DECISÕES DE EXPANSÃO	INVESTIMENTO (10 <sup>6</sup> US\$)
D1	1,713
D2	1,850
D3	1,987
D4	2,044
D5	2,091
D6	2,122
D7	2,181
D8	2,228
D9	2,259
D10	2,298
D11	2,307
D12	2,319
D13	2,365
D14	2,374
D15	2,391
D16	2,396
D17	2,412
D18	2,422
D19	2,435
D20	2,443
D21	2,445
D22	2,453
D23	2,511
D24	2,529
D25	2,549

#### 4.4.2 Caso 2 – LOLC a posteriori

A fim de examinar a adequação das decisões de expansão sob o ponto de vista da confiabilidade, todas as 25 decisões de expansão obtidas no Caso 1

foram analisadas por meio da SMC não sequencial. Foi utilizado um valor de UC igual a US\$ 1.000,00 por MWh para o cálculo da LOLC.

A Tabela 4.10 apresenta o investimento, LOLC, e os custos totais, além da nova ordem obtida para cada uma das 25 melhores soluções obtidas quando o custo total é considerado. Neste caso, a decisão D15 tornou-se a melhor, com um custo total de US\$ 17.080.334,00. Já a decisão D25 tornou-se a quarta melhor solução, com um custo total de US\$ 20.550.602,00.

Tabela 4.10: Resultados para o Caso 2.

<u> </u>					
DECISÕES DE EXPANSÃO	INVESTIMENTO (10 <sup>6</sup> US\$)	LOLC (10 <sup>6</sup> US\$)	TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)	NOVA ORDENAÇÃO	
D1	1,713	19,854	21,567	7	
D2	1,850	20,021	21,871	16	
D3	1,987	20,101	22,089	18	
D4	2,044	20,197	22,241	20	
D5	2,091	19,670	21,761	13	
D6	2,122	19,627	21,749	11	
D7	2,181	20,257	22,438	23	
D8	2,228	19,605	21,833	15	
D9	2,259	19,474	21,733	10	
D10	2,298	18,983	21,281	6	
D11	2,307	20,269	22,576	24	
D12	2,319	20,026	22,345	22	
D13	2,365	19,467	21,832	14	
D14	2,374	19,380	21,754	12	
D15	2,391	14,689	17,080	1	
D16	2,396	19,307	21,703	8	
D17	2,412	18,209	20,621	5	
D18	2,422	19,871	22,292	21	
D19	2,435	19,290	21,725	9	
D20	2,443	17,953	20,396	3	
D21	2,445	20,415	22,860	25	
D22	2,453	19,707	22,160	19	
D23	2,511	19,375	21,886	17	
D24	2,529	14,584	17,112	2	
D25	2,549	18,001	20,551	4	

Pode-se perceber que os valores LOLC são superiores aos custos de investimento, indicando baixo nível de confiabilidade para todas as 25 configurações obtidas. As análises de confiabilidade para todas as 25 decisões consumiram 1,08 minutos, avaliando aproximadamente 2,88 × 10<sup>6</sup> estados de operação (análise de adequação). A nova decisão (D15) adicionou os seguintes reforços: um reforço/circuito entre as barras 6-10, 10-11, 11-13, 14-16, e dois circuitos entre as barras 7-8.

#### 4.4.3 Caso 3 – LOLC a priori

Claramente os valores de LOLC de todas as 25 decisões apresentadas pela Tabela 4.10 estão muito elevados. Isto é um indicativo de que as decisões obtidas considerando apenas o custo de investimento, em geral, não adicionam reforços em quantidade suficiente para manter o nível de confiabilidade do sistema. Para encontrar um correto equilíbrio entre investimento e confiabilidade é necessário incluir a LOLC na função objetivo do problema durante o processo de busca, o que é feito nesta subseção.

As 25 melhores soluções obtidas quando a LOLC é considerada durante o processo de busca são apresentadas na Tabela 4.11. Diferente do Caso 2, agora é possível notar um equilíbrio entre o custo de investimento e o custo de interrupção do fornecimento de energia. A melhor solução encontrada para o Caso 3 adiciona os seguintes reforços: um reforço/circuito entre as barras 1-2, 1-5, 3-24, 6-10, 10-12, 14-16, 16-17, 20-23, 6-7, 13-14, e dois circuitos entre as barras 7-8. Para a execução do Caso 3, os parâmetros adotados para o algoritmo ES são os mesmos usados no Caso 1.

A fim de utilizar o mecanismo de armazenamento e acesso de indivíduos/decisões já avaliadas (Seção 3.7), mil intervalos de investimento (equidistantes) são definidos, variando entre 0 e INV<sub>MAX</sub> (adotado igual a dez vezes o valor do investimento da decisão ótima obtida no Caso 1). A dimensão máxima de cada um dos três vetores usados para armazenar as informações de cada indivíduo (sua LOLC, sua representação e a posição do próximo

indivíduo pertencente ao seu intervalo), permaneceu em 12.000 elementos (100 gerações X 120 indivíduos).

Tabela 4.11: Resultados para o Caso 3.

