

EDGAR NASCIMENTO

**MODELAGEM GENERALIZADA DO PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO**

Ilha Solteira
2014



EDGAR NASCIMENTO

MODELAGEM GENERALIZADA DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

N244m	Nascimento, Edgar. Modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão / Edgar Nascimento. – Ilha Solteira : [s.n.], 2014 103 f.:il. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2014 Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro Inclui bibliografia 1. Planejamento da expansão de sistemas de transmissão. 2. Plano futuro da rede. 3. Modelo linear disjuntivo. 4. Redução do espaço de busca.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão

AUTOR: EDGAR NASCIMENTO

ORIENTADOR: Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MENDONÇA DA ROCHA
Centro de Engenharias e Ciências Exatas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. EDGAR MANUEL CARREÑO FRANCO
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Data da realização: 27 de fevereiro de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

À minha mãe Honorina Martins, que com seu exemplo me mostrou
como vencer e resistir as lutas diárias de nossa trajetória;

À minha esposa Lusenira Mendes, que muito confiou em mim
sendo minha força nos momentos mais íntimos e difíceis;

À meus filhos Enzo Mateus e Alan Gabriel,
para que o meu exemplo de luta seja um candeeiro em suas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que foi meu amparo nos momentos mais difíceis.

A minha querida esposa Lusenira Mendes e meus filhos Enzo Mateus e Alan Gabriel pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

A minha mãe Honorina Martins, que sonhou o meu sonho junto comigo neste projeto.

Ao Prof. Rubén Romero pela amizade, ideias e paciência nas diretrizes deste trabalho.

A Rinaldo Segundo pelos momentos de apoio e palavras de alento, denodo e determinação.

A todos os meus colegas e amigos do LaPSEE, especialmente aos companheiros e companheiras Adriana Resende, Emivan Ferreira, Jonh Fredy Franco, Hamid Khorasani, Inédio Arcari, Rogério Galois, João de Sousa, Mahdi Pourakrari e Mohsen Rahmani que muito contribuíram em muitos momentos com ideias e sugestões para a conclusão deste trabalhos.

Ao meu amigo Prof. Dr. André Krindges pelo apoio e companheirismo.

A todos os meus colegas e companheiros do programa DINTER CEFET-MT/UNESP pela amizade e palavras positivas.

A Suzana Aparecida da Silva e Tony Inácio da Silva que contribuíram na viabilidade deste projeto.

Aos meus companheiros Marcos Gonçalves, Odilon Novaes, Ivo Brites, Donizete Ritter, Ali Veggi, Lucas Ramalho, Nelcilen Araujo e João Zamperin pela alacridade e comprazimento nestes anos de batalha e convivência.

EPÍGRAFE

“Um pouco de ciência nos afasta de Deus.
Muito, nos aproxima.”

Louis Pasteur (1822-1895)

RESUMO

Neste trabalho foi apresentado uma nova modelagem matemática para problemas de Planejamento da expansão de sistemas de transmissão ao longo prazo que permite uma mudança no conceito de expansão de sistema de transmissão. Nos problemas de planejamento da expansão de sistemas de transmissão tradicionais apenas as adições de linhas candidatas são consideradas. Neste trabalho um novo conceito de planejamento da expansão do sistema de transmissão é encontrar uma nova solução para a topologia base onde todas as linhas estão temporariamente desconectadas e a implementação dessas linhas são reconsideradas quando elas podem voltar à sua posição anterior. Portanto as linhas da topologia de base não será restabelecida se impedir o desempenho do sistema. Depois um novo problema é resolvido para encontrar o plano futuro da rede do sistema elétrico, com a adição de novas linhas de candidatas na topologia base modificada. A fim de encontrar um plano mais eficiente para a rede futura, a metodologia proposta é implementada usando a linguagem de modelagem para a programação matemática (AMPL) e solucionada usando o solver comercial CPLEX. A fim de validar a abordagem proposta e fazer alguma comparação com o método na literatura, três sistemas de testes são realizados, tais como: o sistema de 24-Bus IEEE teste com 41 linhas de candidatas, um estudos de casos práticos do sistema de 46-Bus do Sul do Brasil com 79 linhas de candidatas, e do sistema colombiano 93-Bus com 155 candidatas. Para sistemas de grande porte, a fim de facilitar a implementação do modelo matemático, uma estratégia é apresentada para reduzir o espaço de busca das barras em que a geração ou a demanda. Nos problemas de planejamento da expansão da transmissão geralmente nos deparamos com um problema de programação não-linear inteira mista (PNLIM) usando o modelo DC, o que torna impossível usar o solver linear de CPLEX. A estratégia para superar este problema é o uso do modelo linear disjuntivo, que é um modelo equivalente linear DC. As modificações relevantes do modelo linear disjuntivo tornam possível para modelar o problema novo sob a forma de um problema de programação linear inteira mista (PLIM), onde é resolvido por solvers lineares.

Palavras-chave: Planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Plano futuro da rede. Modelo linear disjuntivo. Redução do espaço de busca.

ABSTRACT

In this work and in order to solve the long-term transmission expansion planning problems, a novel mathematical model which is based on a change in the concept of expanding a transmission system is presented. In traditional transmission system expansion planning, only the additions of candidate lines are considered. In this work, a new concept of transmission system expansion planning is to find a new solution for the base topology where all the lines are temporarily disconnected and the implementation of these lines are reconsidered when they may return to their previous position. Therefore, the lines of the base topology will not be reconnected if they prevent the system performance. Afterwards a new problem is solved to find the future plan of the electrical system network with the addition of new candidate lines in the modified base topology. In order to find a more efficient plan for the future network, the proposed methodology is implemented using a Modeling Language for Mathematical Programming (AMPL) and solved using the commercial solver of CPLEX. In order to validate the proposed approach and make some comparison with the method in the literature, three test systems are conducted such as: the 24-Bus IEEE test system with 41 candidate lines, a practical case studies of 46-Bus South Brazilian system with 79 candidate lines, and the 93-Bus Colombian system with 155 candidates. For large-scale systems, in order to facilitate the implementation of the mathematical model, a strategy to reduce the search space of the buses in which the generation or demand has been presented. In the transmission expansion planning problems, usually we face with a mixed integer non-linear programming problem (MINLP) using the DC model, which make it impossible to use the linear solver of CPLEX. The strategy to overcome this problem is using the disjunctive linear model, which is a DC linear equivalent model. The relevant modifications of the disjunctive linear model make it possible to model the new problem in the form of a mixed integer linear programming problem (MILP) which is solved by linear-based solvers.

Keywords: Expansion planning transmission systems. Reduce the search space. Plan future network. Disjunctive linear model. Reduce the search space.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Segmentos do setor energético.	17
Figura 2	Visão Geral do Setor.	18
Figura 3	Árvore de particionamento com os nós correspondentes.	39
Figura 4	Classificação das heurísticas.	42
Figura 5	Algoritmo AHC.	44
Figura 6	Categorias dos problemas.	50
Figura 7	Diagrama do sistema IEEE de 24 barras.	59
Figura 8	Diagrama do sistema sul brasileiro de 46 barras.	63
Figura 9	Diagrama do sistema colombiano de 93 barras.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário A.	77
Tabela 2	Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário A.	78
Tabela 3	Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário B.	79
Tabela 4	Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário B.	80
Tabela 5	Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário C.	81
Tabela 6	Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário C.	82
Tabela 7	Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário D.	84
Tabela 8	Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário D.	84
Tabela 9	Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário E.	86
Tabela 10	Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário E.	87
Tabela 11	Dados de barras: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário A. . . .	89
Tabela 12	Dados de ramos: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário A. . . .	90
Tabela 13	Dados de barras: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário B. . . .	91
Tabela 14	Dados de ramos: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário B. . . .	93
Tabela 15	Dados de barras: Sistema Colombianos de 93 barras.	95
Tabela 16	Dados de ramos: Sistema Colombiano de 93 barras.	98

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABRADEE	Associa Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AC	alternating current
AHC	Algoritmo heurístico construtivo
AMPL	<i>Modeling Language for Mathematical Programming</i>
DC	direct current
CPLEX	<i>Solver "Algoritmo Simplex com linguagem C++"</i>
CPU	Central processing unit
EMU	Equipamentos Multi-usuários
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
LaPSEE	Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
PC	Problema candidato
PCR	Problema candidato relaxado
PERT	Planejamento da Expans da Rede de Transmiss
PEST	Planejamento da Expans de Sistema de Transmiss
PL	Programa linear
PLIM	Programa linear inteiro misto
PNLIM	Problema de programa não-linear inteiro misto
POO	Programa orientada a objeto
PR	Problema relaxado
SDH	Algoritmo de busca através de vizinhança - Steepest Descent Heuristic
SEE	Sistema de Energia Elétrica
VNS	Busca em Vizinhança Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

v	Custo de investimento das adições de circuitos no sistema
Ω_ℓ	Conjunto de ramos
Ω_b	Conjunto de barras
c_{ij}	Custo de um circuito adicionado no caminho $i - j$
n_{ij}	Número de circuitos adicionados no caminho $i - j$
f_{ji}	Fluxo total de potência ativa adicionada no caminho $i - j$
g_i	Geração da barra i
d_i	Demanda na barra i
n_{ij}^0	Número de circuitos existentes na configuração base
$\bar{f}_{ij}$	Fluxo de potência máximo permitida no caminho $i - j$
$\bar{g}_i$	Geração máxima da barra i
$\bar{n}_{ij}$	Número máximo de linhas que podem ser adicionados no caminho $i - j$
γ_{ij}	Susceptância de um circuito no caminho $i - j$
S	Matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema
θ_i	Ângulos de tensão na barra terminal do caminho i
θ_j	Ângulos de tensão na barra terminal do caminho j
x_{ij}	Reatância de um circuito no caminho $i - j$
f_{ji}^0	Fluxo total de potência ativa existente no caminho $i - j$
$w_{ij,y}$	Representação binária da variável n_{ij}
Y	Conjunto das variáveis binárias
M	Constante de valor muito grande (big M)
n'_{ij}	Número de linhas que deve ser adicionadas a custo unitário negativo (-1)
n''_{ij}	Número de linhas que foram retiradas da topologia base
z_{ij,y^0}	Número de linha de transmissão que já está disponível na topologia base
n_{ij}^1	variável que armazena os circuitos adicionados em cada passo do processo de otimização
f_{ji}^v	fluxos de todos os circuitos adicionados
$A_{t,m}$	matrizes binárias representando a restrições de cerca para as linhas já existentes na topologia base
$B_{t,m}$	matrizes binárias representando a restrições de cerca para as linhas a serem adicionadas ao sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	<i>O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO</i>	18
1.2	<i>MODELOS MATEMÁTICOS USADOS</i>	19
1.3	<i>TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO USADAS</i>	21
1.4	<i>O TEMA ABORDADO NA TESE</i>	21
2	O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.	23
2.1	<i>INTRODUÇÃO</i>	23
2.2	<i>MODELAGEM MATEMÁTICA BÁSICA</i>	24
2.2.1	MODELO DE TRANSPORTES	25
2.2.2	MODELO DC	26
2.2.3	MODELO LINEAR DISJUNTIVO	27
2.3	<i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	30
3	TÉCNICA DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	36
3.1	<i>INTRODUÇÃO</i>	36
3.2	<i>MÉTODOS EXATOS</i>	36
3.2.1	A DECOMPOSIÇÃO MATEMÁTICA DE BENDERS	36
3.2.2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO TIPO BRANCH AND BOUND	37
3.3	<i>HEURÍSTICAS</i>	41
3.3.1	O ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO	43
3.3.2	A HEURÍSTICA DE BUSCA ATRAVÉS DE VIZINHANÇA	46
3.4	<i>METAHEURÍSTICAS</i>	48

3.5	<i>TÉCNICAS CLÁSSICAS DE OTIMIZAÇÃO</i>	49
4	MODELAGEM GENERALIZADA DA EXPANSÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	51
4.1	<i>INTRODUÇÃO</i>	51
4.1.1	MODELO DC COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	51
4.1.2	MODELO LINEAR DISJUNTIVO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	53
4.1.3	REDUÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA POR ADIÇÃO DE RESTRIÇÕES DE CERCA DO SISTEMA COLOMBIANO	55
5	TESTES E RESULTADOS	58
5.1	<i>INTRODUÇÃO</i>	58
5.2	<i>O SISTEMA IEEE DE 24 BARRAS</i>	58
5.2.1	PLANEJAMENTO SEM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO IEEE DE 24 BARRAS	60
5.2.2	PLANEJAMENTO COM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO IEEE DE 24 BARRAS	61
5.3	<i>O SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS</i>	63
5.3.1	PLANEJAMENTO SEM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS	64
5.3.2	PLANEJAMENTO COM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS	64
5.4	<i>SISTEMA COLOMBIANO</i>	65
5.4.1	PLANEJAMENTO SEM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA COLOMBIANO	66
5.4.2	PLANEJAMENTO COM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA COLOMBIANO	67
6	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS	70

	APÊNDICE A - Dados dos Sistemas Testes Utilizados	77
A.1	<i>Sistema IEEE de 24 barras</i>	77
A.2	<i>Sistema Sul Brasileiro de 46 barras</i>	89
A.3	<i>Sistema Colombiano de 93 barras</i>	95
	APÊNDICE B - TRABALHO PUBLICADO PELO AUTOR	103

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem de consumo fundamental para a sociedade moderna e seu fornecimento impacta diretamente no desenvolvimento econômico e social das nações. O desenvolvimento e a qualidade de nossas vidas e de nosso trabalho são totalmente dependentes de um fornecimento contínuo, abundante e econômico de energia. Isto explica porque as fontes primárias de energias estão se tornando cada vez mais escassas e caras. Dentro dessa estrutura, a eletricidade está se transformando na forma favorita de energia usada pelos consumidores finais; carvão, petróleo, gás, urânio e outras fontes primárias são usadas para gerar eletricidade.

As relações do sistema de energia elétrica está dividido em quatro grandes segmentos: Geração, Consumidores, Distribuidores e a Transmissão. O primeiro grupo (responsável pela geração) tem uma importância significativa, pois é ele o responsável pela produção de energia elétrica em suas diversas modalidades: hidroelétrica, eólica, termoelétrica, nuclear, solar entre outras tantas e injetá-la nos sistemas de transmissão e distribuição.

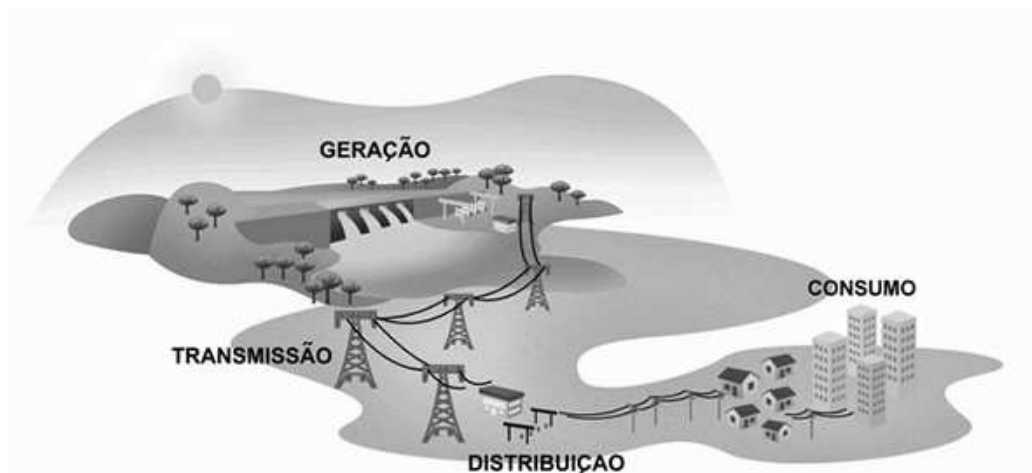
Os consumidores são a parte que necessitam da energia elétrica para objetivar seus afazeres, criando assim uma demanda para o seu uso e suas aplicações.

O segmento de distribuição, por sua vez, é aquele que recebe grande quantidade de energia do sistema de transmissão e a distribui de forma pulverizada para consumidores médios e pequenos. Existem também unidades geradoras de menor porte, normalmente menores do que 30 MW, que injetam sua produção nas redes do sistema de distribuição.

No Brasil, o segmento de distribuição é composto por 63 concessionárias, as quais são responsáveis pela administração e operação de linhas de transmissão de menor tensão (abaixo de 230 kV), mas principalmente das redes de média e baixa tensão, como aquelas instaladas nas ruas e avenidas das grandes cidades. É a empresa distribuidora que faz com que a energia elétrica chegue às residências e pequenos comércios e indústrias (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADEE, 2014).

Por fim o sistema de transmissão que tem por papel fazer a ligação entre os geradores e os consumidores como demonstrado na figura 1.

Figura 1 - Segmentos do setor energético.



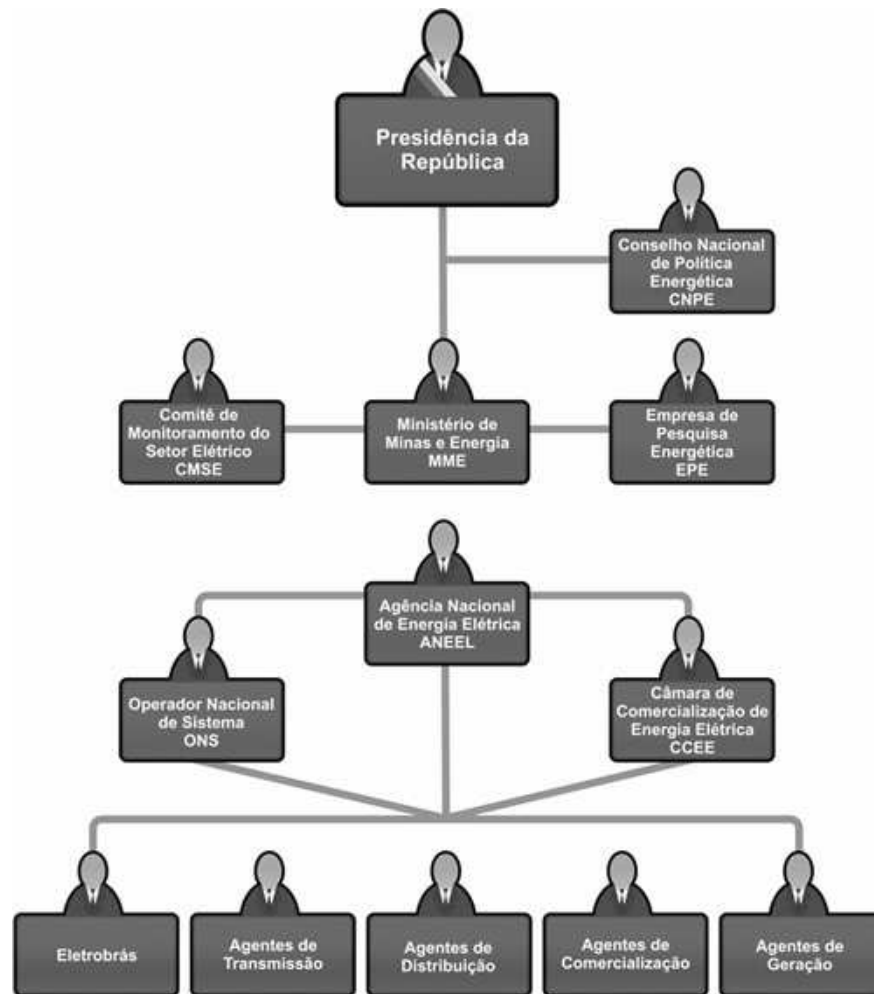
Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADDEE, 2014)

Existem ainda agentes que regulam e controlam o setor, para garantir que empresas geradoras e consumidores possam exercer suas atividades de compra e venda da eletricidade. Para que possam ser reguladas e fiscalizadas as relações de compra e venda de eletricidade, tarifas de curto ou longo prazo, entre outros problemas que afetam a operação é que existem os agentes reguladores demonstrado na figura 2.

Entre os problemas de estes agentes podem-se classificar suas tarefas em longo, médio e curto prazo. Nos problemas de longo prazo temos as tarefas de planejamento do sistema de geração e do sistema de transmissão, os quais permitem definir previamente os custos de investimentos, custos de expansão e localização dos futuros investimentos necessários para que o sistema opere adequadamente no futuro. Isto se deve porque o tempo de construção de uma usina elétrica de grande porte e das linhas de transmissão de alta tensão, leva vários anos (ZU-LUAGA, 2008).

O problema de Planejamento da Expansão da Rede de Transmissão (PERT) a longo prazo, é um problema clássico de sistemas de energia elétrica, onde o objetivo é encontrar um plano ótimo da expansão, ou seja, especificar os recursos (linhas e/ou transformadores) que devem ser instalados na rede para permitir uma melhor operação num horizonte de tempo pré-definido a um menor custo. Os dados usados desse problema geralmente são: a topologia atual (ano base), os circuitos candidatos, a geração e a demanda para o fim do período de planejamento, as restrições de investimento e etc. O plano ótimo de expansão deve definir onde, quantos e quando os novos circuitos devem ser instalados (SILVA, 2013).

Figura 2 - Visão Geral do Setor.



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADDEE, 2014)

1.1 O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

O estudo da expansão do sistema de transmissão brasileiro é importante para que ao curto ou ao longo prazo o planejamento dos sistemas elétricos de potência seja adequado para a realidade em que vivemos, e assim seja possível a criação de políticas de planejamento efetivas com o objetivo de prever racionamentos, demanda de consumo, qualidade de fornecimento e confiabilidade no sistema elétrico. O objetivo é encontrar um plano de expansão para a rede de transmissão que seja o mais econômico para um determinado futuro (BINATO, 2000).

O planejamento da expansão do sistema de transmissão de sistemas de energia elétrica é uma tarefa complexa envolvendo a determinação de quais linhas de transmissão devem ser

construídas e/ou transformadores que devem ser instalados. Adicionalmente, é necessário determinar quando estas ampliações devem entrar em operação para garantir um atendimento confiável e econômico da demanda planejada para um determinado ano futuro.

Sempre se procura determinar um plano de expansão do sistema de transmissão que tenha mínimo custo operacional, a um menor custo computacional, o que depende diretamente da qualidade definida em uma alternativa de expansão prevista antecipadamente. Contudo, em geral, esta etapa não é devidamente considerada nas metodologias propostas para resolver este problema, ficando a cargo do próprio especialista.

1.2 MODELOS MATEMÁTICOS USADOS

Segundo (SOCORRO,) diversas situações podem ser estudadas de forma mais abrangentes se representadas através de modelos que capturem seus principais elementos. Um modelo matemático de otimização envolve a representação de um problema ou situação através de um conjunto de relações matemáticas tais como: equações, inequações, dependências lógicas, e funções. São várias as razões para a construção de modelos de otimização, entre elas podemos destacar: aumentar o grau de entendimento da situação do problema estudado; analisar a situação do problema e propor soluções que não sejam aparentes; experimentar diversos cenários que de outra forma não seria possível, ou recomendável (WILLIAMS, 1999).

Taube (TAUBE, 2002) destaca outras razões sob o ponto de vista da gestão empresarial. Modelos de otimização linear e otimização linear inteira podem ser úteis na resolução de um grande número de problemas em diversas áreas do conhecimento.

Para construir um modelo de otimização que represente um determinado problema é necessário identificar inicialmente quais são os elementos conhecidos que geralmente são associados ao que sabemos sobre o problema, e quais são os elementos desconhecidos associados ao que queremos determinar ao solucionar o problema. Nem sempre a identificação destes elementos é imediata. A facilidade de obtenção destas informações depende diretamente do grau de organização do pesquisador e do objeto em cada estudo.

Para encontrá-las, algumas simplificações do sistema físico real estudado são necessárias. Estes elementos serão importantes para a construção do modelo matemático, é através deles que serão definidos os parâmetros, as constantes, as variáveis e a função objetivo do problema.

Em geral um grande número de valores podem ser associados a estas variáveis e consequentemente é necessário definir um critério, ou objetivo, para seleção da melhor alternativa. Este critério será traduzido através de uma função das variáveis de decisões que será chamada de função-objetivo. Neste ponto surge a questão: "Quais são os impedimentos que restringem a tomada de decisões?". Estes impedimentos dão origem às equações e inequações lineares que

formam o conjunto de restrições do modelo. Os elementos conhecidos são chamados de dados e fornecerão os coeficientes das variáveis e os termos constantes nas restrições e da função objetivo.

É com este objetivo que se discutirá algumas aplicações de modelos matemáticos no problema de planejamento da expansão de transmissão de energia elétrica. Na resolução dos problemas de planejamento ótimo da expansão do sistema de transmissão, é necessário identificar e implementar dois processos muito importantes: a modelagem matemática e a técnica de resolução escolhida para este modelo matemático. A modelagem matemática é uma fase que apresenta grandes dificuldades, pois não é um modelo que represente fielmente o problema de expansão com todos os detalhes reais.

Neste contexto, utilizam-se modelos já existentes que já demonstraram empiricamente semelhança com o problema estudado. Na maioria das vezes se modifica estes modelos para que seja possível usar uma técnica de resolução satisfatória. Nesta tese foi adotado comparativo entre o modelo DC (ou o modelo alternativo chamado de disjuntivo) e o modelo DC modificado (modelo linear disjuntivo modificado).

Inicialmente, estudou-se o modelo de transporte que possui por característica utilizar a primeira lei de Kirchhoff (lei dos nós) na sua representação. Esta lei define que a soma algébrica dos fluxos que chegam ou partem de um nó, somando a geração, deve ser igual a demanda neste nó. Outras restrições são triviais e representam apenas restrições de limites de geração e de circuitos adicionados em cada caminho candidato $i - j$.

O modelo DC é o segundo modelo estudado e possui por característica satisfazer as duas leis de Kirchhoff. Define que em todos os laços do sistema elétrico a soma algébrica de todas as tensões ao longo de qualquer caminho fechado deve ser igual a zero (lei das malhas).

Em busca de novas técnicas de resolução para o problema de expansão do sistema de transmissão, às vezes é mais adequado a modificação na modelagem conhecida como modelagem básica dos modelos já conhecidos. A técnica mais utilizada é a utilização de geradores artificiais em todas as barras de cargas com o objetivo de tornar o problema de planejamento modificado mais fácil de ser resolvido usando técnicas e algoritmos que já são conhecidos. Analisando o problema pelo ponto de vista matemático, estes geradores artificiais são apenas variáveis artificiais que levam a um problema com solução ótima equivalente. Deve-se que ressaltar que após o termino do processo de solução, todas estas variáveis devem ser iguais a zero para satisfazer o problema inicial (ROMERO, 1993).

O modelo linear disjuntivo é uma modificação do modelo DC que é um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), que por sua vez apresenta termos não lineares. Buscamos transformar o modelo DC que é a modelagem ideal, trocando as variáveis binárias em termos binários e reais e, assim encontrar o modelo linear disjuntivo. Assim passamos a ter

um problema de programação linear inteiro misto (PLIM). A técnica usada é separar os termos não-lineares em termos lineares incorporando um valor M muito grande ao problema. Uma análise detalhada é possível em (BINATO; PEREIRA; GRANVILLE, 2001).

1.3 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO USADAS

Na literatura podem-se distinguir três grandes grupos de algoritmos empregados na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão (VERLY; OLIVEIRA, 2009): (i) algoritmos Heurístico Construtivos - estes algoritmos geralmente utilizam técnicas de otimização contínua. São robustos e encontram geralmente soluções de boa qualidade com pouco esforço computacional, porém dificilmente encontram soluções ótimas globais, principalmente em relação a sistemas reais e/ou de grande porte (GARVER, 1970b; MONTICELLI et al., 1982); (ii) algoritmos de Otimização Clássica - usam técnicas de decomposição matemática (LEVI; CALOVIC, 1991; PEREIRA et al., 1985) e geralmente encontram soluções ótimas globais de sistemas de pequeno e médio porte. Entretanto, para sistemas de grande porte, estes algoritmos podem apresentar problemas de convergência e de esforço computacional; (iii) algoritmos Combinatórios - encontram soluções ótimas ou sub-ótimas mesmo para sistemas de maior porte, porém com esforço computacional bastante elevado e até proibitivo. Entre os principais algoritmos de otimização combinatória utilizados pode-se mencionar o *Simulated Annealing* (ROMERO; GALLEGO; MONTICELLI, 1996), o Algoritmo Genético (OLIVEIRA et al., 2000; SILVA; GIL; AREIZA, 2000), o Algoritmo de Busca Tabu (SILVA et al., 2001), entre outros. Os algoritmos presentes neste último grupo, como já mencionado, são capazes de encontrar soluções ótimas e/ou sub-ótimas para sistemas de pequeno, médio e grande porte, porém com alto tempo computacional. Entretanto, sabe-se que a inicialização destes algoritmos tem fator preponderante na qualidade da solução e no tempo de execução destes métodos.

1.4 O TEMA ABORDADO NA TESE

A modelagem do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão é tema de suma relevância nos dias atuais, por consequência do Brasil estar em pleno crescimento nos setores industriais, comerciais e crescimento populacional, que requer uma demanda maior de energia elétrica. O problema está em garantir a chegada da energia elétrica nos locais de demanda e garantir o fornecimento constante independente de fatores climáticos e assim minimizar os casos de "apagões" de fornecimento.

Segundo Verly e Oliveira (2009) o setor de energia elétrica brasileiro enfrenta profundas alterações, uma vez que o cenário de desverticalização da indústria da energia elétrica introduz a competição nos segmentos de geração e comercialização de energia. Nesse contexto,

o planejamento da expansão de sistemas de transmissão torna-se uma tarefa difícil devido às incertezas de mercado e de algumas características peculiares como: alta taxa de crescimento, predominância de geração hidráulica e transporte de grandes blocos de energia.

O planejamento de expansão de sistemas de transmissão busca determinar, entre um conjunto de circuitos candidatos à expansão, quais devem ser construídos, de modo que o sistema opere adequadamente dentro de um horizonte de planejamento previamente conhecido, com o menor custo de investimento possível.

O problema é de difícil solução e apresenta alguns fatores complicadores: (i) apresenta vários pontos de mínimos locais, que leva a maioria dos algoritmos a uma convergência prematura em um ponto de ótimo local; (ii) natureza combinatória do processo de decisão, que conduz a explosão combinatória de alternativas e conseqüentemente ao elevado tempo de processamento; (iii) a possibilidade da existência de sistemas elétricos não conexos, o que requer um tratamento especial para evitar problemas de singularidades no processo de otimização.

Neste trabalho será abordado em detalhes um tipo de modelagem matemática, isto é, um modelo matemática em que é possível desligar linhas de transmissão existentes na topologia básica como parte do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão. Assim, o modelo DC tradicional é modificado de forma que seja possível desligar linhas de transmissão da topologia base, além da possibilidade de adicionar novas linhas de transmissão.

Deve-se observar que é surpreendente verificar que esse tipo de modelagem encontra soluções que são mais baratas que as eventualmente encontradas pela modelagem tradicional. Para resolver esse modelo matemático, transformamos o modelo DC modificado foi transformado em modelo linear disjuntivo equivalente. Finalmente, o modelo linear disjuntivo é resolvido usando o solver CPLEX (ILOG, 2008) e o assistente AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003).

2 O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.

Conforme Binato (2000) o problema de planejamento de expansão de redes de transmissão consiste em determinar o plano ideal de expansão mais econômico da rede de transmissão já existente, conhecida como rede básica. A expansão tem por necessidade atender um mercado de ano futuro, pois a rede básica não tem esta capacidade. Os estudos são feitos na rede básica para o levantamento de dados como a previsão de carga futura e o despacho dos geradores para atender o mercado.

2.1 INTRODUÇÃO

O problema de planejamento da expansão de sistemas elétricos é um problema de grande relevância no setor elétrico e que deve ser solucionado para garantir que os consumidores sejam atendidos de forma econômica e confiável com o aumento da demanda de energia com o passar dos anos. Isto é, ele representa um problema real de um sistema elétrico que está implantado e em funcionamento, possuindo suas características específicas de tecnologia, cargas e linhas.

A estrutura de gerenciamento do sistema elétrico Brasileiro tem por característica uma gestão descentralizada pelos agentes do setor (agentes de geração, agentes de transmissão, agentes de distribuição, entre outros) que devem decidir onde e quando investir seus recursos para expandir seus sistema.

Este processo deverá sofrer a interferência de um agente central que deve funcionar como um plano de referência de forma a garantir uma expansão ótima global do sistema, otimizando a utilização dos recursos disponíveis com qualidade satisfatória, e os custos para os consumidores. As decisões do processo de planejamento estão relacionadas à seleção das melhores unidades geradoras, das melhores rotas de transmissão e das melhores malhas para garantir um suprimento de energia de forma econômica e confiável.

Este processo de tomada de decisões dá origem a um tipo de problema de otimização complexo que deve ser resolvido pelos engenheiros de planejamento. Para uma melhor tomada de decisão ótima ou as melhores decisões possíveis, são desenvolvidas estratégias e técnicas de solução do problema que assegurem um resultado ótimo que permita minimizar os custos de investimento em novos circuitos alcançando um nível de qualidade no sistema (TAGLIALENHA, 2008).

Um dos primeiros passos na resolução deste problema é a busca e a construção de um modelo matemático, como também é a busca e escolha de uma técnica de resolução que possa ser aplicada a este problema permitindo uma solução ótima para a topologia futura de longo prazo (10 anos ou mais) que permita um bom funcionamento do sistema de transmissão.

2.2 *MODELAGEM MATEMÁTICA BÁSICA*

Os problemas de planejamento de sistemas de transmissão de energia elétrica são desafios na questão de modelar o problema assim, como em escolher adequadamente a técnica de solução para este modelo matemático. No caso de problemas da vida real, a modelagem matemática pode ser uma representação exata ou simplificada do problema e normalmente a medida que há melhorias no modelo matemático do problema real, as técnicas de soluções se tornam mais complexas, e há ainda a característica que certos modelos se adaptam mais a certas técnicas de soluções do que outras. Assim deve haver um compromisso entre a modelagem matemática adotada e a técnica de solução escolhida (ZULUAGA, 2008).

No planejamento de sistemas de transmissão, se parte da premissa de que existe um sistema elétrico, com uma topologia base, e o que se deseja é encontrar o plano de expansão ótimo para o problema específico.

Como já foi dito, a modelagem matemática ideal para indicar a operação adequada consiste em representar o problema por meio das relações matemáticas de fluxo de potência AC (Alternating Current). Entretanto, em planejamento de sistemas de transmissão, essa representação passa por diversas dificuldades como: (1) a existência de barras isoladas ou ilhadas; (2) o planejamento de sistemas de transmissão soluciona somente o fornecimento de potências ativas no sistema elétrico, e o fornecimento reativo é resolvido posteriormente (MANTOVANI, 2004).

A modelagem matemática ideal para indicar as operações futuras seria o fluxo de carga AC, entretanto o uso do modelo de carga AC do sistema de transmissão para resolver o problema de planejamento de expansão de sistemas de transmissão é incipiente, pois existem raras publicações na literatura especializada em que seja usado esse modelo (RIDER; GARCÍA; ROMERO, 2007). Desde 1960, os pesquisadores verificaram que não era possível trabalhar com o modelo de fluxo de cargas AC em trabalhos de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, e começou então, a ser explorado o modelo de fluxo de cargas DC (Direct Current). Hoje a maioria dos pesquisadores concordam que o modelo DC (ou o modelo equivalente chamado de linear disjuntivo) é o modelo ideal para trabalhos de planejamento da expansão do sistema de transmissão.

Segundo Garver (1970a) deve-se buscar por modelos mais relaxados, que permitam encontrar topologias ou configurações ótimas, mesmo usando modelos matemáticos aproximados.

2.2.1 MODELO DE TRANSPORTES

O modelo de transporte foi a primeira proposta de modelagem matemática usada com sucesso no problema de planejamento de sistemas de transmissão. O modelo de transporte foi inicialmente apresentado por Garver (GARVER, 1970a) e representou uma proposta fundamental na pesquisa em planejamento da expansão sistemas de transmissão porque era a única forma de otimizar o problema com as técnicas de otimização disponíveis naquela época. Esses modelos relaxados, diferentes dos usados na análise de operação, foram chamados de modelos de síntese de sistemas de transmissão. O modelo de transporte, assim como todos os modelos de síntese, faz apenas o planejamento considerando o fluxo de potência ativa e, portanto, resolve apenas o problema de capacidade de transmissão (ZULUAGA, 2008).

Sugeriu-se, então, resolver a modelagem matemática do fluxo de carga DC relaxado, que considera apenas a primeira lei de Kirchhoff (Lei das correntes), e a capacidade de operação de circuitos e geradores. A primeira lei de Kirchhoff determina que a soma dos fluxos que entram em uma barra devem ser igual à soma dos fluxos que saem da mesma barra do sistema. Neste contexto, a modelagem matemática é um problema de programação linear inteiro misto (PLIM). Levando isto em consideração obtêm-se uma modelagem pouco adequada para problemas reais, e que em comparação com a solução obtida através do que o modelo DC e pode ser pouco adequada para estes problemas.

A seguir, é apresentada formulação do modelo matemático de transporte na seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} n_{ij} \quad (1a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_\ell} f_{ij} + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1b)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (1c)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (1d)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (1e)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (1f)$$

em que Ω_ℓ e Ω_b são os conjuntos de ramos e barras (caminhos), respectivamente. O valor de v é o custo de investimento das adições de circuitos no sistema, c_{ij} é o custo de um circuito adicionado no caminho $i - j$, n_{ij} é o número de circuitos adicionados no caminho $i - j$, f_{ij} representa o fluxo total de potência ativa através no caminho $i - j$, g_i é a geração da barra i , d_i é a demanda na barra i , n_{ij}^0 representa o número de circuitos existentes na configuração base, $\bar{f}_{ij}$ representa o fluxo de potência máxima permitida para cada linha no caminho $i - j$, $\bar{g}_i$ é a

geração máxima da barra i e $\bar{n}_{ij}$ é o número máximo de linhas que podem ser adicionadas no caminho $i - j$.

As variáveis de decisão e a estrutura matemática do modelo de transporte apresentado originalmente por Garver é diferente de (1a), (1b), (1c), (1d), (1e) e (1f), mas são equivalentes entre si.

Neste modelo, a equação (1b) representa a primeira lei de Kirchhoff para cada barra do sistema, sendo que a equação (1c) representa as restrições de capacidade de transmissão em forma de valor absoluto, pois os fluxos de potência podem ter os dois sentidos.

A grande vantagem do modelo de transporte é o fato de ser linear usando somente a primeira lei de Kirchhoff e descartando os fatores não lineares da segunda lei de Kirchhoff. Assim não há diferença se o problema sob estudo é conexo ou ilhado pois sua resolução segue o mesmo padrão. A desvantagem é que a solução do modelo de transporte geralmente está distante da solução correspondente ao modelo DC, por não ser usada a segunda lei de Kirchhoff.

2.2.2 MODELO DC

O modelo DC é uma generalização do modelo de fluxo de carga DC, que está amplamente desenvolvido em (MONTICELLI et al., 1982), e é o modelo mais explorado em planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Neste modelo todos os circuitos devem obedecer as duas leis de Kirchhoff. Assim, o modelo matemático é um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM) de alto grau de complexidade.

Este modelo é considerado o ideal a ser utilizado neste problema, e a maioria de novas técnicas de otimização são propostas para resolvê-lo.

A literatura especializada apresenta testes experimentais exaustivos mostraram que as topologias encontradas usando o modelo DC apresentam um bom desempenho quando comparadas com os modelos de operações de sistemas de corrente alternada. A modelagem assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} n_{ij} \quad (2a)$$

s.a.

$$Sf + g = d \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (2b)$$

$$f_{ij} - \gamma_j(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (2c)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (2d)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (2e)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (2f)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (2g)$$

$$f_{ij}^0 \text{ e } \theta_j \text{ irrestritos} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (2h)$$

tendo na formulação acima: γ_{ij} , susceptância de um circuito no caminho $i - j$; θ_i e θ_j são os ângulos de tensão nas barras terminais do caminho $i - j$; S é a matriz de incidência nó-ramo transposta do sistema. Deve-se lembrar que neste modelo é empregado a susceptância $\gamma_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}$ ou seja, o inverso da reatância x_{ij} dos circuitos.

A restrição $Sf + g = d$ representa o conjunto de equações que atende à Lei de Kirchhoff das correntes; a restrição $f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0$ representa o conjunto de equações que satisfaz a segunda Lei de Kirchhoff, sendo responsável pela não linearidade do modelo; as restrições $|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij}$, $0 \leq g_i \leq \bar{g}_i$ e $0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}$ impõem limites, respectivamente, nos fluxos através dos circuitos, na geração nas barras de geração e ao número de adições de linhas por circuito.

Após algumas manipulações algébricas obtemos a formulação equivalente seguinte:

$$\begin{aligned} \min v &= \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} n_{ij} \\ \text{s.a.} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_\ell} f_{ij} + g_i = d_i \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (3b)$$

$$f_{ij} = (n_{ij} + n_{ij}^0) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (3c)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (3d)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (3e)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (3f)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (3g)$$

O modelo DC é considerado ideal para representar o problema de planejamento, pois os resultados obtidos com o mesmo são próximos daqueles encontrados com o fluxo de carga AC em relação à distribuição dos fluxos de potência ativa.