DECISÕES DE EXPANSÃO	INVESTIMENTO (10 <sup>6</sup> US\$)	LOLC (10 <sup>6</sup> US\$)	TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
D26	4,629	4,884	9,513
D27	4,492	5,060	9,552
D28	4,841	4,742	9,582
D29	4,927	4,728	9,655
D30	4,900	4,770	9,670
D31	5,213	4,489	9,702
D32	4,967	4,744	9,711
D33	4,618	5,120	9,738
D34	4,755	5,012	9,767
D35	5,170	4,620	9,790
D36	4,920	4,909	9,829
D37	5,053	4,788	9,840
D38	4,763	5,131	9,895
D39	4,841	5,114	9,954
D40	4,893	5,075	9,968
D41	4,988	4,987	9,974
D42	4,519	5,465	9,985
D43	4,978	5,009	9,987
D44	5,276	4,752	10,028
D45	4,627	5,407	10,034
D46	5,339	4,698	10,037
D47	5,142	4,905	10,046
D48	5,313	4,734	10,048
D49	4,605	5,458	10,063
D50	5,172	4,903	10,075

Durante o processo de busca para o Caso 3, 3.934 indivíduos foram avaliados (análise de confiabilidade) de um total de 5.880 indivíduos pesquisados (incluindo as repetições ocorridas nas gerações seguintes). As heurísticas e o mecanismo proposto nas Seções 3.6 e 3.7 impediram 1.946 análises individuais e interromperam 1.336 análises de confiabilidade (indivíduos com

valor de LOLC que implicava em alto custo total). O tempo computacional total foi de 4,19 horas. Para avaliar o impacto do mecanismo desenvolvido e das heurísticas, o processo de busca foi repetido sem utilizá-los. Nestas novas simulações, o tempo computacional foi de 9,89 horas, mostrando um ganho de tempo computacional de 2,35 vezes.

Com o propósito de fornecer uma visão espacial da melhor solução encontrada para o Caso 3, adotada como ótima, a Figura 4.3 mostra o diagrama unifilar do sistema expandido. Os reforços estão traçados em pontilhado.

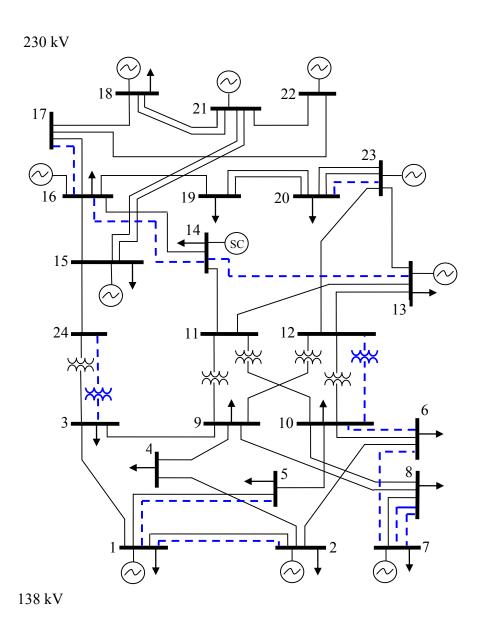


Figura 4.3: Diagrama unifilar da melhor solução encontrada para o Caso 3.

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade das decisões de investimento em função do valor do custo de interrupção, novos estudos de caso foram realizados utilizando diferentes valores de UC: US\$ 2.000,00 por MWh (Tabela 4.12), US \$ 500,00 por MWh (Tabela 4.13), e US\$ 250,00 por MWh (Tabela 4.14).

Tabela 4.12: Resultados para o Caso 3 com UC = US\$ 2.000,00 por MWh.

DECISÕES DE EXPANSÃO	INVESTIMENTO (10 <sup>6</sup> US\$)	LOLC (10 <sup>6</sup> US\$)	TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
D51	4,841	9,483	14,324
D52	4,967	9,488	14,454
D53	4,939	9,560	14,500
D54	4,492	10,120	14,612
D55	5,562	9,117	14,679
D56	5,133	9,588	14,721
D57	6,340	8,525	14,865
D58	5,112	9,782	14,894
D59	6,462	8,485	14,947
D60	5,172	9,805	14,977
D61	5,642	9,344	14,986
D62	5,911	9,078	14,989
D63	4,492	10,531	15,023
D64	5,932	9,092	15,024
D65	4,763	10,263	15,026
D66	4,841	10,227	15,068
D67	4,995	10,148	15,144
D68	6,047	9,101	15,148
D69	5,224	9,925	15,149
D70	5,288	9,862	15,150
D71	6,047	9,140	15,187
D72	6,340	8,868	15,208
D73	7,562	7,649	15,211
D74	4,954	10,265	15,219
D75	5,619	9,613	15,232

Tabela 4.13: Resultados para o Caso 3 com UC = US\$ 500,00 por MWh.