2.2.3 MODELO LINEAR DISJUNTIVO

Na busca da melhor forma de modelagem matemática para o problema de expansão do sistema elétrico, a modelagem ideal é chamada de modelo DC sendo um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM). Ao apresentar a dificuldade de ser um modelo não

linear, há a possibilidade de transformar o modelo DC não-linear num problema equivalente cuja modelagem matemática corresponde a um "modelo linear". Esta prática de transformação de um problema não linear com variáveis binárias e reais em outro problema linear equivalente com variáveis binárias e reais é bastante comum na literatura específica, onde se "separa" os termos não-lineares em relações lineares.

Este processo é possível adicionando no problema um parâmetro M de valor muito grande. Esta modelagem chamada linear disjuntiva foi proposta por vários autores. Entretanto, uma análise detalhada desta modelagem é apresentada em (BINATO; PEREIRA; GRANVILLE, 2001). Partindo-se do modelo DC para se obter o modelo linear disjuntivo, o primeiro passo é colocar em evidência os fluxos de potências ativas dos circuitos existentes na configuração básica:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} n_{ij} \quad (4a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} (f_{ji} + f_{ji}^0) - \sum_{ij \in \Omega_\ell} (f_{ij} + f_{ij}^0) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (4c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (4d)$$

$$f_{ij} = n_{ij} \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (4e)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (4f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4g)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (4h)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (4i)$$

esta formulação ainda possui uma não linearidade em (4e) onde há o produto da variável inteira n_{ij} pela variável contínua $(\theta_i - \theta_j)$. Também nesta formulação, nota-se a presença de uma nova variável f_{ij}^0 , representando o fluxo total de potência ativa que passa pelos circuitos existentes no caminho $i - j$.

Em seguida transformamos a variável inteira n_{ij} foi transformada em uma variável binária $w_{ij,y}$, dentro de um conjunto Y de variáveis binárias, onde cada variável binária representa uma linha de transmissão que pode ou não ser adicionada no caminho $i - j$. Se $w_{ij,y} = 1$, então a linha y foi adicionada no caminho $i - j$; senão $w_{ij,y} = 0$, que indica que a linha y não foi adicionada no caminho $i - j$. Assim aparece uma nova representação da variável n_{ij} por $\sum_{y \in Y} w_{ij,y}$. Seguindo o mesmo raciocínio deve-se tratar cada fluxo de potência ativa $f_{ij,y}$ de forma independente para cada linha y adicionada no caminho $i - j$. O modelo linear disjuntivo assume assim a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (5a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} (\sum_{y \in Y} f_{ji,y} + f_{ji}^0) - \sum_{ij \in \Omega_\ell} (\sum_{y \in Y} f_{ij,y} + f_{ij}^0) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (5b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (5c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (5d)$$

$$f_{ij,y} = w_{ij,y} \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (5e)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (5f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (5g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (5h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_\ell, \forall y \in Y | y \geq 1 \quad (5i)$$

$$w_{ij,y} \text{ binário} \quad \forall ij \in \Omega_\ell, \forall y \in Y \quad (5j)$$

Deve-se observar que a equação (5i) garante a alocação de linhas na sequência no conjunto Y e impede soluções iguais.

Observa-se ainda que há a não linearidade na equação (5e) onde há o produto da variável binária $w_{ij,y}$ com a variável contínua $(\theta_i - \theta_j)$. Analisando melhor as equações (5e) e (5f) note-se que se a variável $w_{ij,y}$ assumir o valor 1, $f_{ij,y} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}$ e $|f_{ij,y}| \leq \bar{f}_{ij}$; caso a variável binária assumo o valor 0, $f_{ij,y} = 0$ com a variável contínua $(\theta_i - \theta_j)$ totalmente livre. Como consequência destas propriedades a equação (5e) pode ser substituída por:

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_\ell, \forall y \in Y \quad (6)$$

o valor M deve ser uma constante de valor muito grande (big M). Tem-se assim uma nova formulação do modelo linear disjuntivo na seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (7a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} (\sum_{y \in Y} f_{ji,y} + f_{ji}^0) - \sum_{ij \in \Omega_\ell} (\sum_{y \in Y} f_{ij,y} + f_{ij}^0) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (7b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (7c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (7d)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell, \forall_y \in Y \quad (7e)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (7f)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (7g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell \quad (7h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell, \forall_y \in Y | y \geq 1 \quad (7i)$$

$$w_{ij,y} \text{ binário} \quad \forall_{ij} \in \Omega_\ell, \forall_y \in Y \quad (7j)$$

O problema de programação resultante, quando se utiliza a formulação disjuntiva para resolver os problemas de expansão do sistema de transmissão, é um problema de programação linear inteiro misto (PLIM) (BINATO, 2000).

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o final dos anos 50 (MASSE; GILBRAT, 1957), há uma preocupação por parte de pesquisadores em resolver o problema de planejamento da expansão de redes de energia elétrica, por meio de técnicas de programação matemática para reduzir os custos de operação e os custos de investimento. Mas foi somente na década de 70 que os primeiros trabalhos no setor começam a surgir. Eles buscavam soluções do problema de planejamento da transmissão em geral e um plano de expansão ótimo em particular.

Desta forma, começa a o uso desta técnica como ferramenta para a busca de soluções para resolver o problema de planejamento a um estágio (plano ótimo para o ano horizonte) (GARVER, 1970b) onde procurou-se minimizar apenas o custo de investimento na expansão da transmissão do sistema.

Observando uma característica típica do problema de expansão em escolher se será construída as linhas ou não construir, foi proposto em (LEE; HICKS; HNYLICZA, 1974) um método para definição do plano de expansão de mínimo custo, tendo por base a programação inteira do tipo Branch & Bound, que tem a variável binária de decisão em *construir_linha* = 1 e *não_construir_linha* = 0.

Santos Junior, Franca e Said (1989) também exploraram o problema de redes de transmissão buscando os custos mínimos de expansão. Neste trabalho são apresentadas várias formulações de modelo de otimização, até chegar no modelo linear por partes, sendo resolvido através de um algoritmo que tem por base o fluxo em redes.

Em Oliveira, Costa e Binato (1995) o problema de planejamento tem uma apresentação usando o método de programação inteira com a decomposição de Benders auxiliada de heurísticas matemáticas. Tudo isto para buscar reduzir o esforço computacional e assim ser usado

sistemas de grande porte evitando a explosão combinatória.

Contraditando as desvantagens da programação dinâmica, em (GONZAGA, 1973) é proposto um novo algoritmo para resolver o problema de expansão de sistemas de energia elétrica baseado em busca em grafos. No desenvolvimento deste algoritmo busca-se uma nova alternativa de caminho que apresente custos menores com a técnica de grafos de expansão associado a heurísticas afim de conseguir diminuir o número de alternativas.

Quando se trata do planejamento multi-estágios, muitas vezes não é vantajoso procurar um plano de expansão de mínimo custo pelo aumento significativo do tempo de uso da CPU, mas sim um elenco de alternativas de expansão viáveis para cada estágio de planejamento. Isto é feito em (MONTICELLI et al., 1982), onde se procura realizar a descrição abreviada de redes para cada estágio, sequencialmente, através da análise de sensibilidades (fluxo DC). A definição da técnica é baseada no método do mínimo esforço na definição de fluxo em uma rede. Assim é feita uma classificação de todas as alternativas, levando em conta os custos e benefícios para verificar onde há maior alívio de sobrecarga que estas alternativas teriam sobre a rede.

O planejamento multi-estágios também é abordado em (BINATO; OLIVEIRA; ARAUJO, 2001) utilizando-se programação linear e análise de sensibilidades e procurando determinar os reforços que apresentem os menores impactos sobre a rede, para cada estágio até o ano horizonte (forward), ou para o ano horizonte diretamente, determinando-se então os reforços para cada estágio (backward).

Observando a propriedade natural do problema de planejamento, inicialmente foi proposta a decomposição do problema de planejamento da expansão em dois sub-problemas: operação e investimento (BEGLARI; LAUGHTON, 1975). Primeiro o sub-problema de investimento é resolvido tendo por base alguns dados iniciais. O sub-problema de operação é então resolvido observando os resultados obtidos na solução do sub-problema anterior. O processo continua iterativamente até que a convergência seja alcançada, o que ocorre normalmente de 2 a 4 iterações.

Em Pereira e Pinto (1985), é abordada a decomposição do problema de planejamento utilizando a decomposição de Benders, onde os sub-problemas de operação e de investimento são resolvidos através da aplicação de programação linear, programa de fluxos em redes e programa de fluxo de potência DC. Os sub-problemas são relacionados entre si através dos cortes de Benders.

A técnica de decomposição de Benders é novamente destacada como proposta para solução do problema de determinação do mínimo custo global de expansão em (LEVI; CALOVIC, 1991). Neste caso, o sub-problema de investimento é resolvido por meio de programação linear, enquanto que o sub-problema de operação é resolvido pelo método de simulação de Monte Carlo. Assim como no trabalho de (PEREIRA; PINTO, 1985), o sub-problema de investimento

é resolvido primeiro e o de operação depois.

A decomposição de Benders também foi utilizada em (ROMERO; MONTICELLI, 1994). Neste caso, também há a preocupação de se encontrar um ponto de mínimo global da função de custo. Para isto, a solução do problema é dividida em três fases, onde na fase I busca-se uma solução inicial, que pode ser um mínimo local, obtida com um modelo mais simples (modelo de transporte), na fase II é utilizado um modelo híbrido (modelo de transporte para novos circuitos e fluxo DC para circuitos existentes) e na fase III, utilizando programação linear inteira para o problema de investimento e fluxo de potência DC para modelar o problema de operação, determina-se o ponto de mínimo global. As decisões de investimento (novos circuitos) e os cortes de Benders são transferidos de fase para fase.

O planejamento da expansão da transmissão pode ser feito considerando restrições de segurança para um médio prazo. Assim em Seifu, Salon e List (1989) é proposta duas novas metodologias para a definição dos reforços do sistema de transmissão, considerando restrições de segurança da rede. O primeiro método é baseado em programação inteira-mista, onde o plano de expansão é obtido considerando contingências (simples e múltiplas), e o segundo método é heurístico onde é proposta a definição do plano de expansão de mínimo custo inicialmente em regime permanente, para depois fazer a análise de contingências.

Neste mesmo ano Hsu et al. (1989) propõem uma metodologia para considerar na definição do plano de expansão de mínimo custo, novos índices tais como: máximo limite de transferência de potência, corrente de falta, além dos custos. Além disto, cada plano de expansão obtido é avaliado em termos de estabilidade dinâmica (perturbações de baixa frequência), através da análise de auto-vetores e auto-valores.

Um método foi proposto para determinar uma metodologia para considerar o planejamento integrado de geração-transmissão, onde a definição das alternativas é feita considerando-se as contingências mais críticas. A síntese de redes é realizada através de um algoritmo de busca em grafos, com heurísticas para eliminar as alternativas mais onerosas (FONSECA; LÚCIO, 1990).

A preocupação de se formar um elenco de programas computacionais aplicados ao planejamento da transmissão, para uso do planejador, foi demonstrada inicialmente em (MANZONI; PARIS; VALTORTA, 1979). Neste trabalho já se vislumbrava a possibilidade de se integrar todas as ferramentas necessárias ao planejador em um único ambiente computacional.

Além disto, buscou-se desenvolver ferramentas que apresentassem boa modularidade, com relação a manutenções no software, e apresentasse um interface 'amigável' com o usuário (FOLEY et al., 1993), além de propiciar flexibilidade ao ambiente desenvolvido (FOLEY; BOSE, 1995). Por estas razões a programação orientada a objetos (POO) foi a proposta utilizada. Nestes trabalhos a POO foi aplicada especificamente ao problema de convergência de fluxo de

potência.

Neste sentido, a construção de ambientes computacionais de planejamento que integre várias ferramentas utilizadas pelo planejador, e ao mesmo tempo forneça uma boa interface gráfica, passou a ser um objetivo perseguido por vários pesquisadores, como pode ser observado em (LEMAITRE; PAULO; BOUQUET, 1996; OLIVEIRA; COSTA; BINATO, 1995). Este trabalho demonstra uma preocupação crescente nesta área, que é o desenvolvimento de ferramentas flexíveis para o planejamento.

A partir da década de 80, observa-se um fenômeno no Brasil onde os investimentos no setor elétrico começam a ficar escassos. Então, começou-se a pensar melhor sobre ajustes e remanejamentos dos planos de expansão obtidos anteriormente. Neste contexto Morozowski Filho (1995) propõem um modelo computacional para procurar fazer este remanejamento no plano de expansão obtido previamente, de forma a propor a postergação por um estágio de obras que apresentam o menor índice custo/benefício, onde o custo aqui se refere ao custo para o sistema ocasionado por este adiamento (por ex. risco de corte de carga), e benefício se refere à economia alcançada com este adiamento.

Outro aspecto que deve ser considerado no planejamento da expansão é a incerteza inerente a determinados fatores relativos a este problema, tais como: crescimento da demanda e preço de óleo (CIGRE, 1995). Neste caso, o planejamento determinístico é abandonado, trabalhando-se então com um modelo probabilístico (análise de cenários) (GORENSTIN et al., 1993), ou com lógica fuzzy (AIRES; PINTO; FILHO, 1994; SARAIVA; MIRANDA; PINTO, 1995).

Nos últimos anos, com o objetivo de se obter um plano de expansão garantidamente de mínimo custo (global), introduzindo-se heurísticas 'inteligentes' para evitar a explosão combinatória, tem-se aplicado a este problema técnicas mais recentes da inteligência artificial como o reconhecimento simulado (GALLEGO et al., 1997; ROMERO; GALLEGO; MONTICELLI, 1996). Neste último caso, procura-se reduzir o tempo computacional com a utilização de processamento paralelo.

Outra técnica da inteligência artificial como os algoritmos genéticos também tem sido utilizada para solução deste problema (RUDNIK et al., 1995). Neste trabalho a filosofia dos algoritmos genéticos é utilizada para definição de um plano de expansão da transmissão economicamente adaptado a um setor elétrico desregulamentado.

Todos os métodos apresentados anteriormente não aproveitam completamente a experiência do especialista da área (planejador) no modelo de planejamento. Principalmente com relação ao processo de definição das possíveis alternativas de expansão, não há em geral a preocupação de abordar este problema, como sugerido em (BENNON; JUVES; MELIOPOULOS, 1982). Mesmo em Vega e Sarmiento (1996), onde através de imagens obtidas de satélites consegue-se descartar antecipadamente determinados locais inviáveis para a construção de linhas de trans-

missão, há apenas a consideração da restrição de meio ambiente.

A consideração da experiência do especialista é importante pois, através da representação conveniente no computador desta experiência, pode-se definir mais rapidamente e eficientemente as alternativas viáveis de expansão, bem como reduzir o esforço de busca da solução de mínimo custo, a qual pode ser obtida por um programa procedimental.

Silva (2013) destaca que o modelo linear disjuntivo apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação ao modelo DC, sendo a principal desvantagem relacionada com o aumento da dimensão do problema e a introdução de variáveis binárias (no modelo DC são usadas as variáveis inteiras n_{ij}) e, principalmente, com a escolha ou determinação do parâmetro M grande para cada restrição que passa a representar o fator complicante na solução do modelo linear disjuntivo.

A principal vantagem está relacionada com a modelagem linear e, eventualmente, podem ser desenvolvidos algoritmos adequados com propriedades de convergência interessantes do ponto de vista teórico. Uma análise detalhada da utilização do modelo linear disjuntivo é apresentada por Binato (2000), onde foi empregada decomposição de Benders para resolver problemas de complexidade média. Binato, Oliveira e Araujo (2001) apresentam uma metodologia para calcular o valor mínimo de M resolvendo problemas de caminho mínimo e máximo, baseados na teoria de grafos.

Segundo Romero et al. (2002), embora o modelo dos transportes mantenha a característica combinatória do modelo DC ele é normalmente mais fácil de resolver.

Entretanto, já começam a surgir trabalhos como Rider, García e Romero (2004, 2007), Rider et al. (2007) onde é apresentado um algoritmo heurístico construtivo para resolver o problema de planejamento da rede de transmissão utilizando o modelo AC e também é considerado o problema de alocação de fontes de potência reativa de forma preliminar, usando um índice de sensibilidade. Rodriguez et al. (2009) utilizam um algoritmo genético especializado para resolver o problema planejamento de expansão da transmissão usando o modelo AC. Gallego et al. (2009), Rahmani et al. (2010) desenvolveram dois algoritmos genéticos especializados para resolver o problema de planejamento de expansão da transmissão usando o modelo AC considerando a alocação de fontes de potencia reativa.

Braga e Saraiva (2005) apresentam uma formulação multi-critério para problemas de planejamento de expansão de transmissão dinâmico multi-anual. Esta formulação considera três critérios: custos de investimento, custo de operação, e a energia esperada e não fornecida. O algoritmo de solução adota uma abordagem de tomada de decisão iterativa que começa em uma solução não dominada do problema. Esta solução é identificada transformando dois dos três critérios em restrições e especificando os níveis de aspirações, usando em seguida *simulated annealing*.

Choi et al. (2005), Choi, El-Keib e Trans (2005) resolvem o problema de planejamento de expansão de transmissão, em ambiente competitivo, usando teoria dos conjuntos Fuzzy e critério de confiabilidade probabilístico com base no método *Branch and Bound* e um método *Branch and Bound* probabilístico em que ambos fazem uso do teorema do fluxo máximo e corte mínimo. Ambos os trabalhos levam em consideração elementos de confiabilidade do sistema e incertezas. Os testes são feitos em um sistema de 21 barras e cujos resultados estão apresentados nos artigos.

3 TÉCNICA DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo vamos abordar metodologias utilizadas na literatura específica para resolver problemas de expansão do planejamento de transmissão do sistemas elétricos. As técnicas mais usuais são: (i) de otimização clássica (*Branch and Bound* e Decomposição de Benders (HAFFNER et al., 2001)), (ii) heurísticas e as (iii) técnicas metaheurísticas (FARIA et al., 2005; SILVA; GIL; AREIZA, 2000; SILVA et al., 2001), que tem o algoritmo heurístico construtivo de Garver, o algoritmo heurístico de Villasana-Garver-Salon e as metaheurísticas como ponto chave de referência.

3.2 MÉTODOS EXATOS

Os métodos exatos ou de otimização clássica têm como metodologia o uso de técnicas de decomposição matemática, com uma característica que pode levar a uma solução ótima do problema de planejamento. São geralmente muito eficientes para sistemas de pequeno e médio porte. O mesmo não se aplica para sistemas de grande porte, pois apresenta um esforço computacional elevado e problemas de convergência. A seguir descrevem-se de forma resumida os métodos de *Branch and Bound* e Decomposição de Benders.

3.2.1 A DECOMPOSIÇÃO MATEMÁTICA DE BENDERS

A Decomposição de Benders é uma técnica que permite decompor o problema de planejamento em dois subproblemas: um subproblema de operação ou escravo e um subproblema de investimento ou mestre. O subproblema de operação é responsável pelas variáveis de operação como os fluxos e os ângulos das tensões de barras. Este subproblema é um problema de programação linear que pode ser facilmente resolvido utilizando os algoritmos mais clássicos de programação linear (PL). O subproblema de investimento é responsável pelas variáveis de investimento, mas é classificado como um problema de programação linear inteiro misto (PLIM) possuindo uma única variável contínua que é resultado do processo de decomposição de Benders. Assim, a decomposição de Benders resolve o problema de planejamento da expansão do

sistema elétrico de transmissão (PEST) através de uma solução iterativa dos subproblemas de operação e investimento (ROMERO; MANTOVANI, 2004; MANTOVANI, 2004; TAGLIALE-NHA, 2008).

A otimização global é atingida através de uma resolução iterativa das soluções separadas dos subproblemas de operação e investimento. Esta técnica não foi capaz de resolver sistemas de grande porte, como o sistema Norte-Nordeste Brasileiro.

A Decomposição de Benders pode ser conceitualmente definida como uma técnica de decomposição matemática mais adequada para ser utilizada no problema de planejamento da expansão do sistema elétrico de transmissão de energia elétrica, mas na prática trabalha de forma eficiente apenas para sistemas de pequeno e médio porte.

3.2.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO TIPO BRANCH AND BOUND

O algoritmo *Branch and Bound* é um algoritmo enumerativo, cuja estrutura de resolução baseia-se na construção de uma árvore onde os nós representam os problemas candidatos e os ramos representam as novas restrições que devem ser consideradas. Por intermédio dessa árvore, todas as soluções inteiras da região viável do problema são enumeradas de modo implícito ou explícito o que garante que todas as soluções ótimas devem ser encontradas. A estrutura geral do algoritmo *Branch and Bound* apresenta três elementos fundamentais, que serão detalhados a seguir: separação, relaxação e sondagem.

Na etapa de separação, o problema original (P) é resolvido com valores reais e é separado em q subproblemas de acordo com os valores encontrados nas variáveis em $(P^1), (P^2), \dots, (P^q)$ sendo que estes subproblemas estão sujeitos às seguintes condições:

- Todas as soluções possíveis encontradas no problema original (P) será também uma solução de algum dos subproblemas (P^i) , $i = 1, 2, \dots, q$.
- Uma solução possível de qualquer um dos subproblemas (P^i) , $i = 1, 2, \dots, q$ é também, uma solução viável de (P) .

Assim garantimos que existe um conjunto das soluções possíveis de cada um dos subproblemas (P^i) , $i = 1, 2, \dots, q$, sendo ele uma partição do conjunto das soluções viáveis de (P) . Os subproblemas (P^i) , $i = 1, 2, \dots, q$, são denominados descendentes de (P) e podem, sucessivamente, gerar seus próprios descendentes.

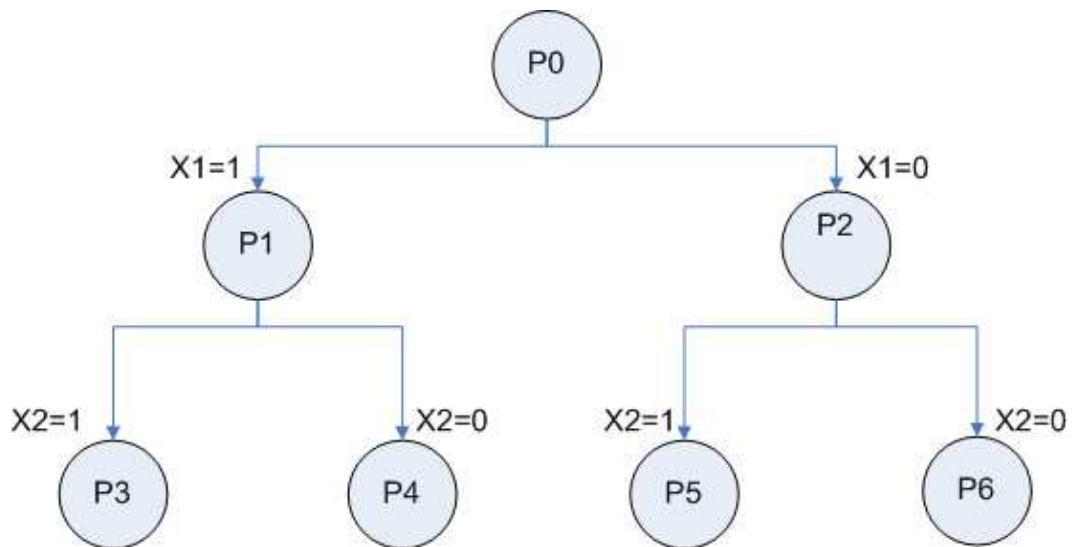
O interesse na separação (*branching*) é utilizar a estratégia de "dividir para conquistar" para resolver o problema (P). Pode-se descrever, sucintamente, esta estratégia do seguinte modo: enquanto a solução de (P) não é possível, separa-se (P) em dois ou mais subproblemas

descendentes, gerando uma lista de problemas candidatos (PC). Então, seleciona-se um dos candidatos dessa lista e tenta-se resolvê-lo. Se a solução não é possível, o problema é novamente separado e seus descendentes são adicionados à lista dos candidatos, caso contrário, o problema é resolvido e uma nova solução é obtida. O valor da função objetivo dessa nova solução é, então, comparado com o valor da solução incumbente, que é a melhor solução viável conhecida até o momento. Caso a nova solução seja melhor do que a solução incumbente, ela se torna a nova incumbente. A seguir, retorna-se à lista e seleciona-se o próximo candidato. Isto é repetido até que a lista esteja vazia, quando se pode afirmar que a solução do problema é dada pela solução incumbente final.

A forma usual de separação (*branching*) de um problema de programação inteira é através de restrições contraditórias em uma única variável inteira (variável de separação ou de ramificação). Assim, a partir do problema original, denominado nó zero, originam-se dois novos subproblemas (cada um dos subproblemas descendentes é mais restrito que o subproblema candidato de origem uma vez que foi acrescentada uma restrição na variável de separação), representados pelos nós 1 e 2 que são sucessivamente divididos formando uma árvore. A cada nó se associa um subproblema candidato e cada ramo indica o acréscimo de uma restrição relacionada à variável empregada na separação. Portanto, à medida que se desce na árvore a região viável dos descendentes gerados vai ficando cada vez mais restrita.

Temos a figura 3 que ilustra uma árvore que simboliza a particionamento do problema original P_0 nos problemas P_1 e P_2 e estes nos problemas P_3 e P_4 ; P_5 e P_6 respectivamente, fixando-se em cada passo uma das variáveis em 0 ou 1. Cada um dos problemas P_k será resolvido ou novamente particionado gerando dois novos problemas na árvore, que serão resolvidos ou particionados; e assim sucessivamente.

Figura 3 - Árvore de particionamento com os nós correspondentes.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A relaxação consiste em, temporariamente, ignorar algumas restrições do problema (P) visando torná-lo fácil de resolver. A condição que deve ser satisfeita é que o conjunto de soluções viáveis do problema original (P) esteja contido no conjunto de soluções viáveis do problema relaxado (PR). Isto implica que:

- (R1) - Se (PR) não tem solução viável, então o mesmo é verdadeiro para (P).
- (R2) - O valor mínimo de (P) não é menor que o valor mínimo de (PR).
- (R3) - Se uma solução ótima de (PR) é viável em (P), então ela é uma solução ótima de (P).

Dentre as formas possíveis de relaxação, destaca-se a eliminação das restrições de integridade das variáveis, o que transforma o problema misto em um problema linear (PL) padrão.

Na análise dos problemas candidatos (PC) existe a necessidade de encontrar quais são os problemas promissores e, assim, devem ser examinados, e quais podem ser eliminados. Isto é realizado na etapa de sondagem onde o problema candidato (PC) é eliminado (descartado para futuras análises), juntamente com todos os seus descendentes, se satisfizer pelo menos um dos seguintes critérios:

- (S1) - O problema candidato relaxado (PCR) não tem solução viável. Devido a (R1), isto significa que o problema candidato (PC) também não tem solução viável.

- (S2) A solução ótima do problema candidato relaxado (*PCR*) é pior (*bounding*) do que a melhor solução atualmente conhecida para (*P*) (solução incumbente). Observar que a solução ótima do problema candidato relaxado é sempre melhor ou igual à solução do problema candidato e de seus descendentes.
- (S3) Uma solução ótima do problema relaxado (*PCR*) é viável, também, em (*PC*). Neste caso, devido a (*R3*), ela é ótima em (*PC*) e, devido a (*S2*) ela é também factível em (*P*). Caso seja melhor que a incumbente, a solução deste problema candidato passa a ser a nova solução incumbente.

O algoritmo *branch and bound* básico, embora seja conceitualmente simples, apresenta complexidade na implementação computacional. Este algoritmo apresenta excelente desempenho para problemas ou sistemas pequenos, mas em sistemas reais apresenta várias limitações relacionadas com o esforço computacional (TAGLIALENHA, 2008).

As heurísticas e as metaheurísticas são consideradas ferramentas auxiliares que empregadas nos modelos matemáticos de resolução do problema de expansão do sistema elétrico pode levar a uma solução ótima ou muito boa, dependendo do modelo empregado. Na literatura podem-se classificar três grandes grupos de algoritmos para a resolução do problema de expansão do sistema elétrico de transmissão:

- Algoritmo Heurístico Construtivo: Utiliza técnicas de otimização contínua. São robustos e encontram geralmente soluções de boa qualidade com pouco esforço computacional, mas apresentam dificuldade de encontrar soluções ótimas globais, principalmente em problema de grande porte (GARVER, 1970a, 1970b; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; MONTICELLI et al., 1982; PEREIRA et al., 1985; RIDER; GARCÍA; ROMERO, 2007; ROMERO, 1999; ROMERO; GALLEGO; MONTICELLI, 1998; SILVA et al., 2008; VILLASANA; GARVER; SALON, 1985).
- Algoritmo de Otimização Exata: Usam técnicas de decomposição matemática ou técnicas da família *branch and bound*, geralmente encontram soluções ótimas globais para sistemas pequenos e de médio porte (BINATO, 2000; LEVI; CALOVIC, 1991).
- Metaheurísticas: Encontram soluções ótimas ou sub-ótimas mesmo para sistemas que apresentam um porte maior, mas geram um grande esforço computacional e até proibitivo em alguns casos. Os mais comuns são os algoritmos genéticos Oliveira (2005), simulated annealing Romero, Gallego e Monticelli (1996), busca tabu (ROMERO; MANTOVANI, 2004) e GRASP (BINATO; OLIVEIRA; ARAUJO, 2001; GLOVER, 1989).

3.3 HEURÍSTICAS

O termo heurístico vem do grego *heuriskein* que significa *descobrir*, do mesmo radical que deu origem a palavra *heureka*, imortalizada pelo matemático e filósofo grego Arquimedes. O conceito de heurística e suas características, bem como referências na literatura específica são critérios, métodos ou princípios para ajudar a decidir qual, dentre muitas alternativas de ação optar, de forma que estabeleça uma melhor forma para atingir um determinado objetivo (PEARL, 1984). O diferencial das heurísticas está em ser de simples compreensão e destacar no processo de resolução as boas e más ações a fim de alcançar bons resultados e tempo computacional relativamente rápido. As heurísticas não garantem um resultado ótimo global, mas se propõem a resolver da melhor forma possível. O problema na década de 1960 as técnicas heurísticas foram as mais utilizadas e mais bem sucedidas no propósito de resolver problemas complexos de otimização matemática, destacando os problemas não lineares, discretos e não convexas.

Reeves (1993) define algoritmo heurístico como sendo uma técnica que sem garantir uma solução factível ou solução global, e sem afirmar o quão próximo da solução ótima uma solução está, mas com uso de custo computacional razoável, encontra soluções de qualidade. Algumas vantagens de utilização de métodos heurísticos podem ser: (i) a possibilidade de flexibilização para as variáveis ou características do problema; (ii) podem ter mais de uma solução com a possibilidade de análise de qual é a melhor para o problema específico; (iii) na maioria dos métodos as soluções alcançadas são de boa qualidade sem recorrer ao formalismo matemático.

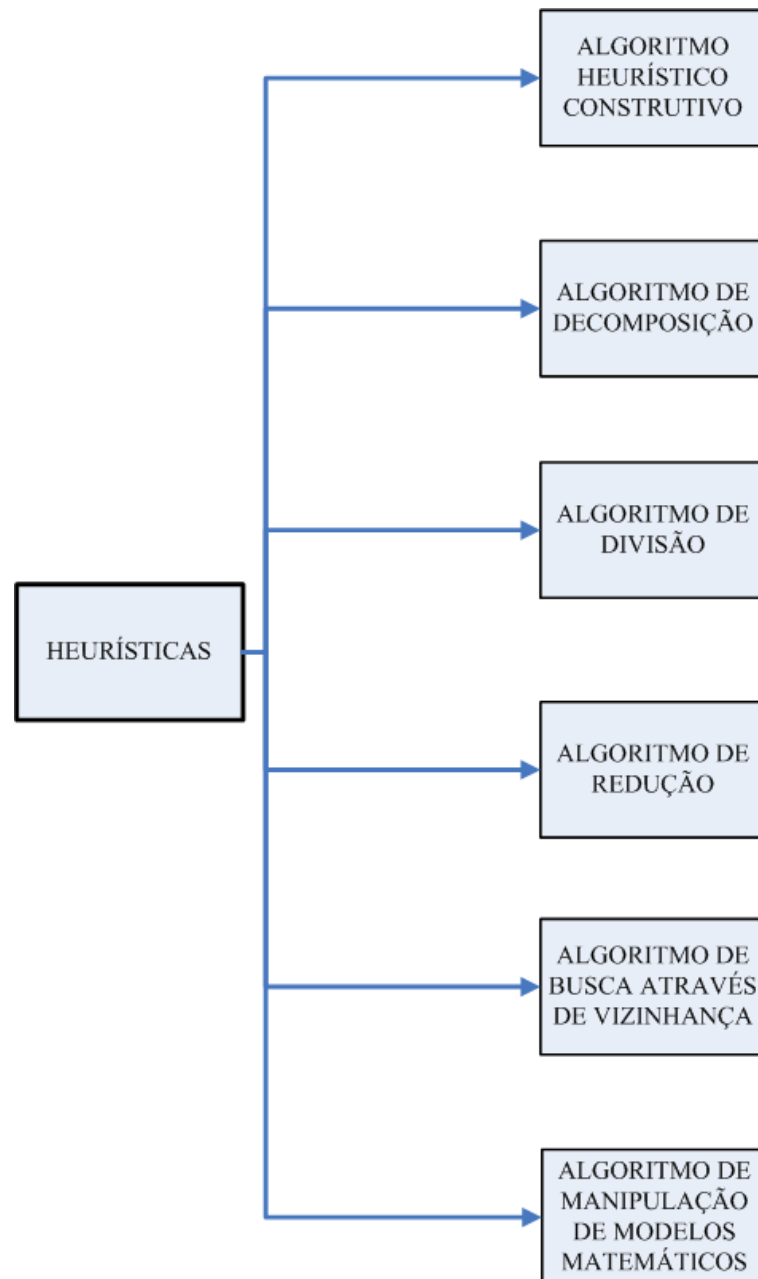
Na literatura específica as heurísticas são bastante utilizadas pois mesmo os procedimentos utilizados para resolver problemas de expansão do planejamento do sistema elétrico, não garante a otimalidade, embora possa ser alcançada com frequência se a heurística escolhida seja boa. As heurísticas estudadas neste trabalho serão sempre colocadas como um possível algoritmo a ser implementado computacionalmente.

Heurísticas, por definição, não garante a otimalidade do problema ao qual elas são aplicadas. Entretanto, são especialmente úteis para os problemas difíceis que não são resolvidos apropriadamente com as metodologias de otimização. Exemplos desses problemas são os não lineares, descontínuos e os combinatórios que tem uma série de restrições em termos de complexidade computacional entre outros vistos na figura 4 (COLIN, 2007).

O uso de heurísticas são mais apropriados para casos em que não é conhecido um método exato de resolução; quando o valor da solução ótima não é tão fundamental no problema, situação comum onde há várias soluções ótimas perto da solução global; se os dados utilizados são altamente incertos; quando há limitação de tempo de processamento e/ou pouca memória para armazenagem na busca da solução desejada; e se necessita de uso de uma boa solução inicial para aplicação de uma técnica mais sofisticada, normalmente usadas nas metaheurísticas.

Alguns algoritmos que são denominados como heurística são: (i) Algoritmo de Garver (GARVER, 1970b); o algoritmo de mínimo esforço (MONTICELLI et al., 1982); o algoritmo de mínimo de corte de carga (PEREIRA et al., 1985), o algoritmo de Villasana-Garver-Salon (VILLASANA; GARVER; SALON, 1985) e o algoritmo de rede marginal de Levi-Calovic (LEVI; CALOVIC, 1991).

Figura 4 - Classificação das heurísticas.



Fonte: (PEREZ-ARRIGA; VERGHESE; SCHWEPPE, 1982; ROCHA, 2004)

Romero et al. (2005) faz a proposta de um novo algoritmo heurístico construtivo baseado na ideia básica do conhecido algoritmo de Garver, mas trocando o modelo de transporte pelo mo-

delo DC. (RIDER; GARCÍA; ROMERO, 2007), utilizam um algoritmo heurístico construtivo para obter soluções de boa qualidade para o problema de planejamento considerando o modelo AC.

Os métodos heurísticos podem ser classificados como métodos construtivos e métodos de refinamentos. Os métodos construtivos buscam uma solução passo a passo, elemento por elemento inserindo em cada passo aquele que é considerado melhor segundo o critério adotado. Os métodos de refinamentos buscam uma solução através de modificações em seus elementos, ou seja em cada iteração busca melhorar os resultados anteriores. As principais heurísticas conhecidas são as seguintes: algoritmo heurístico construtivo, algoritmo de decomposição, algoritmo de divisão, algoritmo de redução, algoritmo de manipulação de modelo matemático e algoritmo de busca em vizinhança. Neste trabalho não entraremos em detalhes sobre todos os algoritmos, reservando descrições apenas para o algoritmo heurístico construtivo e algoritmo de busca em vizinhança, que serão abordados nos próximos tópicos.

3.3.1 O ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO

Devido que o problema de planejamento de sistema de transmissão pode ser representado por vários modelos matemáticos e a grande impossibilidade, seguida de muita dificuldade de encontrar soluções de problemas que envolva modelos combinatórios de larga escala usando algoritmo exatos, levou ao desenvolvimento e utilização dos algoritmos heurísticos ou aproximados.

O algoritmo heurístico construtivo (AHC) foi apresentado primeiramente por Garver e seu uso de resolução foi aplicado ao modelo de transporte que é obtido por um modelo matemático de programação linear inteiro misto (PLIM). O outro modelo amplamente utilizado é o modelo DC, que apresenta uma solução de boa qualidade, mas é muito difícil de ser resolvido pois é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) agravado nos casos de problemas de grande porte.

O AHC possui como característica o fato de ser iterativo na busca de uma solução factível de um problema complexo. O mais popular dos AHC é o tipo guloso (*greedy*). A busca da solução é feita passo a passo, e em cada passo é adicionado um componente da solução, e se repete o processo até que seja encontrado uma solução geralmente de boa qualidade para a expansão do sistema elétrico. Neste processo são adicionados um ou vários circuitos até que o conjunto total de todas as adições seja satisfatório e permita o bom funcionamento do sistema elétrico. Geralmente o AHC é robusto e converge rapidamente para a solução, especialmente para problemas grandes e complexos. Este tipo de algoritmo converge apenas para uma solução de boa qualidade e, às vezes, estas podem estar muito distantes da solução ótima (ROCHA, 2004). O AHC é a técnica mais usada no campo da otimização no emprego como ferramenta

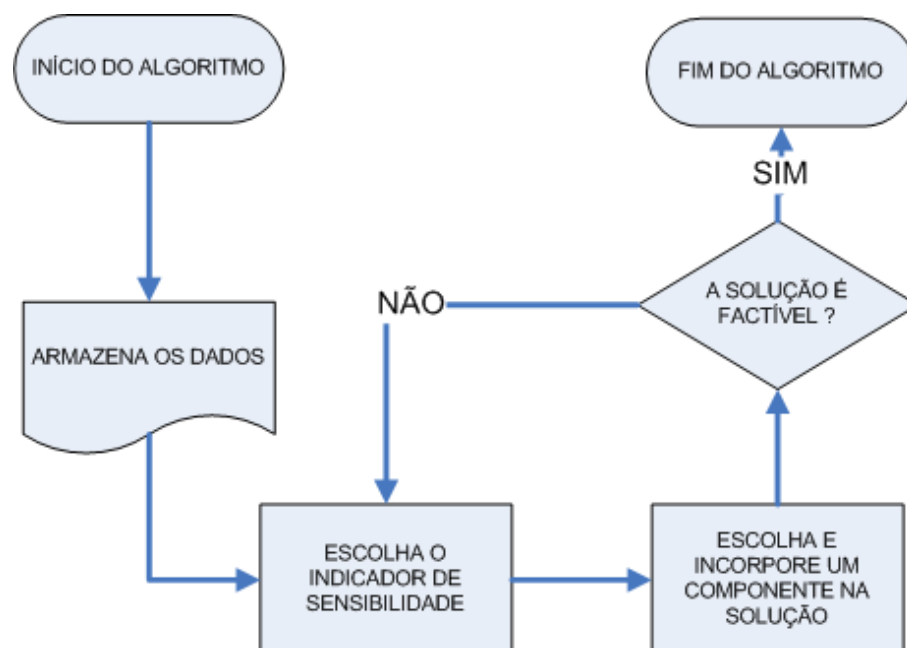
para encontrar soluções de problemas complexos tanto em uso isolado, como em associação de uma metaheurística mais sofisticada.

O diferencial fundamental na escolha dos AHCs usados para resolver problemas está no indicador de sensibilidade que é responsável pela escolha do elemento ou componente que fará parte da solução a ser construída passo a passo. O indicador de sensibilidade é basicamente um parâmetro que de alguma maneira está relacionado com a variação do valor da função objetivo devido a alguma variação dos parâmetros do sistema, considerando como um sistema da configuração corrente. O parâmetro conhecido como indicador de sensibilidade possui característica a serem destacadas, como:

- Consegue reconhecer o melhor caminho ou o mais atrativo para adicionar um circuito.
- A sua busca é local, isto é, só identifica qual estratégia a ser usada para a configuração corrente em contraposição de um indicador de caráter global que identificaria a melhor estratégia para identificar a melhor configuração corrente.
- Como os indicadores locais nem sempre coincidem com os indicadores globais então os algoritmos heurísticos construtivos, frequentemente, não têm capacidade de encontrar as configurações ótimas globais de sistemas reais.

Segue o esquema de forma genérica dos AHCs na figura 5.