DECISÕES DE EXPANSÃO	INVESTIMENTO (10 <sup>6</sup> US\$)	LOLC (10 <sup>6</sup> US\$)	TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
D76	4,170	2,841	7,011
D77	4,492	2,530	7,022
D78	4,005	3,060	7,065
D79	4,629	2,442	7,071
D80	4,308	2,804	7,112
D81	4,199	2,929	7,128
D82	3,577	3,560	7,138
D83	3,899	3,261	7,160
D84	3,840	3,329	7,169
D85	4,199	2,975	7,174
D86	4,520	2,656	7,177
D87	4,445	2,749	7,194
D88	4,598	2,612	7,210
D89	4,299	2,946	7,245
D90	4,598	2,649	7,247
D91	4,519	2,733	7,252
D92	4,736	2,522	7,258
D93	4,900	2,385	7,285
D94	3,247	4,052	7,299
D95	4,355	2,949	7,304
D96	4,646	2,667	7,313
D97	4,920	2,406	7,326
D98	4,947	2,380	7,327
D99	4,579	2,751	7,331
D100	4,627	2,704	7,331

Percebe-se, através dos resultados, que novas decisões ótimas são encontradas. Entretanto, é importante destacar que, em todos os casos, nenhuma das 25 melhores soluções de expansão obtidas no Caso 1 (quando somente o custo de investimento é considerado, que corresponde à utilização

de UC = 0) estão entre as 25 decisões obtidas para todos os novos valores de UC utilizados.

Tabela 4.14: Resultados para o Caso 3 com UC = US\$ 250,00 por MWh.

DECISÕES DE EXPANSÃO	INVESTIMENTO (10 <sup>6</sup> US\$)	LOLC (10 <sup>6</sup> US\$)	TOTAL (10 <sup>6</sup> US\$)
D101	2,273	2,862	5,134
D102	1,942	3,269	5,211
D103	3,276	1,968	5,243
D104	3,247	2,026	5,273
D105	2,535	2,762	5,297
D106	2,406	2,899	5,305
D107	3,276	2,033	5,308
D108	2,736	2,573	5,309
D109	3,413	1,930	5,343
D110	2,620	2,730	5,350
D111	3,247	2,106	5,353
D112	2,410	2,952	5,361
D113	2,720	2,661	5,381
D114	2,998	2,401	5,399
D115	3,384	2,016	5,400
D116	2,620	2,780	5,400
D117	3,413	2,005	5,418
D118	2,390	3,034	5,423
D119	2,620	2,805	5,425
D120	2,826	2,600	5,426
D121	2,592	2,844	5,436
D122	3,184	2,253	5,437
D123	3,329	2,114	5,444
D124	3,606	1,856	5,462
D125	2,841	2,628	5,468

A melhor solução encontrada quando utilizou-se UC = US\$ 2.000,00 por MWh (D51) adiciona os seguintes reforços: um reforço/circuito entre as barras 1-5, 3-

24, 6-7, 6-10, 10-12, 13-14, 14-16, 16-17, 17-18, 20-23, e dois circuitos entre as barras 7-8. Por outro lado, utilizando um UC = US\$ 500,00 por MWh, a melhor solução obtida (D76) acrescenta os seguintes reforços: um reforço/circuito entre as barras 3-24, 6-7, 6-10, 10-12, 13-14, 14-16, 16-17, 20-23, e dois circuitos entre as barras 7-8. Finalmente, a melhor solução encontrada utilizando um valor de UC = US\$ 250,00 por MWh (D101) adiciona os seguintes reforços: um reforço/circuito entre as barras 3-24, 6-10, 10-12, 14-23, e dois circuitos entre as barras 7-8.

Analisando as Tabela 4.1 a Tabela 4.14, percebe-se que o montante investido pelas 25 melhores soluções obtidas para cada valor de UC pode ser considerado como pertencente à mesma gama, exceto para o valor de UC US\$ 250,00 por MWh. É importante destacar que, mesmo utilizando um valor de UC irreal e muito reduzido (US\$ 250,00 por MWh), as decisões de expansão continuam a apresentar um melhor equilíbrio entre investimento e LOLC em comparação com as melhores soluções obtidas no Caso 2 (LOLC *a posteriori*).

A Figura 4.4 é utilizada para ilustrar a região do espaço de busca em torno da melhor solução obtida para o Caso 3, apresentado na Tabela 4.11 (decisão D26). Para construção da Figura 4.4, as melhores soluções obtidas para cada valor de UC, assim como para o Caso 2 (LOLC *a posteriori*), foram utilizadas. No entanto, a LOLC (e consequentemente o custo total) de cada uma das decisões obtidas com UC diferentes de US\$ 1.000,00 por MWh foram reavaliadas utilizando este valor de UC, adotado como valor real. Para cada ponto da Figura 4.4, a diferença entre o custo total e o custo de investimento, corresponde ao respectivo valor da LOLC.

Observa-se através da Figura 4.4, que as decisões com baixos montantes de investimento possuem elevados valores de LOLC, ou seja, resultam em configurações menos confiáveis ou menos robustas. Por outro lado, as decisões com elevado custo de investimento produziram configurações com um bom nível de confiabilidade (LOLC reduzida). No entanto, a redução da LOLC não foi suficiente a ponto de tornar o seu custo total atraente. Por fim, as soluções em que a LOLC foi avaliada *a posteriori*, Caso 2, estão em uma

região diferente do espaço de busca, ou seja, realizar estudos de confiabilidade apenas em uma segunda fase do planejamento não produz um balanço adequado entre investimento e confiabilidade. A Figura 4.4 mostra claramente que a solução ótima, a qual aparece em destaque (•), é a que representa o melhor equilíbrio entre investimento e confiabilidade.

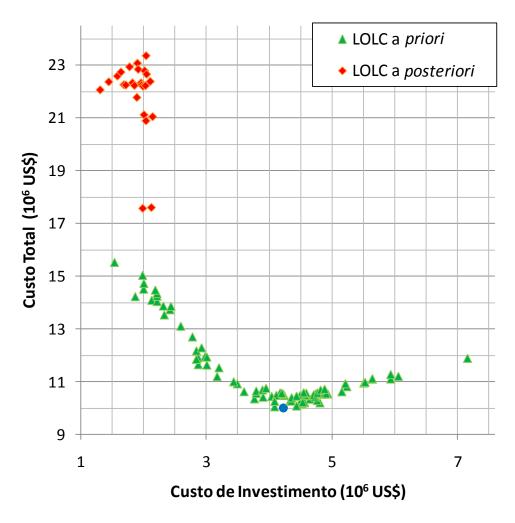


Figura 4.4: Melhores soluções obtidas para cada valor de UC.

Uma análise comparativa das adições propostas pelas melhores soluções encontradas pode ser realizada através da Tabela 4.15. Esta tabela mostra os reforços adicionados em cada uma das três melhores configurações de expansão obtidas para cada estudo realizado (*a posteriori* e diferentes valores de UC).

DECISÕES	CIRCUITOS																
	1-2	1-5	3-24	6-10	7-8	10-11	10-12	11-13	14-16	16-17	17-18	20-23	1-8	2-8	6-7	13-14	14-23
D1	0	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D2	1	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D3	2	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D26	1	1	1	1	2	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
D27	0	1	1	1	2	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
D28	0	1	1	1	2	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0
D51	0	1	1	1	2	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0
D52	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
D53	0	1	1	1	2	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
D76	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
D77	0	1	1	1	2	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
D78	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
D101	0	0	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
D102	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
D103	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0

Tabela 4.15: Reforços adicionados nas melhores soluções encontradas em cada estudo.

## 4.5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os resultados dos estudos de caso, realizados com o propósito de avaliar a aplicação da metodologia proposta, nesta dissertação, para resolver o problema do planejamento estático da expansão da transmissão, considerando o custo da confiabilidade durante o processo de busca das melhores alternativas.

Os parâmetros da meta-heurística ES foram determinados depois de realizadas inúmeras simulações. Vale lembrar que, após ajustes provenientes de testes e de análises cuidadosamente realizadas, os mesmos parâmetros foram utilizados para todos os estudos de caso. Isto demonstra a robustez da meta-heurística ES quando aplicada em diferentes situações.

De acordo com os resultados das simulações realizadas, o custo de interrupção inserido diretamente na função objetivo, obtido através do índice LOLC, é de grande importância na resolução do problema PET. Isto porque a avaliação da confiabilidade de todas as soluções visitadas pelo algoritmo direciona a busca para regiões onde as soluções apresentam um melhor equilíbrio entre investimento e confiabilidade, os quais são objetivos conflitantes.

## **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSÕES**

Os sistemas de transmissão são fundamentais para o suprimento da energia elétrica. Eles são responsáveis pelo fluxo de potência entre as subestações, ou seja, fornecem o caminho para a energia produzida nas centrais elétricas. O bom desempenho do sistema de transmissão é vital para o atendimento aos consumidores com níveis adequados de continuidade de serviço. Portanto, o planejamento da expansão das redes de transmissão, visando atender a demanda futura, é uma tarefa de extrema relevância.

Diante deste contexto, esta dissertação de mestrado apresentou uma nova metodologia para o planejamento de expansão da transmissão (PET), baseada na meta-heurística ES e na SMC não sequencial. O principal objetivo desta metodologia é viabilizar a realização de estudos que incluam o custo da confiabilidade diretamente na função de avaliação das decisões de expansão geradas pelo processo de busca. Desta forma, todos os indivíduos pesquisados (decisões de expansão) são submetidos a uma avaliação da confiabilidade.

A escolha da técnica ES se deu pela eficiência apresentada pela mesma em estudos de expansão da transmissão, realizados nos últimos anos. Esta metaheurística tem apresentado uma grande capacidade para encontrar soluções economicamente competitivas, a um custo computacional adequado aos requisitos da aplicação. Isto pôde ser confirmado mediante os resultados alcançados nesta dissertação. Salienta-se que após a fase de ajuste, os parâmetros da ES foram mantidos constantes para todos os estudos de caso. Isto comprova a robustez da meta-heurística ES quando aplicada em diferentes composições dos custos.

Para a avaliação da confiabilidade das configurações produzidas durante o processo de busca foi escolhida a SMC não sequencial, que apresenta grande

precisão e velocidade de processamento. Adicionalmente, as duas heurísticas e o mecanismo de armazenamento de soluções, apresentaram resultados satisfatórios na redução do custo computacional. Estas ferramentas foram capazes de impedir ou interromper uma grande quantidade de análises de confiabilidade, contribuindo de maneira significativa para a redução do tempo de processamento gasto pela metodologia proposta.

Os estudos de caso apresentados, obtidos com uma configuração do sistema IEEE-MRTS, são esclarecedores sobre a necessidade de uma avaliação mais profunda de todas as configurações produzidas durante o processo de busca. Com a inclusão *a priori* do custo de interrupção de energia (ou seja, LOLC) na função objetivo do problema PET, foram obtidas soluções que mostram um melhor equilíbrio entre investimento e confiabilidade.