Figura 5 - Algoritmo AHC.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Martins (2009) destaca a aplicação do algoritmo heurístico de Garver aplicado ao modelo de transporte (neste modelo, apenas as restrições da primeira lei de Kirchhoff devem ser obrigatoriamente satisfeitas), e foi o primeiro algoritmo de grande difusão utilizado no planejamento de sistemas de transmissão (GARVER, 1970b). Nesta proposta, Garver formulou o problema como um problema de fluxo de potência e utilizou algoritmos de programação linear para identificar as rotas mais diretas entre os geradores e as cargas.

Utilizando o modelo (1a)-(1f), e relaxando a integralidade das variáveis inteiras n_{ij} , Garver consegue encontrar a solução ótima contínua, ou seja, variáveis assumindo valores fracionários para a configuração e desta forma resolvendo apenas um problema de programação linear (PL). Sendo conhecidas as incógnitas n_{ij} , pode assim encontrar os fluxos de potências em todos os circuitos antigos (n_{ij}^0) e novos (n_{ij}). Portanto, o caminho ij que foi escolhido por n_{ij} que possua o maior fluxo de potência representa o caminho mais interessante de acordo com esta nova proposta. Este processo é repetitivo, adicionando em cada passo um circuito no caminho mais atrativo, constitui o algoritmo de Garver.

O processo termina quando a solução do PL correspondente à configuração apresenta uma solução com todos os $n_{ij} = 0$, o que significa que não é mais necessário realizar adições de circuitos ao sistema. Este conjunto de adições realizadas representa a proposta de solução do algoritmo de Garver. Lembrando que em cada passo o algoritmo de Garver resolve o PL abaixo, em que o valor n_{ij}^1 armazena os circuitos adicionados em cada passo do processo de otimização.

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} n_{ij} \quad (8a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} f_{ji,y} + \sum_{ij \in \Omega_\ell} f_{ij} + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8b)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0 + n_{ij}^1) \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (8c)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8d)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq (\bar{n}_{ij} - n_{ij}^1) \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (8e)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (8f)$$

$$f_{ij} \text{ irrestrito} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (8g)$$

O algoritmo de Garver pode ser descrito pelos passos seguintes:

Passo 1: Estabelece a configuração base n_{ij}^0 e $n_{ij}^1 = 0$ como configuração corrente.

Passo 2: Resolver o PL correspondente ao sistema (8a) - (8f) usando a configuração corrente. Observando se todos os valores de $n_{ij} = 0$ então pare, pois foi encontrada uma boa solução factível. Caso contrário, seguimos para o próximo passo.

Passo 3: Calcular os novos fluxos de todos os circuitos adicionados pelo PL ($n_{ij} \neq 0$) usando a relação $f_{ij}^v = n_{ij} \bar{f}_{ij}$. Identificar o novo caminho ij com o maior valor de f_{ij}^v e atualizar a configuração corrente, mudando n_{ij}^1 adicionando um circuito naquele caminho ij . Volte ao passo 2.

Segundo Martins (2009) o modelo de transporte possui uma grande vantagem em não existir diferença entre resolver o problema de sistemas conexos e altamente ilhados, mas a desvantagem é que a solução pode estar distante da solução ótima do modelo DC por não satisfazer a segunda lei de Kirchhoff.

O algoritmo de Garver é um AHC que de forma geral encontra boas soluções, mas não há garantia de encontrar a solução ótima.

Em análise do algoritmo heurístico construtivo observamos que sua eficiência é questionada para encontrar uma configuração ótima da expansão de um sistema elétrico. Na prática estes algoritmos heurísticos encontram as configurações ótimas de sistemas pequenos e apenas configurações boas para sistemas elétricos de médio e grande porte. Entretanto, estes algoritmos são muito importantes pelos seguintes motivos:

- Na primeira fase de pesquisa entre as décadas de 60 e 70, era a única maneira que existia para resolver o problema de planejamento da expansão do sistema elétrico de grande porte.
- A maioria destes algoritmos são robustos, simples de entender, programar e usar.
- Os recursos computacionais utilizados destes algoritmos são pequenos, não necessitando de muito esforço.
- Muitas características e propriedades destes algoritmos podem ser usadas no desenvolvimento de algoritmos mais complexos como as metaheurísticas (*Simulated Annealing*, Algoritmos Genético, Busca Tabu, GRASP, VNS e outros).

3.3.2 A HEURÍSTICA DE BUSCA ATRAVÉS DE VIZINHANÇA

O Algoritmo heurístico de busca através de vizinhança (*steepest descent heuristic*) é significativamente diferente do algoritmo heurístico construtivo. Uma característica do AHC é que a geração da solução factível é feita através de uma sequência de passo a passo usando um indicador de sensibilidade onde a solução passa a ser construída por etapas e as decisões levam a uma solução de boa qualidade. No algoritmo heurístico de busca através de vizinhança, que a partir deste instante passa a ser denominado de SDH (do inglês *Steepest Descent Heuristic* para o problema de minimização), o processo será iniciado já conhecendo uma solução factível, isto

é, partimos de uma solução inicial já construída e depois encontraremos outras soluções factíveis melhores percorrendo o espaço de busca e passando sempre para a melhor solução vizinha (ROMERO, 1993).

Os termos que são usados na heurística de busca através de vizinhança são diferenciadas de alguns métodos de otimização clássica como: programação linear, programação não linear, programação inteira, etc. Assim os termos usados podem ter significados diferentes. Porém este termo também é usado nas metaheurísticas. Vamos assim revisar uma parte dos termos na heurística de busca através de vizinhança e também das metaheurística (ROMERO, 1993).

Vamos apresentar os principais conceitos usados na heurística (SDH), fazendo uma análise paralela quando possível com os conceitos utilizados na otimização clássica. O grande diferencial se encontra no fato que a otimização clássica usa necessariamente uma modelagem matemática para resolver um problema de otimização. Assim, dado um problema como, por exemplo, problema do caixeiro viajante ou das n rainhas, a primeira decisão na otimização clássica consiste em encontrar o modelo matemático desse problema. A seguir se resolve o modelo matemático usando uma técnica de otimização clássica. Para encontrar o modelo matemático a decisão mais importante é a escolha das variáveis de decisão.

Vamos abordar a estratégia mais popular usada por uma técnica de otimização clássica, que é resolver o modelo matemático do problema a partir de um ponto inicial (que pode ser factível ou infactível), assim as variáveis de decisão já começam com um valor específico. Partindo desse ponto inicial se gera uma sequência de outros pontos (factíveis ou infactíveis) até atingir a convergência para um ponto factível e ótimo (local ou global). Nesse tipo de análise o conceito de região factível é extremamente fundamental. A estratégia fundamental da heurística de busca através de vizinhança (SDH) pode ser resumida da seguinte forma:

- A resolução de processo de otimização é iniciado através de uma solução inicial (factível ou infactível) que passa a ser chamada de solução corrente.
- Deve-se definir uma estrutura de vizinhança. Assim, deve existir uma forma de identificar as soluções que são consideradas vizinhas da solução corrente. As soluções vizinhas podem ser factíveis ou infactíveis.
- Na heurística de busca através de vizinhança (SDH) se passa de uma solução corrente para uma outra de melhor solução vizinha.
- O processo só termina quando todas as soluções vizinhas são de pior qualidade que a solução corrente.

Observamos que o processo de implementação da heurística de busca através de vizinhança (SDH) não é acompanhando necessariamente de um modelo matemático para o problema em

análise. Na verdade a heurística de busca através de vizinhança SDH pode resolver problemas de otimização que não tem modelagem matemática e essa característica torna a heurística de busca através de vizinhança (SDH), assim como as metaheurísticas, uma técnica de otimização relativamente distante da lógica de otimização usada na otimização clássica. Para uma adequada apresentação do funcionamento da heurística de busca através de vizinhança (SDH) devemos definir alguns conceitos que apresentamos a seguir e que nem sempre são apresentados na otimização clássica ou podem ter significados diferentes.

A **codificação** ou **representação** da proposta de solução de um problema complexo representa qual será a estratégia fundamental adotada para entender o funcionamento da heurística SDH. Assim, a codificação de uma proposta de solução representa de forma inequívoca um elemento do espaço de busca do problema de otimização. O espaço de busca é formado por todas as propostas de solução que podem ser identificadas usando a codificação escolhida para resolver um determinado problema de otimização usando assim as estratégias de vizinhança.

O **espaço de busca** é outro fator que devemos ressaltar, pois está diretamente ligado com a proposta de codificação. Os elementos do espaço de busca (propostas de solução) são todas as propostas de solução que podem ser encontradas implementando as estruturas de vizinhança ou os operadores existentes na heurística SDH ou nas metaheurísticas. O espaço de busca pode ser definido sob algumas alternativas: (i) ele pode compreender apenas uma pequena parcela da região factível; (ii) ou exatamente a região factível; (iii) ou parcelas da região factível e infactível do problema que está sendo resolvido. Os elementos do espaço de busca estão implicitamente descritos quando escolhemos a codificação de uma proposta de solução e a forma de realizar as transições a partir de uma solução inicial (ou conjunto de soluções iniciais). Assim, as estruturas de vizinhança ou operadores da meta-heurística junto com a proposta de codificação definem os elementos do espaço de busca. Para luz de ilustração, podemos mencionar que no problema do caixeiro viajante o espaço de busca é exatamente igual à região factível (ROMERO, 1993).

3.4 METAHEURÍSTICAS

Mesmo fazendo uso de heurísticas boas, os bons resultados são encontrados por meio do uso de procedimento que entenda cada característica do problema estudado, com suas particularidades. Para aumentar sua eficiência fazemos uso das metaheurísticas, que são procedimentos generalistas que devem ser adaptados a um problema específico a ser estudado.

Metaheurísticas são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos ou máximos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). Posteriormente a definição passou a abranger quaisquer procedimento que emprega estratégias para escapar de mínimos locais, normalmente utilizando o

conceito de vizinhança para estabelecer meios de fugir dos mínimos locais. Assim a metaheurística visa produzir um resultado satisfatório para um problema, porém sem qualquer garantia de otimalidade.

As metaheurísticas possuem tradição na resolução de problemas na pesquisa operacional e também na engenharia elétrica. As soluções encontradas usando este método leva ao pesquisador encontrar soluções ótimas ou quase ótimas, mas possui um grande esforço computacional (GARCÉS NEGRETE, 2012).

Um método de "*Simulated Annealing*" foi usado por Romero, Gallego e Monticelli (1996) para resolver o problema de planejamento, a desta forma como um método híbrido de "*Simulated Annealing*" foi utilizado por (CORTEZ-CARMONA; PALMA-BEHNKE; MOYA, 2009).

Os algoritmos genéticos também são usados na solução do problema de planejamento de sistema de energia elétrica (GALLEGO; MONTICELLI; ROMERO, 1998). Uma boa solução encontrada usando o algoritmo de Chu-Beasley foi proposta por Silva (SILVA et al., 2005, 2006) para resolver o planejamento considerando incertezas na demanda futura.

3.5 TÉCNICAS CLÁSSICAS DE OTIMIZAÇÃO

O problema de planejamento da expansão do sistema elétrico (PEST) pode ser representado por vários modelos matemáticos. Vamos restringir esta breve análise aos modelos estudados até o momento. Quando se utiliza o modelo de transportes obtém-se um problema de programação linear inteiro misto (PLIM), e quando utiliza-se o modelo DC, obtém-se um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), que já foi mencionado anteriormente sendo problemas de difícil solução, em especial quando se trata de sistemas de grande porte. As técnicas utilizadas, para resolver este problema, podem ser classificadas em duas categorias (Figura 6): métodos exatos (analíticos e de otimização clássica) como *Branch and Bound* e Decomposição de Benders; e os métodos aproximados (heurísticas e metaheurísticas) e classificados na figura 6 (TAGLIALENHA, 2008).

Figura 6 - Categorias dos problemas.



Fonte: Elaboração do próprio autor

4 MODELAGEM GENERALIZADA DA EXPANSÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

O planejamento do sistema de transmissão começa com o estudo do cenários de crescimento do consumo de energia determinada pela sociedade, de acordo com previsões ao longo do tempo. É a partir desses cenários que se verifica a eventual necessidade de se ampliar e fortalecer a rede. Caso as condições não sejam ideais, deve-se implantar um plano para fornecer carga, instalações de novos equipamentos, aumento de linhas de transmissão e interligação de barras isoladas.

É muito comum encontrar problemas de sistemas de transmissão que quando modelados não são lineares. Desta forma procurou-se encontrar uma modelagem ideal que permitiu-se transformar um problema não linear e em uma aproximação linear satisfatória, permitiu-se encontrar uma solução adequada para este sistema. Estas soluções aproximadas resolvidas por duas classes de alternativa de soluções: meta-heurística e os algoritmos clássicos.

4.1.1 MODELO DC COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Aborda-se agora a proposta de modelo de planejamento de expansão do sistema elétrico onde há a possibilidade de desligar linhas de transmissão da topologia base que por ventura pode estar atrapalhando o fechamento ótimo do sistema como busca do melhor resultado para o problema de planejamento de expansão do sistema elétrico.

Na modelagem matemática tradicional do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão tem-se como meta principal identificar as linhas de transmissão que devem ser adicionadas a topologia base para que os custos de investimentos sejam o mínimo possível e o sistema opere de forma adequada. Na literatura tradicional sempre que trata-se sobre melhorias na expansão do sistema elétrico de transmissão, tem-se implicitamente a noção de adicionar um número de linhas novas e nunca mexer(desligar) alguma linha que já faz parte do sistema elétrico, pois acredita-se que essas linhas sempre contribuem a resolver adequadamente o problema. Porém algumas linhas de transmissão podem ter sido adicionadas ao sistema no passado em outro contexto diferente ao de operação normal (ZULUAGA, 2008).

Este modelo foi apresentado por Zuluaga (2008) (e uma metodologia de solução para o

problema de planejamento da expansão da transmissão) onde se considera a possibilidade de desligamento de circuitos, que foi por ele denominado planejamento considerando generalização. O objetivo da generalização é valorizar a potencialidade de obter uma melhor solução para a rede futura considerando a possibilidade de desligamento da operação alguns circuitos existentes na topologia base, mas somente se estes circuitos estão impedindo uma melhor solução para o sistema elétrico.

Estudando este argumento de desligar da operação alguns circuitos de transmissão da rede atual em funcionamento possa melhorar o desempenho da rede futura a ser planejada, principalmente por que esta rede também foi criada por um processo matemático de otimização para a resolução do problema de planejamento de expansão, que parece ser ilógico.

Porém, pode-se comprovar que a solução do problema de planejamento de expansão do sistema elétrico com desligamento de algumas linhas de transmissão é mais econômico, pois tem menor custo de investimento comparado com o planejamento de expansão onde todas as linhas da topologia base são fixadas. Assim acredita-se que a rede de transmissão atual pode ter sofrido modificações ao longo do tempo e assim apresentar uma solução inicial de pobre qualidade para o novo problema: os cenários geração/carga considerados no processo de otimização.

Testes exaustivos mostram que modificações de cenários de geração/carga do sistema elétrico, produzem diferentes configurações ótimas da rede de transmissão. Os cenários futuros de geração/carga são incertos, mas podem ser previstos com exatidão e segurança, sendo na verdade resultados de interesses e estratégias dos diversos operadores que compõem o sistema elétrico. Assim, a nova modelagem generalizada assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} n_{ij} - \sum_{ij \in \Omega_\ell} n'_{ij} \quad (9a)$$

s.a.

$$sf + g = d \quad (9b)$$

$$f_{ij} - \gamma_j (n'_{ij} + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (9c)$$

$$|f_{ij}| \leq (n'_{ij} + n_{ij}) \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (9d)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (9e)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (9f)$$

$$0 \leq n'_{ij} \leq n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (9g)$$

$$n'_{ij} \text{ e } n_{ij}^0 \text{ inteiros} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (9h)$$

$$f_{ij} \text{ e } \theta_j \text{ irrestritos} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (9i)$$

Uma nova variável que deve ser definida no modelo matemático. A variável n'_{ij} é o número de linhas que deve ser adicionadas a custo unitário negativo (-1) com valor máximo de n_{ij}^0

. A variável n'_{ij} modela as linhas já existentes na topologia base, onde estas linhas possuem preferência de ser adicionadas ao modelo pois já estão construídas na topologia base.

Nesta proposta de modelagem matemática todas as linhas da topologia base são desativadas temporariamente, para depois serem realocadas, isto é, partimos de um conceito que todas as linhas da topologia base possam estar dificultando a planejamento da expansão do sistema elétrico. Na modelagem matemática temos dois tipos de variáveis que representa as linhas que podem ser adicionadas: (i) as linhas n'_{ij} que possuem custo bonificado (-1) , que representam os circuitos já existentes desconsiderando os custos de operação; (ii) e as linhas n_{ij} que representam as novas linhas que devem ser construídas a um custo real.

Desta forma ao resolver o modelo matemático o primeiro passo é comprovar que todas as linhas n'_{ij} são importantes para a operação do sistema elétrico. Por possuir uma bonificação na função objetivo, a tendência é que todos os circuitos sejam realocados para sua posição de origem, pois assim se ganha uma bonificação para cada circuito realocado e então na nova solução ótima o resultado lógico esperado seria $n'_{ij} = n^0_{ij}$.

Assim tem-se que todas as linhas antigas devem ser adicionadas para minimizar a função objetivo e bonificar os custos. Entretanto se há alguma linha atrapalhando a otimização do modelo matemático, a nova solução ótima será $n'_{ij} < n^0_{ij}$. Após resolver esta parte do problema pode-se identificar as linhas desligadas da topologia base usando a relação $n''_{ij} = n^0_{ij} - n'_{ij}$, onde n''_{ij} representa as linhas que foram desligadas da topologia base. O custo negativo unitário para n'_{ij} foi introduzido para que o processo de otimização tente reintroduzir ao sistema todos os circuitos da topologia base. Assim, linhas da topologia base não serão reintroduzidas apenas quando encarecem o investimento total no processo de expansão do sistema elétrico. Assim, espera-se que a metodologia de otimização realoque prioritariamente as linhas relacionadas em variáveis n'_{ij} quando comparadas com as linhas relacionadas com as variáveis n_{ij} .

4.1.2 MODELO LINEAR DISJUNTIVO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Nesta proposta de modelagem matemática, adota-se o modelo apresentado em (9a) - (9i), com a transformação para a formulação linear disjuntivo. A necessidade de transformação em disjuntivo está na não linearidade da equação (9c) que apresenta as variáveis $n'_{ij} + n_{ij}$ inteiras como produto das variáveis $(\theta_i - \theta_j)$ contínuas. A formulação disjuntiva garante assim a obtenção de uma modelagem linear assumindo a forma seguinte:

$$\begin{aligned} \min \quad & v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} - \sum_{ij \in \Omega_0} \sum_{y_0 \in Y_0} z_{ij,y_0} \\ \text{s.a.} \quad & \end{aligned} \tag{10a}$$

$$\sum_{ji \in \Omega_\ell} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y} \right) + \sum_{ji \in \Omega_0} \left(\sum_{y_0 \in Y_0} f_{ji,y_0}^0 \right) - \sum_{ij \in \Omega_\ell} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y} \right) - \sum_{ij \in \Omega_0} \left(\sum_{y_0 \in Y_0} f_{ij,y_0}^0 \right) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (10b)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y_0}^0 - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - z_{ij,y_0}) \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (10c)$$

$$f_{ij}^0 = \sum_{z \in Z} f_{ij,z} \quad \forall ij \in \Omega_o \quad (10d)$$

$$|f_{ij,y_0}^0| \leq z_{ij,y_0} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (10e)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (10f)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (10g)$$

$$f_{ij,y} = \sum_{y \in Y} f_{ij,y} \quad \forall ij \in \Omega \quad (10h)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (10i)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (10j)$$

$$\sum_{y_0 \in Y_0} z_{ij,y_0} \leq n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (10k)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (10l)$$

$$z_{ij,y_0} \leq z_{ij,y_0-1} \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (10m)$$

$$w_{ij,y} \text{ binário} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (10n)$$

$$z_{ij,y_0} \text{ binário} \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (10o)$$

Neste modelo modificado já se conhece a maioria dos elementos apresentados. Tem-se o conjunto Ω_0 representando todas os ramos da topologia base que podem ser realocados, a substituição da variável n_{ij} que representa o número de linhas adicionadas na topologia base, pela variável binária $w_{ij,y}$ dentro do conjunto Y de variáveis binárias, onde cada variável binária representa uma linha de transmissão que pode ou não ser adicionada no caminho $i - j$ a um custo real. A variável n'_{ij} representa as linhas de transmissão que podem ser adicionadas no caminho $i - j$ a um custo unitário negativo (-1), pois apenas foram desligadas. Esta variável n'_{ij} será substituída pela variável binária z_{ij,y_0} dentro do conjunto Y_0 , onde cada elemento representa uma linha de transmissão que já está disponível na topologia base. A variável $f_{ij,z}^0$ representa o fluxo total de potência ativa através no caminho $i - j$ relacionado às linhas que foram desligadas e que podem ser realocadas para um bom funcionamento do sistema.