A análise sensibilidade das decisões de investimento utilizando diferentes valores para o custo unitário de interrupção mostrou que mesmo para valores de UC distintos do valor adotado como real, as soluções encontradas pelo algoritmo de busca também apresentam um melhor equilíbrio entre investimento e confiabilidade, quando comparadas com o caso *a posteriori* (Caso 2). Este fato reforça a importância da avaliação da confiabilidade *a priori*, mesmo quando não se tem uma definição clara acerca do real valor do custo unitário de interrupção.

Com base nos estudos que foram realizados nesta dissertação é possível apontar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Incluir a consideração das perdas ativas na análise das alternativas de expansão da transmissão, através do modelo de fluxo de potência DC com perdas. Dessa forma, a função objetivo do problema deverá incorporar os custos relativos às perdas ôhmicas;
- Estender a metodologia desenvolvida para o caso da abordagem dinâmica, na qual o principal objetivo é definir onde, quando e quais reforços deverão ser implantados na rede elétrica;

- Utilizar metodologias já empregadas em estudos de confiabilidade de sistemas de grande porte, tais como o processamento paralelo, redes equivalentes, e as técnicas de redução de variância. Além disso, é importante fazer estudos comparativos com a tradicional abordagem "N-1".
- Combinar os conceitos da técnica de otimização ES com outras metaheurísticas, com o objetivo de desenvolver um algoritmo híbrido que aumente a eficiência e a potencialidade para aplicações em sistemas de maiores dimensões:
- Desenvolver uma nova metodologia que considere a presença de incertezas externas, como indefinições nas taxas de interesse e projeções de mercado (demanda e energia), no estudo de planejamento do sistema. O objetivo é obter planos mais flexíveis ou robustos, capazes de suportar os diferentes cenários futuros produzindo uma melhor estratégia de expansão para o sistema;
- Incluir análises de fluxo AC, numa etapa posterior, para que os melhores planos encontrados sejam avaliados de forma mais completa, observando, por exemplo, as condições de carregamento de reativos e dos níveis de tensão;
- Desenvolver uma ferramenta capaz de trabalhar com o processamento distribuído, cujo objetivo é reduzir o tempo computacional necessário na obtenção dos melhores planos de expansão durante a fase de otimização. Tal ferramenta pode ser vital para a realização de planejamentos dinâmicos, principalmente quando aplicados a sistemas de grande porte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [A97] J. I. P. Alvarez, "Planejamento da expansão de sistemas de geração utilizando custos de interrupção," Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, 1997.
- [ACRG05] E. N. Asada, E. Carreno, R. Romero, and A. V. Garcia, "A Branch and Bound Algorithm for the Multi-stage Transmission Expansion Planning," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 17-22, Jun. 2005.
- [ADP07] A. Ahuja, S. Das, and A. Pahwa, "An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Reconfiguration," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 22, no. 3, pp. 1101-1111, 2007.
- [AMC03] N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, "Transmission expansion planning: a mixed-integer LP approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, pp. 1070-1077, Aug. 2003.
- [B04] J. R. P. Barros, "Planejamento da Expansão de Transmissão Baseada em Custos Marginais de Confiabilidade," Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajúba, Ago. 2004.
- [BK93] R. Baldick and E. Kahn, "Transmission planning issues in a competitive economic environment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 1497-1503, Nov. 1993.
- [BOA01] S. Binato, G. C. Oliveira, and J. L. Araújo, "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning," *IEEE Trans.on Power Syst*, vol. 16, pp. 247-253, May 2001.
- [BOPG01] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. V. F. Pereira, and S. Granville, "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, pp. 560-565, Aug. 2001.
- [BPG01] S. Binato, M. V. F. Pereira, and S. Granville, "A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 2, no.

16, p. 235-240, 2001.

- [BSS88] O. Bertoldi, L. Salvaderi, and S. Scalcino, "Monte Carlo Approach in Planning Studies: an aplication to IEEE RTS," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, pp. 1146-1154, 1988.
- [BSZ95a] M. L. Baughman, S. N. Siddiqi, and J. W. Zarnikau, "Integrating transmission into IRP Part I: Analytical approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, pp. 1652-1659, 1995.
- [BSZ95b] M. L. Baughman, S. N. Siddiqi, and J. W. Zarnikau, "Integrating transmission into IRP Part II: Case study results," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, pp. 1660-1666, 1995.
- [CIGRE93] CIGRE Working Group 37.10, "Dealing with Uncertainty in System Planning Has Flexibility Proved to be an Adequate Answer?," ELECTRA, no. 151, pp. 53-65, 1993.
- [CIGRE95] CIGRE Working Group 37.10, "Methods for Planning under Uncertainty Towards Flexibility in Power System Development," ELECTRA, no. 161, pp. 143-164, 1995.
- [CN99] J. L. Ceciliano and R. Nieva, "Transmission Network Planning Using Evolutionary Programming," *Proc. of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 1796-1803, 1999.
- [DE73] Y. P. Dusonchet and A. H. El-Abiad, "Transmission Planning Using Discrete Dynamic Optimization," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-92, pp. 1358-1371, Jul. 1973.
- [DLLW06] Z. Y. Dong, M. Lu, Z. Lu, and K. P. Wong, "A Differential Evolution Based Method for Power System Planning," *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2699-2706, Vancouver, Canada, July 2006.
- [DMC91] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, "Positive Feedback as a Search Stratagy," *Technical Report 91-016*, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- [EGR04] A. H. Escobar, R. A. Gallego, and R. Romero, "Multistage and

Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 735-744, May 2004.

- [ELZ05] A. A. A. Esmin, G. Lambert-Torres, and A. C. Zambroni de Souza, "A Hybrid Particle Swarm Optimization Applied to Loss Power Minimization," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 859-866, May 2005.
- [F75] R. Fischl, "Optimal System Expansion: A Critical Review," System Engineering for Power: Status & Prospects, ERDA & EPRI Conf., Henniker, 1975.
- [F94] D. B. Fogel, "An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 5, no. 1, pp. 3-14, Jan. 1994.
- [FBRF05] H. J. Faria, S. Binato, M. G. C. Resende, and D. M. Falcão, "Power transmission network design by greedy randomized adaptive path relinking," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 1, no. 20, pp. 43-49, Feb. 2005.
- [FGMV96] C. Fleurent, F. Glover, P. Michelon, and Z. Vall, "A Scatter Search Approach for Unconstrained Continuous Optimization," *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 643-648, 1996.
- [FH03] R. Fang and D. J. Hill, "A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 374-380, Feb. 2003.
- [FSGA96] R. N. Fontoura Flho, M. T. Schilling, P. Gomes, and J. C. O. Aires, "Enfrentando incertezas no planejamento da transmissão de sistemas de potência," *V SEPOPE*, Recife, Pernanbuco, SP-31, 1996.
- [G70] L. L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-89, no. 7, Sep. 1970.
- [G86] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to

artificial intelligence," *Computers and Operations Research*, vol. 13, no. 5, pp. 533-549, May 1986.

- [GCCP93] B. G. Gorenstin, N. M. Campodonico, J. P. Costa, and M. V. F. Pereira, "Power System Expansion Planning Under Uncertainty," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, pp. 129-136, 1993.
- [GCGR09] L. P. Garces, A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand, and R. Romero, "A Bilevel Approach to Transmission Expansion Planning Within a Market Environment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1513-1522, 2009.
- [GKOOYVU04] J. F. Gomez, et al., "Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 996-1004, May 2004.
- [GMR98b] R. A. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Comparative studies on nonconvex optimization methodos for transmission network expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 13, pp. 822-828, Aug. 1998.
- [GRM00] R. A. Gallego, R. Romero, and A. Monticelli, "Tabu search algorithm for network synthesis," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 490-495, May 2000.
- [HG90] E. Hirst and C. Goldman, "Key issues in integrated resource planning for electric utilities," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, pp. 1105-1111, 1990.
- [HLB07] L. M. Honório, A. M. Leite da Silva, and D. A. Barbosa, "A Gradient-Based Artificial Immnune System Applied to Optimal Power Flow Problems," *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Berlin, vol. 4628, pp. 1-12, Aug. 2007.
- [I79] IEEE APM Subcommittee, "IEEE Reliability Test System," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-99, pp. 2047-2054, Nov/Dec. 1979.
- [IEEE79] IEEE APM Subcommittee, "IEEE Reliability Test System," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-99, pp. 2047-2054, Nov/Dec. 1979.

- [JCYZ07] Y. X. Jin, H. Z. Cheng, J. Y. Yan, and Zhang.L, "New Discrete Method for Particle Swarm Optimization and its Application in Transmission Network Expansion Planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 227-233, 2007.
- [KE95] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, Dec. 1995.
- [KSBN07] S. Kannan, S. M. R. Slochanal, S. Baskar, and P. Murugan, "Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning in the Partially Deregulated Environment," *IET Ger, Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 1, pp. 111-118, Jan. 2007.
- [KSP05] S. Kannan, S. M. R. Slochanal, and N. P. Padhy, "Application and Comparison of Metaheuristics Techniques to Generation Expansion Planning Problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 466-475, Feb. 2005.
- [L06] G. C. Liao, "Application of an immune algorithm to the short-term unit commitment problem in power system operation," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 3, pp. 309-320, May 2006.
- [LCAV03] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, and A. Villegas, "Classification of publication and model on transmission expansion planning.," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 2, no. 18, p. 938–946, 2003.
- [LMMB00] A. M. Leite da Silva, L. A. F. Manso, J. C. O. Mello, and R. Billinton, "Pseudo-chronological simulation for composite reliability analysis with time varying loads," *IEEE Trans. on Power Syst*, vol. 15, no. 1, pp. 73-80, Feb. 2000.
- [LMRR08] A. M. Leite da Silva, L. A. F. Manso, L. C. Resende, and L. S. Rezende, "Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interruption Costs," *Proceedings of the 10thPMAPS*, Rincón, Puerto Rico, May. 2008.