Analizando a equação (10a), que é uma função de minimização da função objetivo, garante assim que todas as linhas que foram desligadas e são necessárias volte para o seu devido lugar, a não ser que ela esteja distorcendo o correto funcionamento do sistema elétrico. Assim o custo de operação do problema de expansão será menor que os tradicionais, pois só será adicionada a linha $w_{ij,y}$ se realmente há a devida necessidade.

4.1.3 REDUÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA POR ADIÇÃO DE RESTRIÇÕES DE CERCA DO SISTEMA COLOMBIANO

Ao empregar a modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão para o sistema colombiano, encontramos um modelo com grande esforço computacional que não permitia a encontro da solução ótima inicialmente. Utilizamos um computador do laboratório EMU com 4 Gb de memória RAM, com sistema operacional Windows 7 Profissional, 8 processadores Intel ® Core(TM) i7 de 2.93 GHz e um sistema operacional de 32 Bits e 225 GB de disco.

Relata-se a metodologia usada para melhor compreensão dos fatos. Quando utilizamos a linguagem de modelagem para a programação matemática (AMPL) (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003), ela faz a comunicação com o solver comercial CPLEX (ILOG, 2008) responsável por solucionar o problema. Assim o CPLEX começa a sondagem das possíveis soluções usando a árvore de Branch & Bound e armazenando os resultados de cada "nó" desta árvore em arquivos de "logs" com tamanhos médios de 1.024 KB no disco rígido do computador. O valor acumulado no disco rígido depois de vários dias de processamento ultrapassava 200 GB, tomando muito espaço em disco e impedindo que a máquina de continuar o processamento.

Busca-se o uso de algumas directivas (comando específicos do ampl como por exemplo "logfile") do AMPL, que poderia selecionar quais os arquivos de logs que seriam mantidos no armazenamento, reduzindo assim o número de arquivos criados, mas isto ocasionava um GAP (intervalo de confiança) constante e de alto valor que leva o problema a não convergir para uma solução ótima.

Desta forma busca-se cercar as barras que possuíam geração e demanda em relação ao fluxo de potência. Verifica-se todas as barras que apresentavam esta característica e acrescentamos uma restrição adicional de forma a garantir que os fluxos de potência desta barras atenderiam os valores de geração e demanda necessários para não comprometer o funcionamento do sistema.

O método utilizado para gerar as restrições de cerca segue o seguinte algoritmo:

1. Verificar no conjunto das barras i , a presença de geração e/ou demanda;
2. Anotar o valor absoluto da diferença entre a geração e a demanda da barra i que chamaremos de DIF_i ;
3. Procurar em todos os ramos (circuitos) a existência dos caminhos (i, j) . Então geram-se as matrizes binárias A e B representando respectivamente as restrições de cerca para as linhas já existentes na topologia base e as linhas a serem adicionadas ao sistema;
4. Nestes caminhos observados verificamos se existe linha na topologia base. Se afirmativo a matriz A e B assume o valor 1, senão A assume o valor 0 e B assume o valor 1;

5. Entre todos os caminhos que contém a presença da barra i , registramos o valor do maior fluxo de potência, que chamaremos de POT_i ;
6. Aproxima-se para o maior inteiro o quociente entre DIF_i e POT_i , gerando assim a matriz discreta K_i

Temos assim o acréscimo de uma nova restrição:

$$\sum_{(m,i,j) \in \Omega_\ell} A_{t,m} z_{m,i,j,y_0} + \sum_{(m,i,j) \in \Omega_\ell} B_{t,m} w_{m,i,j,y} \geq K_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (11)$$

Onde m representa o número do circuito analisado do sistema, (t,m) representa o caminho de restrição de cerca da barra t que liga a barra m . o valor de (t,m) é igual a 1 se existe a restrição de cerca e 0 se não há a restrição de cerca.

Deste modo acrescentamos esta restrição ao modelo (12a)-(12p) obtendo:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_\ell} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} - \sum_{ij \in \Omega_0} \sum_{y_0 \in Y_0} z_{ij,y_0} \quad (12a)$$

s.a.

$$\begin{aligned} & \sum_{ji \in \Omega_\ell} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y} \right) + \sum_{ji \in \Omega_0} \left(\sum_{y_0 \in Y_0} f_{ji,y_0}^0 \right) - \sum_{ij \in \Omega_\ell} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y} \right) - \\ & - \sum_{ij \in \Omega_0} \left(\sum_{y_0 \in Y_0} f_{ij,y_0}^0 \right) + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \end{aligned} \quad (12b)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y_0}^0 - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - z_{ij,y_0}) \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (12c)$$

$$f_{ij}^0 = \sum_{z \in Z} f_{ij,z} \quad \forall ij \in \Omega_o \quad (12d)$$

$$|f_{ij,y_0}^0| \leq z_{ij,y_0} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (12e)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (12f)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (12g)$$

$$f_{ij,y} = \sum_{y \in Y} f_{ij,y} \quad \forall ij \in \Omega \quad (12h)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (12i)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (12j)$$

$$\sum_{y_0 \in Y_0} z_{ij,y_0} \leq n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (12k)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (12l)$$

$$\sum_{(m,i,j) \in \Omega_\ell} A_{t,m} z_{m,i,j,y_0} +$$

$$\sum_{(m,i,j) \in \Omega_\ell} B_{t,m} W_{m,i,j,y} \geq K_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (12m)$$

$$z_{ij,y_0} \leq z_{ij,y_0-1} \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (12n)$$

$$w_{ij,y} \text{ binário} \quad \forall ij \in \Omega_\ell \quad (12o)$$

$$z_{ij,y_0} \text{ binário} \quad \forall ij \in \Omega_0 \quad (12p)$$

5 TESTES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Queremos demonstrar os resultados encontrados para a nova modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão realizados nesta pesquisa. Utilizamos três sistemas elétricos usados na literatura especializada, afim de comparar os resultados tradicionais encontrados com o modelo linear disjuntivo em comparação aos resultados encontrados nos testes da nova modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Esta análise será feita com os modelos 24 barras do IEEE (IEEE24), sul brasileiro de 46 barras e o sistema colombiano de 93 barras. Os dados podem ser encontrados em (LAPSEE, 2012) e então apresentados nos anexos contidos nas seções A.2 para o 24 barras do IEEE, A.3 para o sul brasileiro e A.4 para o Sistema Colombiano do Apêndice A, respectivamente.

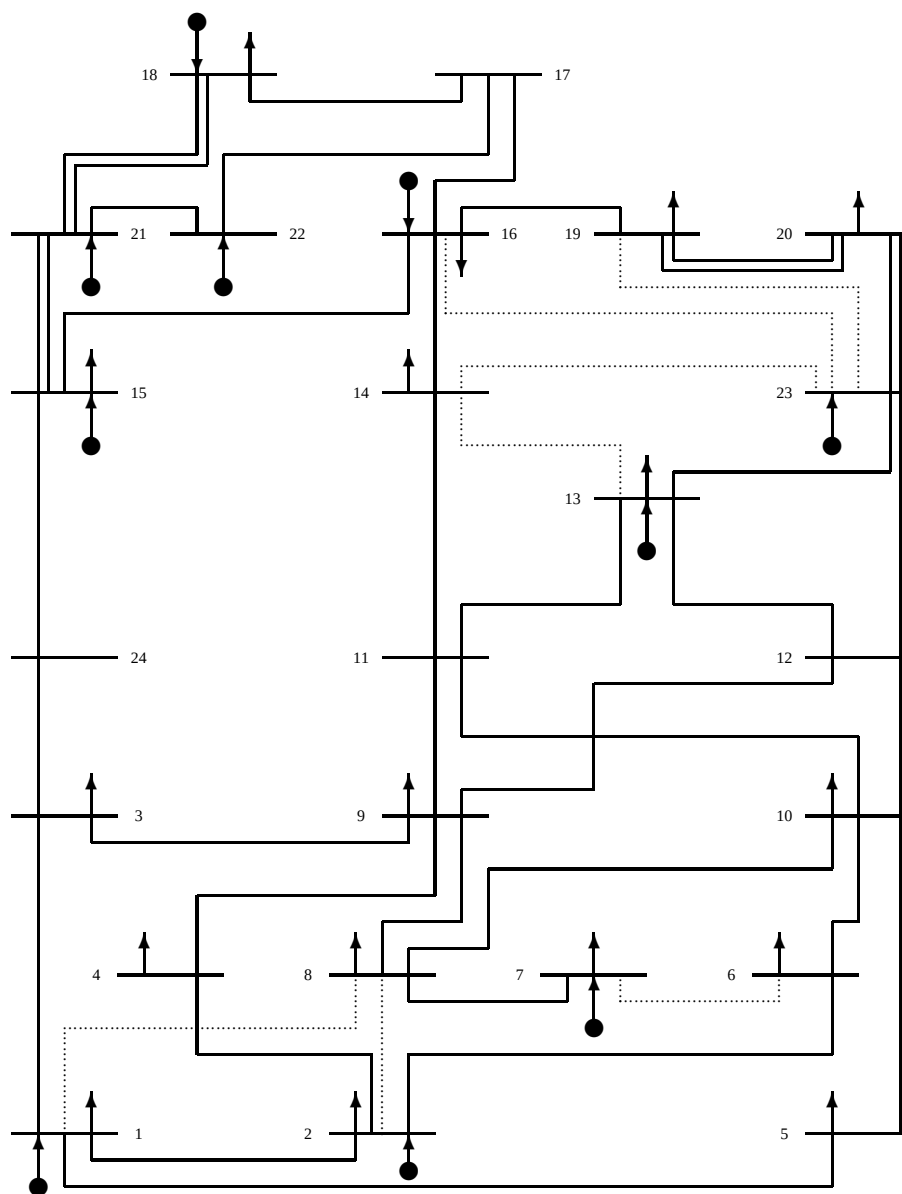
5.2 O SISTEMA IEEE DE 24 BARRAS

O sistema 24 barras do IEEE (IEEE24), possui 41 caminhos de adição de linhas (circuitos) de transmissão ou transformadores, demanda total de 8.550 MW e geração total instalada de 10.215 MW como vemos na figura 7. O sistema IEEE de 24 barras se destaca como um dos sistemas mais utilizados em testes para os novos modelos a ser testados e novas técnicas de otimização do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão.

Foram realizados testes com o sistema IEEE de 24 barras para cinco tipos diferentes de planejamento. O primeiro teste corresponde ao planejamento em que é considerado o redespacho (reprogramação) da geração, isto é, o planejador escolhe apenas os limites dos geradores e o valor exato da geração em cada barra de geração é determinada pelo processo de otimização. Quando a soma das gerações é maior que a soma das demandas é possível criar a geração com redespacho, mas mantendo cuidados com a topologia para não haver corte de cargas.

Nos outros testes, a geração em cada barra de geração é fixada e esse tipo de planejamento é conhecido como planejamento da expansão de sistemas de transmissão sem redespacho (sem reprogramação) da geração. Assim, para quatro propostas de geração é encontrado o plano de expansão de sistemas de transmissão. Conceitualmente, existem cinco problemas de planejamento da expansão de sistemas de transmissão que usam os mesmos dados (FANG; HILL, 2003).

Figura 7 - Diagrama do sistema IEEE de 24 barras.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para efeito de comparação, inicialmente se resolve o problema de planejamento tradicional utilizando o modelo linear disjuntivo sendo ele o equivalente ao modelo DC, assim se obtêm um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM), em um problema de programação linear inteiro misto (PLIM). Além disto se garante uma solução ótima para o problema pois, segundo a literatura especializada o modelo DC apresenta a solução ideal para o problema de planejamento de expansão do sistema de transmissão (PEST).

A próxima etapa é resolver o problema de planejamento utilizando o modelo com desligamento temporário de linhas de transmissão, assim se faz a comparação da solução ótima

encontrada com os resultados já conhecidos.

Neste teste serão também analisados as linhas existentes na configuração base em comparação com as linhas do novo modelo. Apresenta-se assim resultados obtidos abaixo em dois casos, primeiro sem a possibilidade de desligamento de linhas de transmissão e posteriormente com a possibilidade de desligamento de linhas de transmissão.

5.2.1 PLANEJAMENTO SEM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO IEEE DE 24 BARRAS

Os resultados encontrados para a modelagem tradicional em testes realizado no sistema do IEEE de 24 barras com cinco planos diferentes de geração. O plano P_1 apresenta reprogramação da geração e os planos P_2 , P_3 , P_4 e P_5 sem reprogramação da geração.

1. Sistema de 24 barras com reprogramação da geração - Plano P_1

$$* v = 152,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{10,12} = 1 \text{ e } n_{14,16} = 1$$

2. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_2

$$* v = 390,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{14,16} = 1, n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 2, n_{16,19} = 1 \text{ e } n_{17,18} = 2$$

3. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano p_3

$$* v = 392,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 1, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 2 \text{ e } n_{17,18} = 2$$

4. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_4

$$* v = 218,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 1, n_{16,17} = 1 \text{ e } n_{20,23} = 1$$

5. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_5

$$* v = 342,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{9,11} = 1, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 2 \text{ e } n_{16,17} = 1$$

5.2.2 PLANEJAMENTO COM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO IEEE DE 24 BARRAS

Os resultados encontrados para a modelagem com possibilidade de desligamento de linhas de transmissão em testes realizado no sistema do IEEE de 24 barras com cinco planos diferentes de geração. O plano P_1 apresenta reprogramação da geração e os planos P_2 , P_3 , P_4 e P_5 sem reprogramação da geração.

1. Sistema de 24 barras com reprogramação da geração - Plano P_1

$$* v = 151,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{11,13} = 1, n_{1,8} = 1 \text{ e } n_{6,7} = 1$$

$$* n''_{2,6} = 1, n''_{6,10} = 1 \text{ e } n''_{16,19} = 1$$

2. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_2

$$* v = 325,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{4,9} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{14,16} = 1, n_{16,17} = 2, n_{16,19} = 1 \text{ e } n_{17,18} = 1$$

$$* n''_{2,4} = 1, n''_{3,9} = 1, n''_{8,9} = 1 \text{ e } n''_{20,23} = 1$$

3. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_3

$$* v = 350,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 1, n_{10,11} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 2 \text{ e } n_{17,18} = 1$$

$$* n''_{1,2} = 1, n''_{15,16} = 1 \text{ e } n''_{20,23} = 1$$

4. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_4

$$* v = 182,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 1 \text{ e } n_{20,23} = 1$$

$$* n''_{1,2} = 1, n''_{13,23} = 1 \text{ e } n''_{18,21} = 1$$

5. Sistema de 24 barras sem reprogramação da geração - Plano P_5

$$* v = 287,000,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{4,9} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 1 \text{ e } n_{16,17} = 1$$

$$* n''_{2,4} = 1, n''_{3,9} = 1, n''_{5,10} = 1, n''_{8,9} = 1, n''_{13,23} = 1 \text{ e } n''_{16,19} = 1$$

Ao observar o Plano P_1 onde o sistema é tratado com reprogramação da geração, a análise dos resultados é de um investimento inicial de 152 milhões de dólares onde não se permite o desligamento de linhas da topologia base, para o comparativo de 151 milhões de dólares onde é permitido o desligamento de algumas linhas da topologia base. Uma diferença de 1 milhão de dólares inicialmente, pois há a possibilidade de novas expansões e assim por consequência novos desligamentos. Ainda nota-se que ao comparar as duas situações que as linhas $n''_{2,6} = 1$, $n''_{6,10} = 1$ e $n''_{16,19} = 1$ devem ser desligadas da operação normal, pois reduzem o desempenho da rede futura e aumentam o custo do plano de expansão ótimo. Devemos lembrar que este desligamento não é definitivo, assim há a possibilidade de religar estas linhas para uma segunda rede futura a custo zero de investimento.

Os Planos P_2 , P_3 , P_4 e P_5 possuem a particularidade de não haver reprogramação da geração, e a análise dos resultados é:

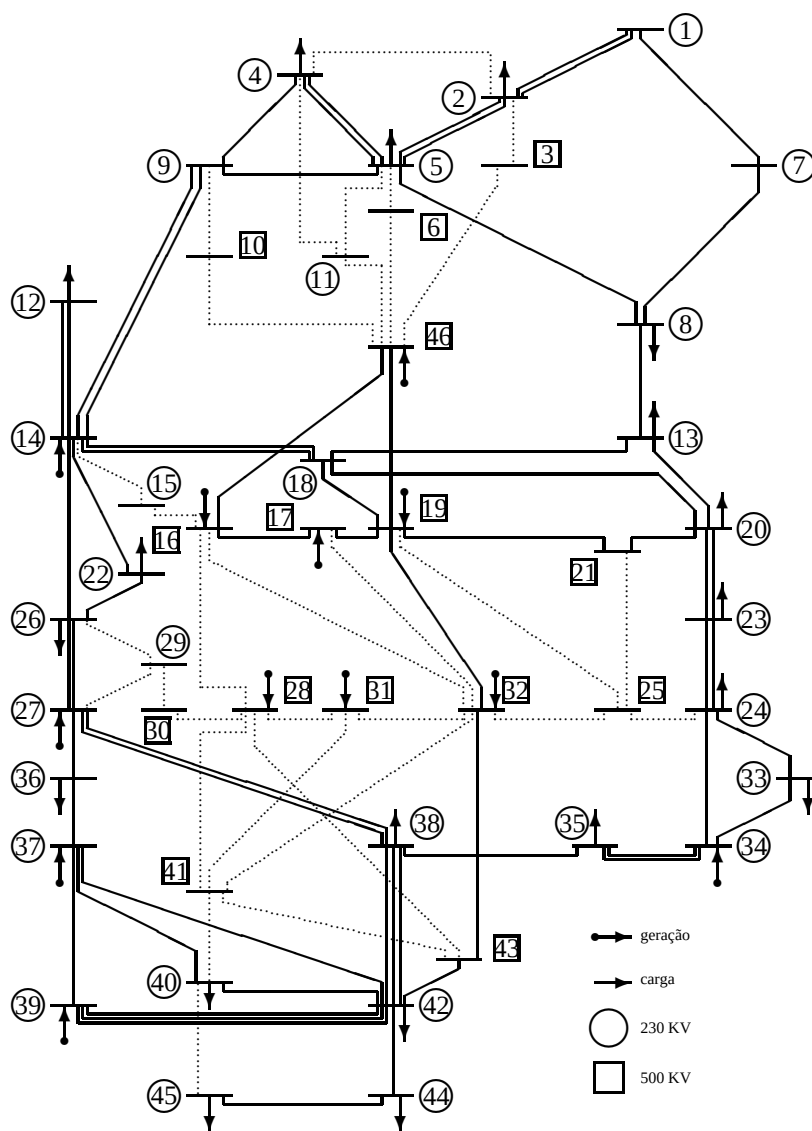
- (i) uma redução de 390 milhões de dólares no investimento inicial de Plano P_2 para 325 milhões de dólares com o desligamento de algumas linhas de transmissão; economizando 65 milhões de dólares. Aqui notamos que as linhas $n''_{2,4} = 1$, $n''_{3,9} = 1$, $n''_{8,9} = 1$ e $n''_{20,23} = 1$ devem também ser desligadas da operação normal, pois reduzem o desempenho da rede futura e aumentam o custo do plano de expansão ótimo;
- (ii) uma redução de 392 milhões de dólares no investimento inicial de Plano P_3 para 350 milhões de dólares com o desligamento de algumas linhas de transmissão; economizando 42 milhões de dólares; temos nesta situação que desligar as linhas $n''_{1,2} = 1$, $n''_{15,16} = 1$ e $n''_{20,23} = 1$ da operação normal, pois reduzem o desempenho da rede futura e aumentam o custo do plano de expansão;
- (iii) uma redução de 218 milhões de dólares no investimento inicial de Plano P_4 para 182 milhões de dólares com o desligamento de algumas linhas de transmissão; economizando 36 milhões de dólares. Aqui notamos que as linhas $n''_{1,2} = 1$, $n''_{13,23} = 1$ e $n''_{18,21} = 1$ devem também ser desligadas da operação normal, pois reduzem o desempenho da rede futura e aumentam o custo do plano de expansão ótimo;
- (iv) uma redução de 342 milhões de dólares no investimento inicial de Plano P_5 para 287 milhões de dólares com o desligamento de algumas linhas de transmissão; economizando 55 milhões de dólares. Aqui notamos que as linhas $n''_{2,4} = 1$, $n''_{3,9} = 1$, $n''_{5,10} = 1$, $n''_{8,9} = 1$, $n''_{13,23} = 1$ e $n''_{16,19} = 1$ devem também ser desligadas da operação normal, pois reduzem o desempenho da rede futura e aumentam o custo do plano de expansão ótimo.

Neste trabalho o menor valor encontrado com a possibilidade de desligamento de linhas de transmissão da topologia base que não ajudam e não prejudicam futuras operações foi de 151 milhões de dólares.