- [LPMM97] A. M. Leite da Silva, A. G. Perez, J. W. Marangon Lima, and J. C. O. Mello, "Loss of load costs in generation capacity reliability evaluation," *Electric Power Systems Research*, vol. 41, pp. 109-116, 1997.
- [LRHM11] A. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, L. M. Honório, and L. A. F. Manso, "Perfromance Comparison of Meta-Heuristics to Solve the Multi-Stage Transmission Expansion Planning Problem," *IET Ger, Transm. Distrib.*, 2011.
- [LRMR10] A. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, L. A. F. Manso, and 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.
- [LSMRRS09] A. M. Leite da Silva, et al., "Metaheuristic Based Optimization Methods for Transmission Expansion Planning Considering Unreliability," Chapter 4: Optimization Advances in Eletric Power Systems, Nova Publishers, USA, 2009.
- [LSRMSR06] A. M. Leite da Silva, et al., "Evolution Strategies to Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs," *Proceedings of the 9thPMAPS Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, Sweden, 11-15/ Jun. 2006.
- [M99] L. A. F. Manso, "Um ambiente para planejamento de sistemas de geração e transmissão utilizando o valor da confiabilidade," Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, Jun. 1999.
- [MF02] V. Miranda and N. Fonseca, "EPSO Evolutionary 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, Oct. 2002.
- [MI07] H. Mori and Y. limura, "Transmission Network Expansion Planning with a Hybrid Meta-heuristic Method of Parallel Tabu Search and Ordinal Optmization," *International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*, vol. 5, no. 8, pp. 1-6, Nov. 2007.

- [ML04] L. A. F. Manso and A. M. Leite da Silva, "Probabilistic Criteria for Power System Expansion Planning," *Electric Power Systems Research*, vol. 69, no. 1, pp. 51-58, Apr. 2004.
- [MRSLR09] L. A. F. Manso, L. C. Resende, C. E. Sacramento, A. M. Leite da Silva, and L. S. Rezende, "Planejamento da expansão da transmissão sob incertezas internas e externas," *XX SNPTEE*, Grupo VII, GPL/026, Recife, PE, 2009.
- [MS01] H. Mori and Y. Sone, "A Parallel Tabu Search Based Approach to Transmission Network Expansion Planning," *IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto,Portugal,2001.
- [MS07] H. Mori and K. Shimomugi, "Transmission Network Expansion Planning with Scatter Search," *IEEE International Conference on Syst.Man and Cyber*, pp. 3749-3754, Montreal, Canada, Oct. 2007.
- [MSLRSR07] L. A. F. Manso, et al., "Planejamento da Expansão da Transmissão via Estratégias de Evolução Considerando o Valor da Confiabilidade e os Custos de Perdas," XIX SNPTEE, Grupo VII, GPL/026, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- [MSPCPP82] A. Monticelli, et al., "Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-101, pp. 3919-3925, 1982.
- [OBP07] G. C. Oliveira, S. Binato, and M. V. F. Pereira, "Value-Based Transmission Expansion Planning of Hydrothermal Systems Under Uncertainty," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1429-1435, Nov. 2007.
- [PB92] M. V. F. Pereira and N. J. Balu, "Composite generation/transmission reliability evaluation," *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 4, pp. 470-491, Apr. 1992.
- [PLSL05] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 34-42, Feb. 2005.

- [PP85] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, "Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying," *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-104, pp. 381-389, Feb. 1985.
- [PPCO85] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, S. H. F. Cunha, and G. C. Oliveira, "A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning," *IEEE Trans. Power Apparat. Systems*, vol. PAS-104, pp. 3074-3083, 1985.
- [R06] L. S. Rezende, "Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Através de Otimização por Colônia de Formigas," Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG, 2006.
- [RGR07] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "Power System Transmission Network Expansion Planning Using AC Model," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 5, pp. 731-742, Sep. 2007.
- [RLH09] L. S. Rezende, A. M. Leite da Silva, and L. M. Honorio, "Artificial Immune Systems and Differential Evolution Based Approaches Applied to Multi-Stage Transmission Expansion Planning," 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, pp. 1-6, Nov. 2009.
- [RLM08] L. S. Rezende, A. M. Leite da Silva, and L. A. F. Manso, "Aplicação de Colônia de Formigas ao Planejamento Cronológico da Expansão da Transmissão Considerando Restrições de Confiabilidade," XVII CBA Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG, Set. 2008.
- [RM94] R. Romero and A. Monticelli, "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 1, no. 9, p. 373–380, 1994.
- [RMGH02] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, "Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 149, no. 1, pp. 27-36, Jan. 2002.
- [RQ98] H. Rudnick and R. Quinteros, "Power system planning in the south america electric market restructuring," *VI SEPOPE*,

Bahia, Brasil, pp. 24-29, May 1998.

- [RRMM03] R. Romero, C. Rocha, M. Mantovani, and J. R. S. Mantovani, "Analysis of Heuristic Algorithms fot the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network Expansion Systems," *IEE Proc.-Gener.Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 5, pp. 521-526, Sep. 2003.
- [RRMS05] R. Romero, C. Rocha, J. R. S. Montovani, and I. G. Sánchez, "Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning," *IEE Proc.-Gener. Transm.Distrib.;*, vol. 152, no. 2, pp. 277-282, Mar. 2005.
- [RRS07] R. Romero, M. j. Rider, and I. J. Silva, "A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning," *IEEE Trans. on Power Syst*, vol. 22, no. 4, pp. 2289-2291, Nov. 2007.
- [RSM06] T. K. A. Rahman, S. I. Suliman, and I. Musirin, "Artificial Immune Based Optimization Technique for Solving Economic Dispatch in Power System," *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Berlin, vol. 3931, pp. 338-345, March 2006.
- [S04] I. G. SÁNCHEZ CHURA, "Algoritmo de Pontos Interiores Usado no Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ilha Solteira (USP), Ilha Solteira, 2004.
- [S07] C. E. Sacramento, "Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Subtransmissão Através de Meta-Heurísticas," Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, Ago. 2007.
- [S90] L. Salvaderi, "Monte Carlo Simulation Techniques in Reliability Assessment of Composite Generation and Transmission Systems," *IEEE Tutorial Course 90EH0311-1-PWR*, 1990.
- [SB95] S. N. Siddiqi and M. L. Baughman, "Value-Based Transmission Planning and the Effects of Network Models," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 1835-1842, Nov. 1995.
- [SP95] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over

Continuos Spaces," *Technical Report TR-95-012*, ICSI, March 1995.

- [SR95] H. P. Schwefel and G. Rudolph, "Contemporary Evolution Strategies," in F. Morán, A. Moreno, J.J. Merelo and P. Chacón(eds.), "Advances in Artificial Life", 3rd. Int. Conference on Artificial Life, vol. 929 of Lectures Notes in Artificial Intelligence, Springer, Berlin, pp. 893-907, 1995.
- [SRC02] P. S. Sensarma, M. Rahmani, and A. Carvalho, "A Comprehensive Method for Optimal Expansion Planning Using Particle Swarm Optimization," *IEEE Power Eng. Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1317-1322, 2002.
- [SRMR05] I. G. Sánchez, R. Romero, J. R. S. Mantovani, and M. J. Rider, "Transmission Expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear-programming Technique," *IEE Proc.-Gener Transm. Distrib*, vol. 152, no. 6, pp. 763-769, Nov. 2005.
- [SRRGM05] I. J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia, and C. A. Murari, "Transmission Network Expansion Planning with Security Constraints," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 828-836, Nov. 2005.
- [SRRGM98] I. J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, A. V. Garcia, and C. A. Murari, "Transmission Network Expansion Planning with Security Constraints," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 3, pp. 329-335, May 1998.
- [SSL89] A. Seifu, S. Salon, and G. List, "Optimization of transmission line planning including security constraints," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 4, pp. 1507-1513, Oct. 1989.
- [STIS07] T. Sum-Im, G. A. Taylor, M. R. Irving, and Y. H. Song, "A Differential Evolution Algorithm for Multistage Transmission Expansion Planning," *UPEC 2007*, pp. 357-364, Sep. 2007.
- [TGS08] O. B. Tor, A. N. Guven, and M. Shahidehpour, "Congestion-Driven Transmission Planning Considering the Impact of Generator Expansion," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 23, pp. 781-789, May 2008.

- [VBP09] A. Verma, P. R. Bijwe, and B. K. Panigrahi, "Heuristic method for transmission network expansion planning with security constraints and uncertainty in load specifications," *Trans. and Distrib. Conference and Exposition: Asia and Pacific*, Seoul, South Korea, 26-30 Oct. 2009.
- [VGS85] R. Villasana, L. L. Garver, and S. J. Salon, "Transmission Network Planning Using Linear Programming," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 349-356, 1985.
- [VHL05] J. G. Vlachogiannis, N. D. Hatziargyriou, and K. Y. Lee, "Ant Colony System-Based Algorithm for Constrained Load Flow Problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1241-1248, Aug. 2005.
- [VST92] N. Vempati, I. W. Slutsker, and W. F. Tinney, "Orthogonal Sparse Vector Methods," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 926-932, May 1992.
- [WB93] L. Wenyuan and R. Billinton, "A Minimum Cost Assessment Method for Composite Generation and Transmission System Expansion Planning," *IEEE Trans. on Power Reliability Syst*, vol. 8, no. 2, pp. 628-635, May 1993.
- [WC97] F. Wen and C. S. Chang, "Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search Method," *Electric Power Systems Research*, vol. 42, no. 2, pp. 153-163, Aug. 1997.
- [XDW06] Z. XU, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, "Transmission Planning in a Deregulated Environment," *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, vol. 153, no. 3, pp. 326-334, May 2006.
- [XZW07] M. Xie, J. Zhong, and F. F. Wu, "Multiyear Transmission Expansion Planning Using Ordinal Optimization," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1420-1428, Nov. 2007.
- [Y01] H. K. M. Youssef, "Dynamic Transmission Planning Using a Constrained Genetic Algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23, pp. 857-862, 2001.

[YCZ07] B. Yang, Y. Chen, and Z. Zhao, "Survey on Applications of Particle Swarm Optimization in Electric Power Systems," *Proc. IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 481-486, 2007.

[YGD08] Q. Yu, J. Guo, and X. Duan, "Dynamic Muti-stage Transmission Network Expansion Planning," *DRPT 2008*, pp. 635-640, Apr. 2008.

[YH89] H. K. Youssef and R. Hackam, "New transmission planning model," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 4, pp. 9-18, Feb. 1989.

[YHJX05] C. Yuehui, C. Haiyan, C. Jinfu, and D. Xianzhong, "An improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Multistage and Coordinated Planning of Transmission Systems," *IEEE/PES Trans. Distrib. Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1-6, 2005.

[YKFTN00] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, and Y. Nakanishi, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1232-1239, 2000.

[YM10] Y. Gu and J. McCalley, "Market-based transmission expansion planning under uncertainty," *North American Power Symposium* (*NAPS*), Arlington, USA, 26-28/Sept. 2010.