5.3 O SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS

O sistema de 46 barras do sistema sul brasileiro possui 79 caminhos de adição de linhas de transmissão ou transformadores, demanda total de 6880 MW e geração total instalada 6880 MW como vemos na figura 8.

Figura 8 - Diagrama do sistema sul brasileiro de 46 barras.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Este sistema é considerado um sistema de médio porte de complexidade mediana (HAFFNER et al., 2001; ROMERO et al., 2002).

5.3.1 PLANEJAMENTO SEM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS

Os resultados encontrados para a modelagem tradicional em testes realizado no sistema sul brasileiro de 46 barras com dois planos diferentes de geração. O plano P_1 apresenta reprogramação da geração e o plano P_2 sem reprogramação da geração.

1. Sistema sul brasileiro com reprogramação da geração:

$$* v = 72,870,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{2,5} = 1, n_{13,20} = 1, n_{20,23} = 1, n_{20,21} = 2, n_{42,43} = 1, n_{46,6} = 1 \text{ e } n_{5,6} = 2$$

2. Sistema sul brasileiro sem reprogramação da geração:

$$* v = 154,420,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{20,21} = 1, n_{42,43} = 2, n_{46,6} = 1, n_{19,25} = 1, n_{31,32} = 1, n_{28,30} = 1, n_{26,29} = 3, n_{24,25} = 2, n_{29,30} = 2 \text{ e } n_{5,6} = 2$$

5.3.2 PLANEJAMENTO COM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA SUL BRASILEIRO DE 46 BARRAS

Apresentamo agora os resultados encontrados para a nova modelagem com possibilidade de desligamento de linhas de transmissão em testes realizado no sistema sul brasileiro de 46 barras com dois planos diferentes de geração. O plano P_1 apresenta reprogramação da geração e o plano P_2 sem reprogramação da geração.

1. Sistema sul brasileiro com reprogramação da geração:

$$* v = 63,163,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{20,23} = 1, n_{20,21} = 2, n_{42,43} = 1, n_{46,6} = 1 \text{ e } n_{5,6} = 2$$

$$* n''_{9,14} = 2 \text{ e } n''_{17,19} = 1$$

2. Sistema sul brasileiro sem reprogramação da geração:

$$* v = 146,242,000 \text{ US\$}$$

$$* n_{20,21} = 1, n_{42,43} = 2, n_{46,6} = 1, n_{19,25} = 1, n_{31,32} = 1, n_{28,30} = 1, n_{26,29} = 3, n_{24,25} = 2, n_{29,30} = 2 \text{ e } n_{5,6} = 1$$

$$* \quad n''_{1,7} = 1, n''_{5,8} = 1, n''_{14,18} = 2, n''_{14,26} = 1, n''_{14,22} = 1, n''_{20,23} = 1, n''_{23,24} = 1, n''_{33,34} = 1, n''_{37,39} = 1 \text{ e } n''_{40,42} = 1$$

Ao aplicar a mesma metodologia para o sistema Sul Brasileiro de 46 barras para um cenário sem reprogramação notamos que ao utilizar a modelagem tradicional (modelo linear disjuntivo) o investimento inicial é de 72,870,000 US\$ mantendo a topologia base inalterada, porém quando é utilizado a modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão o valor de investimento cai para 63,163,00 US\$, representando assim uma economia de 9,707,000 US\$ lembrando que as linhas $n''_{9,14} = 2$ e $n''_{17,19} = 1$ são temporariamente desligadas da topologia base.

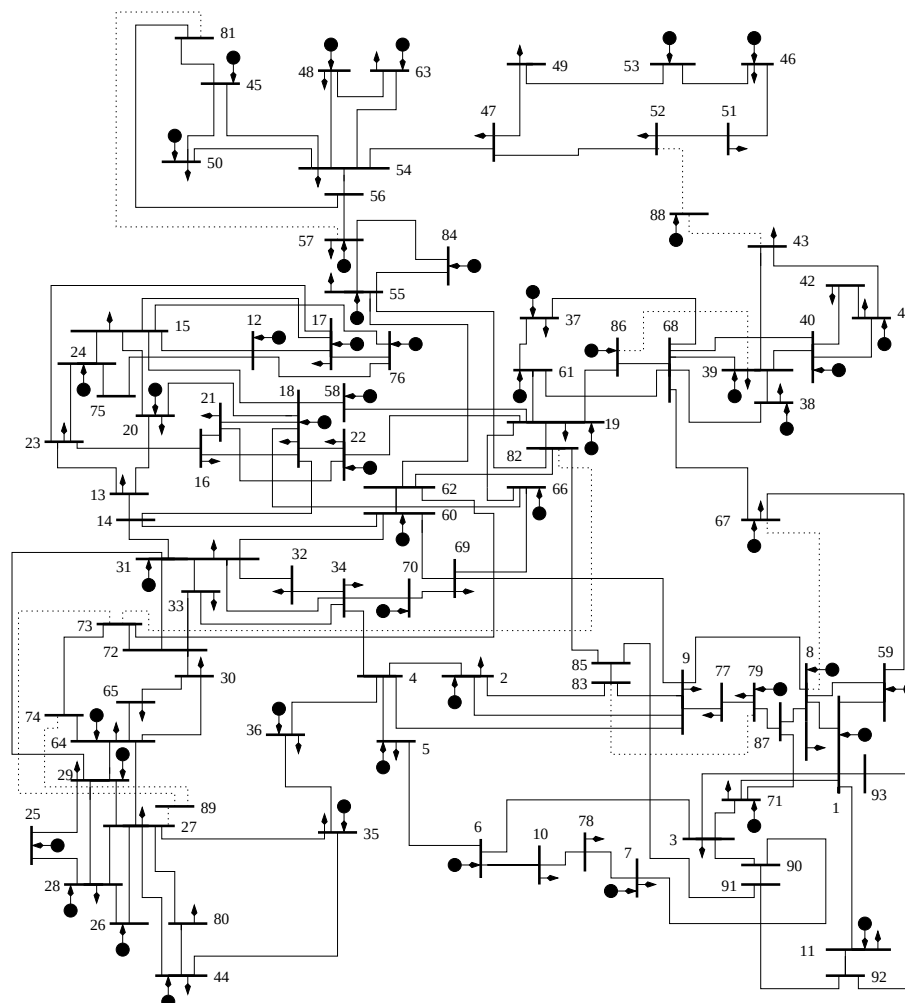
O mesmo desempenho é observado para o sistema Sul Brasileiro de 46 barras aplicadas para um cenário com reprogramação. Na utilização da modelagem tradicional, temos um investimento inicial de 154,420,000 US\$ mantendo a topologia base com todas as linhas já existentes. Encontramos um valor de investimento de 146,242,000 US\$ quando utilizamos a modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, permitindo o desligamento temporário das linhas $n''_{1,7} = 1, n''_{5,8} = 1, n''_{14,18} = 2, n''_{14,26} = 1, n''_{14,22} = 1, n''_{20,23} = 1, n''_{23,24} = 1, n''_{33,34} = 1, n''_{37,39} = 1$ e $n''_{40,42} = 1$ e representando uma economia de 8,178,000 US\$.

5.4 SISTEMA COLOMBIANO

O sistema colombiano é considerado um sistema de grande porte apresentando 93 barras e 155 ramos, com demanda total de 14.559 MW e capacidade de geração programada de 14.559 MW como vemos na figura 9.

O sistema colombiano testado não contempla a reprogramação da geração utilizado nos outros testes para novo modelo e suas técnicas de otimização do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão (PEST).

Figura 9 - Diagrama do sistema colombiano de 93 barras.



Fonte: Elaboração do próprio autor

5.4.1 PLANEJAMENTO SEM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA COLOMBIANO

Os resultados encontrados para a modelagem tradicional em testes realizado no sistema colombiano de 93 barras com um único plano de geração.

1. Sistema de 93 barras colombiano:

$$* v = 562,417 \text{ US\$}$$

$$* n_{15,18} = 1, n_{19,82} = 2, n_{27,29} = 1, n_{27,64} = 1, n_{30,65} = 1, n_{30,72} = 1, n_{43,88} = 2, n_{50,54} = 1, \\ n_{54,56} = 1, n_{55,62} = 1, n_{55,57} = 1, n_{55,84} = 1, n_{56,57} = 1, n_{62,73} = 1, n_{68,86} = 1, n_{72,73} = 1, \\ e n_{82,85} = 1$$

5.4.2 PLANEJAMENTO COM A POSSIBILIDADE DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA COLOMBIANO

Os resultados encontrados para a nova modelagem com a possibilidade de desligamento de linhas de transmissão em testes realizado no sistema colombiano de 93 barras com um único plano de geração, com um 'gap' encontrado é 0.07% na utilização da linguagem de modelagem para a programação matemática (AMPL) (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) em comunicação com o solver comercial CPLEX (ILOG, 2008) responsável por solucionar o problema.

1. Sistema de 93 barras colombiano:

* 474,962 US\$

* $n_{19,82} = 2, n_{27,29} = 1, n_{30,65} = 2, n_{30,72} = 1, n_{43,88} = 2, n_{50,54} = 1, n_{54,56} = 1, n_{55,57} = 1, n_{55,62} = 1, n_{55,84} = 1, n_{56,57} = 1, n_{68,86} = 1$ e $n_{82,85} = 1$

* $n''_{1,8} = 1, n''_{1,11} = 1, n''_{2,4} = 1, n''_{3,6} = 1, n''_{3,90} = 1, n''_{5,6} = 1, n''_{6,10} = 1, n''_{8,9} = 1, n''_{8,59} = 1, n''_{9,77} = 1, n''_{13,14} = 1, n''_{13,23} = 1, n''_{15,17} = 1, n''_{17,23} = 1, n''_{23,24} = 1, n''_{25,29} = 1, n''_{27,28} = 1, n''_{27,35} = 1, n''_{30,64} = 1, n''_{31,32} = 1, n''_{31,72} = 2, n''_{33,72} = 1, n''_{37,68} = 1, n''_{39,43} = 1, n''_{39,68} = 1, n''_{40,41} = 1, n''_{40,68} = 1, n''_{46,53} = 1, n''_{47,49} = 2, n''_{47,54} = 1, n''_{48,54} = 2, n''_{49,53} = 1, e n''_{64,74} = 1$

gap=0.07

Aqui se encontra o valor de 562,417 milhões de dólares utilizando a modelagem tradicional que não permite desligar linhas da topologia base e 474,962 milhões de dólares ao utilizar a modelagem generalizada do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão onde desligamos temporariamente as linhas $n''_{1,8} = 1, n''_{1,11} = 1, n''_{2,4} = 1, n''_{3,6} = 1, n''_{3,90} = 1, n''_{5,6} = 1, n''_{6,10} = 1, n''_{8,9} = 1, n''_{8,59} = 1, n''_{9,77} = 1, n''_{13,14} = 1, n''_{13,23} = 1, n''_{15,17} = 1, n''_{17,23} = 1, n''_{23,24} = 1, n''_{25,29} = 1, n''_{27,28} = 1, n''_{27,35} = 1, n''_{30,64} = 1, n''_{31,32} = 1, n''_{31,72} = 2, n''_{33,72} = 1, n''_{37,68} = 1, n''_{39,43} = 1, n''_{39,68} = 1, n''_{40,41} = 1, n''_{40,68} = 1, n''_{46,53} = 1, n''_{47,49} = 2, n''_{47,54} = 1, n''_{48,54} = 2, n''_{49,53} = 1, e n''_{64,74} = 1$ representando uma economia de 87,455 milhões de dólares.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma nova modelagem matemática para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Este modelo tem por papel principal a mudança de paradigmas das modelagens tradicionais, onde se acreditava que as linhas da topologia base sempre contribuíam para uma melhor rede futura. Desta forma estas linhas não eram testadas para saber as reais condições de funcionamento e estabilidade do sistema.

O modelo permite uma real economia nos custos de investimento ao adotar esta nova estratégia de desligamento de linhas da topologia base, mesmo sabendo que a configuração presente também foi fruto de um processo de otimização.

Mas seguindo este novo conceito acredita-se que algumas linhas podem estar atrapalhando uma melhor operação futura da rede elétrica, assim os investimento só serão aplicados nas novas linhas que possam ser adicionadas ao sistema. O desligamento de linhas para esta proposta de resolução não é definitiva e poderá ser ativada em uma nova configuração futura de expansão da rede elétrica.

O modelo identifica se há na topologia base existente um conjunto de linhas que possam ser deligados da topologia base futura tendo como referência testes realizados em processos de otimização. Os testes foram aplicados para três sistemas elétricos que confirmaram uma melhor solução para a rede futura considerando o desligamento de linhas de transmissão, desde que se identificado que estas linhas estão prejudicando a operação futura de um sistema elétrico.

Inicialmente os testes foram realizados para o sistema IEEE de 24 barras, sistema sul brasileiro de 46 barras e o sistema colombiano de 93 barras confirmam a existência de contribuição do novo modelo matemático utilizado no problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão (PEST) ao identificar quais linhas podem estar dificultando uma solução ótima para a rede elétrica.

Os elementos de transmissão que são temporariamente desligados da operação, não devem ser desligados permanentemente e devem permanecer disponíveis para serem incorporados caso o sistema precise delas, já que com o desligamento de elementos pode-se diminuir a confiabilidade do sistema elétrico.

O sistema IEEE de 24 barras considerado de pequeno porte, apresentou uma economia satisfatória de: 1,000,000US\$ para o plano P_1 com reprogramação da geração; 65,000,000US\$, para o plano P_2 sem reprogramação da geração; 42,000,000US\$, para o plano P_3 sem reprogramação da geração; 36,000,000US\$ para o plano P_4 sem reprogramação da geração e

55,000,000US\$ para o plano P_5 sem reprogramação da geração.

O sistema sul brasileiro de 46 barras considerado de médio porte, apresentou uma economia de 9,707,000US\$ com reprogramação da geração e 8,178,000US\$ sem reprogramação da geração.

O sistema de grande porte colombiano apresentou uma economia de 87,455US\$ para o cenário pesquisado.

REFERÊNCIAS

- AIRES, J. C. O.; PINTO, L. M. V. G.; FILHO, R. N. F. Critérios e modelos de planejamento considerando incertezas. In: ENCONTRO REGIONAL LATINO-AMERICANO DA CIGRÉ, 6., 1994, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: [s.n], 1994. v. 6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADÉE. *Visão geral do setor*. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 20 jan 2014.
- B EGLARI, F.; LAUGHTON, M. A. The combined cost method for optimal economic planning of an electrical power system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Londres, v. 94, n. 6, p. 1935–1942, 1975.
- BENNON, R. J.; JUVES, J. A.; MELIOPOULOS, A. P. Use of sensitivity analysis in automated transmission planning. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Pittsburgh, v. 101, n. 1, p. 53–59, 1982.
- BINATO, S. *Expansão ótima de sistemas de transmissão através de decomposição de benders e técnicas de planos cortantes*. 2000. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- BINATO, S.; OLIVEIRA, G.; ARAUJO, J. A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Pittsburgh, v. 16, n. 2, p. 247–253, 2001.
- BINATO, S.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S. A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Pittsburgh, v. 16, n. 2, p. 235–240, 2001.
- BRAGA, A. S. D.; SARAIVA, J. T. A multiyear dynamic approach for transmission expansion planning and long-term marginal costs computation. *IEEE Transaction Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 1631–1639, 2005.
- CHOI, J.; EL-KEIB, A. A.; TRANS, T. A fuzzy branch and bound based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker. *IEEE Transactions on Power Systems*, Chinju, v. 20, n. 1, p. 476–484, 2005.
- CHOI, J.; TRAN, T.; EL-KEIB, A.; THOMAS, R.; OH, H.; BILLINGTON, R. A method for transmission system expansion planning considering probabilistic reliability criteria. *IEEE Transaction Power Systems*, Pittsburgh, v. 20, n. 3, p. 1606–1615, 2005.

CIGRE, W. 37.10 methods for planning under uncertainty - towards flexibility in power system development. *Electra*, New York, v. 161, p. 143–164, 1995.

COLIN, E. C. *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CORTEZ-CARMONA, M.; PALMA-BEHNKE, R.; MOYA, O. Intelligent system applications to power systems. In: IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, 15., 2009, Curitiba. . Pittsburgh: IEEE, 2009. v. 15, p. 1–7.

FANG, R.; HILL, D. A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, Sydney, v. 18, n. 1, p. 374–380, 2003.

FARIA, H.; BINATO, S.; RESENDE, M. G. C.; FALCÃO, D. M. Power transmission network design by greedy randomized adaptive path relinking. *IEEE Transactions on Power Systems*, Juiz de Fora, v. 20, n. 1, p. 43–49, 2005.

FOLEY, M.; BORE, A.; MITCHELL, W.; FAUSTINI, A. An object based graphical user interface for power system. *IEEE Transactions on PAS*, Tempe, v. 8, n. 1, p. 97–104, 1993.

FOLEY, M.; BOSE, A. Object-oriented on-line network analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, Paradise Valley, v. 10, n. 1, p. 125–132, 1995.

FONSECA, L. G.; LÚCIO, J. C. M. Planejamento da expansão da geração considerando redes de transmissão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 8., 1990, Belém. *Anais...* Belém: UFPA, 1990. v. 8.

FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. *AMPL : a modeling language for mathematical programming*. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2003. Disponível em: <<http://www.ampl.com>>. Acesso em: 10 abr. 2011.

GALLEGO, L. A.; RIDER, M. J.; ROMERO, R.; GARCIA, A. V. A specialized genetic algorithm to solve the short term transmission network expansion planning. *IEEE Bucharest Powertech*, Bucharest, v. 7, p. 1–7, 2009.

GALLEGO, R. A.; ALVES, A. B.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R. Parallel simulated annealing applied to long term transmission expansion planning. *IEEE Transaction on Power Systems*, Pittsburgh, v. 12, n. 1, p. 181–187, 1997.

GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A.; ROMERO, R. Comparative studies of non-convex optimization methods for transmission network expansion planning. *IEEE Transactions on Power Sys-tems*, Pittsburgh, v. 13, n. 3, p. 822–828, 1998.

GARCÉS NEGRETE, L. P. *Planejamento da expansão de sistemas de transmissão considerando análise de confiabilidade e incertezas na demanda futura*. Ilha Solteira: UNESP/FE, 2012.

GARVER, L. L. Transmission linear programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Rio de Janeiro, v. PAS-29, n. 9, p. 168–197, 1970.

GARVER, L. L. Transmission network estimation using linear programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, São Paulo, v. PAS-89, n. 7, p. 1688–1697,

1970.

GLOVER, F. Tabu search-parte i. *ORSA Journal of Computing*, Catonsville, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989. Disponível em: <http://www.cs.amherst.edu/~cm/cs34/papers/sel_glover_a.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2013.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. *Handbook of metaheuristics*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2003.

GONZAGA, C. C. *Estudos de algoritmos de busca em grafos e sua aplicação a problemas de planejamento*. 1973. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia) — Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1973.

GORENSTIN, B. G.; CAMPODONICO, N. M.; COSTA, J. P.; PEREIRA, M. V. F. Power system expansion planning under uncertainty. *IEEE trans. on Power System*, New York, v. 8, n. 1, p. 129–136, 1993.

HAFFNER, S.; MONTICELLI, A.; GARCIA, A.; ROMERO, R. Specialized branch and bound algorithm for transmission network expansion planning. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Porto Alegre, v. 148, n. 5, p. 482–488, 2001.

HSU, Y.; Pei-Hwa, H.; LIN, C.; HUANG, C. Oscillatory stability considerations in transmission expansion planning. *IEEE Power & Energy society*, New York, IEEE, v. 4, n. 3, p. 1110–1114, 1889.

ILOG. *CPLEX optimization subroutine library guide and reference, version 11.0*. Washington: Incline Village, 2008. Disponível em: <<http://www.ilog.com/products/cplex/>>. Acesso em: 14 dez. 2012.

LAPSEE. *Transmission expansion planning test systems*. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

LEE, S. T. Y.; HICKS, K. L.; HNYLICZA, E. Transmission expansion by branch - and - bound integer programming with optimal cost-capacity. *IEEE PES winter Meeting*, New York, v. Pas-93, n. 5, p. 1390–1400, 1974.

LEMAITRE, C.; PAULO, J. P.; BOUQUET, C. An object-oriented approach for the implementation of an open platform for designing and planning a transmission network. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 12., 1996, Santa Catarina.: Anais... Dresden: UFSC, 1996. p. 173–182.

LEVI, V.; CALOVIC, M. S. A new decomposition based method for optimal expansion planning of large transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 6, n. 3, p. 937–943, 1991.

MANTOVANI, M. A. *Desenvolvimento de algoritmos evolutivos para o problema do planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão*. 2004. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2004.

- MANZONI, G.; PARIS, L.; VALTORTA, M. Power system planning practice in Italy. *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, New York, v. 98, n. 3, p. 689–699, 1979.
- MARTINS, W. A. *Busca em vizinhança aplicado na solução do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica*. Ilha Solteira: UNESP, 2009.
- MASSE, P.; GILBRAT, R. Application of linear programming to investments in the electric power industry. *managements sciences. Informs*, Paris, v. 3, n. 2, p. 149–166, 1957.
- MONTICELLI, A.; SANTOS JUNIOR, A.; PEREIRA, M. V. F.; CUNHA, S. H. F.; PARKER, B. J.; PRAÇA, J. C. G. Interactive transmission network planning using a least-effort criterion. *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, New York, v. 101, n. 10, p. 3919–3925, 1982.
- MOROZOWSKI FILHO, M. *Planejamento integrado de sistemas multiárea com restrições de energia e de confiabilidade: uma abordagem via programação estocástica*. 1995. 197f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 1995.
- OLIVEIRA, G. C.; COSTA, A. P.; BINATO, S. Large scale transmission network planning using optimization and heuristic techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 10, n. 4, p. 1828–1834, 1995.
- OLIVEIRA, R. T. *Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores enfocado mediante una técnica global heurística*. 2002. Guadalajara: [s.n.], 2005. Disponível em: <<http://www.gdl.cinvestav.mx/jramirez>>. Acesso em: 11 jul. 2005.
- OLIVEIRA, S. A.; ROMERO, R.; GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. Algoritmo genético paralelo aplicado ao planejamento da expansão da transmissão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 13., 2000, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: [s.n.], 2000. v. 13, p. 1790–1795.
- PEARL, J. *Heuristics-intelligent search strategies for computer problem solving*. Boston: Reading, Addison-Wesley, 1984.
- PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G. Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, New York, v. 104, n. 2, p. 381–389, 1985.
- PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G.; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, G. C. A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, v. 104, n. 11, p. 3074–3083, 1985.
- PEREZ-ARRIGA, I. J.; VERGHESE, G. C.; SCHWEPPE, F. C. Selective modal analysis with applications to electric power systems, part i: heuristic introduction. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Boston, v. 101, n. 9, p. 3117–3125, 1982.
- RAHMANI, M.; RASHIDINEJAD, M.; CARRENO, E.; ROMERO, R. Evolutionary multi-move path-relinking for transmission network expansion planning. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 6., 2010, Minneapolis. *Anais...* Minneapolis: IEEE, 2010. v. 6, p. 1–6.

- REEVES, M. *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- RIDER, M. J.; GALLEGO, L. A.; ROMERO, R.; GARCIA, A. V. Heuristic algorithm to solve the short term transmission network expansion planning. *IEEE Power Engineering society General Meeting*, Denver, v. 7, p. 1–7, 2007.
- RIDER, M. J.; GARCÍA, A. V.; ROMERO, R. A constructive heuristic algorithm to short term transmission network expansion planning. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2., Denver, 2004. *Anais...* Denver: IEEE, 2004. p. 2107–2113.
- RIDER, M. J.; GARCÍA, A. V.; ROMERO, R. Power system transmission network expansion planning using ac model. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Stevenage, v. 1, n. 5, p. 731–742, 2007.
- ROCHA, C. R. M. *Desenvolvimento de técnicas heurísticas e de otimização clássica para o problema de planejamento da expansão a longo prazo de sistema de transmissão*. [S.l.: s.n], 2004.
- RODRIGUEZ, J. I. R.; FALCAO, D. M.; TARANTO, G. N.; ALMEIDA, H. L. S. Short-term transmission expansion planning by a combined genetic algorithm and hill-climbing technique. In: IEEE. INTELLIGENT SYSTEM APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS-ISAP, 9; INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 9., 2009, Curitiba. *Anais...* Curitiba: [S.l.], 2009. v. 15, p. 1–6.
- ROMERO, R. *Um método de decomposição para o planejamento a longo prazo de sistemas de transmissão*. 1993. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- ROMERO, R.; GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. Transmission system expansion planning by simulated annealing. *IEEE trans. on Power Systems*, New York, v. 11, n. 1, p. 364–369, 1996.
- ROMERO, R.; GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm. *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, New York, v. 145, n. 3, p. 329–335, 1998.
- ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Introdução a metaheurísticas. In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA E CONTROLE - SBMAC, 3., 2004, Ilha Solteira. *Anais...* Ilha Solteira: UNESP, 2004. v. 3, p. 21–29.
- ROMERO, R.; MONTICELLI, A. A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 1, p. 373–380, 1994.
- ROMERO, R.; MONTICELLI, A.; GARCIA, A.; HAFFNER, S. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, New York, v. 149, n. 1, p. 27–36, 2002.
- ROMERO, R.; ROCHA, C.; MANTOVANI, J. R. S.; SÁNCHEZ, I. G. Constructive heuristic algorithm for the dc model in network transmission expansion planning. *IEE Proceedings*

Generation, Transmission and Distribution, Stevenage, v. 152, n. 2, p. 277–282, 2005.

ROMERO, R. A. *Planejamento a longo prazo da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica*. 1999. 138f. Tese (Livre Docência em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1999.

RUDNIK, H.; PALMA, R.; CURA, E.; SILVA, C. Economically adapted transmission systems in open access schemes-application of genetic algorithms. *IEEE Transaction on Power System*, Piscataway, v. 11, n. 3, p. 1427–1440, 1995.

SANTOS JUNIOR, A.; FRANCA, P. M.; SAID, A. An optimization model for long-range transmission expansion planning. *Power systems, IEEE Transactions on*, IEEE, New York, v. 4, n. 1, p. 94–101, 1989.

SARAIVA, J. P.; MIRANDA, V.; PINTO, L. M. V. G. Planejamento da expansão sob incertezas - abordagem imprecisa x probabilística. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-SNPTEE, 13., 1995, Camboriu. *Anais...* Camboriu: SNPTEE, 1995. v. 13, p. 54–61.

SEIFU, A.; SALON, S.; LIST, G. Optimization of transmission line planning including security constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 1507–1513, 1989.

SILVA, E.; ORTIZ, J.; OLIVEIRA, G.; BINATO, S. Transmission network expansion planning under a tabu search approach. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, New York, v. 16, n. 1, p. 62–68, 2001.

SILVA, E. F. *Planejamento estocástico da expansão da rede de transmissão de energia elétrica multiestágio considerando restrições de segurança*. 2013. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia -FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

SILVA, E. L.; GIL, H. A.; AREIZA, J. M. Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm. power industry computer applications. *IEEE Transactions on Power Systems*, [S.l.], v. 15, n. 4, p. 1168–1175, 2000.

SILVA, I.; CARNEIRO, S. J.; OLIVEIRA, E. D.; COSTA, J. S.; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A heuristic constructive algorithm for capacitor placement on distribution system. *IEEE Transaction on Power Systems*, [S.l.], v. 23, n. 4, p. 1619–1626, 2008.

SILVA, I.; RIDER, M.; ROMERO, R.; GARCIA, A.; MURARI, C. A. Transmission network expansion planning with security constraints. In: IET GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, 152., 2005, London. *Proceeding...* London: IEE, 2005. v. 152, n. 6, p. 828–836.

SILVA, I.; RIDER, M.; ROMERO, R.; GARCIA, A.; MURARI, C. A. Transmission network expansion planning considering uncertainty in demand. *IEEE Transsaction Power Systems*, New York, v. 21, n. 4, p. 1565–1573, 2006.

SOCORRO, R. *Introdução à construção de modelos de otimização linear e inteira*. São Carlos: SBMAC, 2005, p. 825.

TAGLIALENHA, S. L. S. *Novas aplicações de metaheurísticas na solução do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia*. 2008. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2008.

TAUBE, M. *Matemática para produtividade*. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/modelagem/mod12.htm>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

VEGA, M.; SARMIENTO, H. Image processing application maps optimal transmission routes. *Computer Applications in Power IEEE*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 47–51, 1996.

VERLY, W.; OLIVEIRA, E. J. Planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2009, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: UFJF, 2009.

VILLASANA, R.; GARVER, L. L.; SALON, S. J. Transmission network planning using linear programming. *IEEE Transaction Power Apparatus and Systems*, New York, n. PAS - 104, n. 2, p. 349–356, 1985.

WILLIAMS, H. P. *Model bulding in mathematical programming*. New York: John Wiley & Sons, 1999.

ZULUAGA, A. H. E. *Análise crítica de aspectos de modelagem matemática no planejamento da expansão a longo prazo de sistemas de transmissão*. 2008. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2008.

APÊNDICE A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES UTILIZADOS

A.1 *Sistema IEEE de 24 barras*

Tabela 1 - Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário A.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	576	324
2	576	291
3	0	540
4	0	222
5	0	213
6	0	408
7	900	375
8	0	513
9	0	525
10	0	585
11	0	0
12	0	0
13	1773	795
14	0	582
15	645	951
16	465	300
17	0	0
18	1200	999
19	0	543
20	0	384

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
21	1200	0
22	900	0
23	1980	0
24	0	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 2 - Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário A.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	2	175	0.0139	3000.0	1	5
1	3	175	0.212	55000.0	1	5
1	5	175	0.0845	22000.0	1	5
2	4	175	0.1267	33000.0	1	5
2	6	175	0.1920	50000.0	1	5
3	9	175	0.1190	31000.0	1	5
3	24	400	0.0839	50000.0	1	5
4	9	175	0.1037	27000.0	1	5
5	10	175	0.0883	23000.0	1	5
6	10	175	0.0605	16000.0	1	5
7	8	175	0.0614	16000.0	1	5
8	9	175	0.1651	43000.0	1	5
8	10	175	0.1651	43000.0	1	5
9	11	400	0.0839	50000.0	1	5
9	12	400	0.0839	50000.0	1	5
10	11	400	0.0839	50000.0	1	5
10	12	400	0.0839	50000.0	1	5
11	13	500	0.0476	66000.0	1	5
11	14	500	0.0418	58000.0	1	5
12	13	500	0.0476	66000.0	1	5
12	23	500	0.0966	134000.0	1	5
13	23	500	0.0865	120000.0	1	5
14	16	500	0.0389	54000.0	1	5
15	16	500	0.0173	24000.0	1	5
15	21	500	0.0490	68000.0	2	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
15	24	500	0.0519	72000.0	1	5
16	17	500	0.0259	36000.0	1	5
16	19	500	0.0231	32000.0	1	5
17	18	500	0.0144	20000.0	1	5
17	22	500	0.1053	146000.0	1	5
18	21	500	0.0259	36000.0	2	5
19	20	500	0.0396	55000.0	2	5
20	23	500	0.0216	30000.0	2	5
21	22	500	0.0678	94000.0	1	5
1	8	500	0.1344	35000.0	0	5
2	8	500	0.1267	33000.0	0	5
6	7	500	0.1920	50000.0	0	5
13	14	500	0.0447	62000.0	0	5
14	23	500	0.0620	86000.0	0	5
16	23	500	0.0822	114000.0	0	5
19	23	500	0.0606	84000.0	0	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 3 - Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário B.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	576	324
2	576	291
3	0	540
4	0	222
5	0	213
6	0	408
7	900	375
8	0	513
9	0	525
10	0	585
11	0	0
12	0	0
13	1773	795

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
14	0	582
15	645	951
16	465	300
17	0	0
18	1200	999
19	0	543
20	0	384
21	1200	0
22	900	0
23	315.1	0
24	0	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 4 - Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário B.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	2	175	0.0139	3000.0	1	5
1	3	175	0.2112	55000.0	1	5
1	5	175	0.0845	22000.0	1	5
2	4	175	0.1267	33000.0	1	5
2	6	175	0.1920	50000.0	1	5
3	9	175	0.1190	31000.0	1	5
3	24	400	0.0839	50000.0	1	5
4	9	175	0.1037	27000.0	1	5
5	10	175	0.0883	23000.0	1	5
6	10	175	0.0605	16000.0	1	5
7	8	175	0.0614	16000.0	1	5
8	9	175	0.1651	43000.0	1	5
8	10	175	0.1651	43000.0	1	5
9	11	400	0.0839	50000.0	1	5
9	12	400	0.0839	50000.0	1	5
10	11	400	0.0839	50000.0	1	5
10	12	400	0.0839	50000.0	1	5
11	13	500	0.0476	66000.0	1	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
11	14	500	0.0418	58000.0	1	5
12	13	500	0.0476	66000.0	1	5
12	23	500	0.0966	134000.0	1	5
13	23	500	0.0865	120000.0	1	5
14	16	500	0.0389	54000.0	1	5
15	16	500	0.0173	24000.0	1	5
15	21	500	0.0490	68000.0	2	5
15	24	500	0.0519	72000.0	1	5
16	17	500	0.0259	36000.0	1	5
16	19	500	0.0231	32000.0	1	5
17	18	500	0.0144	20000.0	1	5
17	22	500	0.1053	146000.0	1	5
18	21	500	0.0259	36000.0	2	5
19	20	500	0.0396	55000.0	2	5
20	23	500	0.0216	30000.0	2	5
21	22	500	0.0678	94000.0	1	5
1	8	500	0.1344	35000.0	0	5
2	8	500	0.1267	33000.0	0	5
6	7	500	0.1920	50000.0	0	5
13	14	500	0.0447	62000.0	0	5
14	23	500	0.0620	86000.0	0	5
16	23	500	0.0822	114000.0	0	5
19	23	500	0.0606	84000.0	0	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 5 - Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário C.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	465	324
2	576	291
3	0	540
4	0	222
5	0	213
6	0	408

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
7	722	375
8	0	513
9	0	525
10	0	585
11	0	0
12	0	0
13	1424	795
14	0	582
15	645	951
16	465	300
17	0	0
18	1200	999
19	0	543
20	0	384
21	1200	0
22	900	0
23	315.1	0
24	0	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 6 - Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário C.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	2	175	0.0139	3000.0	1	5
1	3	175	0.2112	55000.0	1	5
1	5	175	0.0845	22000.0	1	5
2	4	175	0.1267	33000.0	1	5
2	6	175	0.1920	50000.0	1	5
3	9	175	0.1190	31000.0	1	5
3	24	400	0.0839	50000.0	1	5
4	9	175	0.1037	27000.0	1	5
5	10	175	0.0883	23000.0	1	5
6	10	175	0.0605	16000.0	1	5
7	8	175	0.0614	16000.0	1	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
8	9	175	0.1651	43000.0	1	5
8	10	175	0.1651	43000.0	1	5
9	11	400	0.0839	50000.0	1	5
9	12	400	0.0839	50000.0	1	5
10	11	400	0.0839	50000.0	1	5
10	12	400	0.0839	50000.0	1	5
11	13	500	0.0476	66000.0	1	5
11	14	500	0.0418	58000.0	1	5
12	13	500	0.0476	66000.0	1	5
12	23	500	0.0966	134000.0	1	5
13	23	500	0.0865	120000.0	1	5
14	16	500	0.0389	54000.0	1	5
15	16	500	0.0173	24000.0	1	5
15	21	500	0.0490	68000.0	2	5
15	24	500	0.0519	72000.0	1	5
16	17	500	0.0259	36000.0	1	5
16	19	500	0.0231	32000.0	1	5
17	18	500	0.0144	20000.0	1	5
17	22	500	0.1053	146000.0	1	5
18	21	500	0.0259	36000.0	2	5
19	20	500	0.0396	55000.0	2	5
20	23	500	0.0216	30000.0	2	5
21	22	500	0.0678	94000.0	1	5
1	8	500	0.1344	35000.0	0	5
2	8	500	0.1267	33000.0	0	5
6	7	500	0.1920	50000.0	0	5
13	14	500	0.0447	62000.0	0	5
14	23	500	0.0620	86000.0	0	5
16	23	500	0.0822	114000.0	0	5
19	23	500	0.0606	84000.0	0	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 7 - Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário D.

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	576	324
2	576	291
3	0	540
4	0	222
5	0	213
6	0	408
7	900	375
8	0	513
9	0	525
10	0	585
11	0	0
12	0	0
13	1457	795
14	0	582
15	325	951
16	282	300
17	0	0
18	603	999
19	0	543
20	0	384
21	951	0
22	900	0
23	1980	0
24	0	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 8 - Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário D.

(continua)						
Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	2	175	0.0139	3000.0	1	5
1	3	175	0.2112	55000.0	1	5
1	5	175	0.0845	22000.0	1	5
2	4	175	0.1267	33000.0	1	5

(continuação)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
2	6	175	0.1920	50000.0	1	5
3	9	175	0.1190	31000.0	1	5
3	24	400	0.0839	50000.0	1	5
4	9	175	0.1037	27000.0	1	5
5	10	175	0.0883	23000.0	1	5
6	10	175	0.0605	16000.0	1	5
7	8	175	0.0614	16000.0	1	5
8	9	175	0.1651	43000.0	1	5
8	10	175	0.1651	43000.0	1	5
9	11	400	0.0839	50000.0	1	5
9	12	400	0.0839	50000.0	1	5
10	11	400	0.0839	50000.0	1	5
10	12	400	0.0839	50000.0	1	5
11	13	500	0.0476	66000.0	1	5
11	14	500	0.0418	58000.0	1	5
12	13	500	0.0476	66000.0	1	5
12	23	500	0.0966	134000.0	1	5
13	23	500	0.0865	120000.0	1	5
14	16	500	0.0389	54000.0	1	5
15	16	500	0.0173	24000.0	1	5
15	21	500	0.0490	68000.0	2	5
15	24	500	0.0519	72000.0	1	5
16	17	500	0.0259	36000.0	1	5
16	19	500	0.0231	32000.0	1	5
17	18	500	0.0144	20000.0	1	5
17	22	500	0.1053	146000.0	1	5
18	21	500	0.0259	36000.0	2	5
19	20	500	0.0396	55000.0	2	5
20	23	500	0.0216	30000.0	2	5
21	22	500	0.0678	94000.0	1	5
1	8	500	0.1344	35000.0	0	5
2	8	500	0.1267	33000.0	0	5
6	7	500	0.1920	50000.0	0	5
13	14	500	0.0447	62000.0	0	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
14	23	500	0.0620	86000.0	0	5
16	23	500	0.0822	114000.0	0	5
19	23	500	0.0606	84000.0	0	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 9 - Dados de barras: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário E.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	520	324
2	520	291
3	0	540
4	0	222
5	0	213
6	0	408
7	812	375
8	0	513
9	0	525
10	0	585
11	0	0
12	0	0
13	1599	795
14	0	582
15	581	951
16	419	300
17	0	0
18	718	999
19	0	543
20	0	384
21	1077	0

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
22	900	0
23	1404.1	0
24	0	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 10 - Dados de ramos: Sistema IEEE de 24 barras: Cenário E.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	2	175	0.0139	3000.0	1	5
1	3	175	0.2112	55000.0	1	5
1	5	175	0.0845	22000.0	1	5
2	4	175	0.1267	33000.0	1	5
2	6	175	0.1920	50000.0	1	5
3	9	175	0.1190	31000.0	1	5
3	24	400	0.0839	50000.0	1	5
4	9	175	0.1037	27000.0	1	5
5	10	175	0.0883	23000.0	1	5
6	10	175	0.0605	16000.0	1	5
7	8	175	0.0614	16000.0	1	5
8	9	175	0.1651	43000.0	1	5
8	10	175	0.1651	43000.0	1	5
9	11	400	0.0839	50000.0	1	5
9	12	400	0.0839	50000.0	1	5
10	11	400	0.0839	50000.0	1	5
10	12	400	0.0839	50000.0	1	5
11	13	500	0.0476	66000.0	1	5
11	14	500	0.0418	58000.0	1	5
12	13	500	0.0476	66000.0	1	5
12	23	500	0.0966	134000.0	1	5
13	23	500	0.0865	120000.0	1	5
14	16	500	0.0389	54000.0	1	5
15	16	500	0.0173	24000.0	1	5
15	21	500	0.0490	68000.0	2	5
15	24	500	0.0519	72000.0	1	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
16	17	500	0.0259	36000.0	1	5
16	19	500	0.0231	32000.0	1	5
17	18	500	0.0144	20000.0	1	5
17	22	500	0.1053	146000.0	1	5
18	21	500	0.0259	36000.0	2	5
19	20	500	0.0396	55000.0	2	5
20	23	500	0.0216	30000.0	2	5
21	22	500	0.0678	94000.0	1	5
1	8	500	0.1344	35000.0	0	5
2	8	500	0.1267	33000.0	0	5
6	7	500	0.1920	50000.0	0	5
13	14	500	0.0447	62000.0	0	5
14	23	500	0.0620	86000.0	0	5
16	23	500	0.0822	114000.0	0	5
19	23	500	0.0606	84000.0	0	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

A.2 Sistema Sul Brasileiro de 46 barras

Tabela 11 - Dados de barras: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário A.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	0	0
2	0	443.1
3	0	0
4	0	300.7
5	0	238
6	0	0
7	0	0
8	0	72.2
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	511.9
13	0	185.8
14	1257	0
15	0	0
16	2000	0
17	1050	0
18	0	0
19	1670	0
20	0	1091.2
21	0	0
22	0	81.9
23	0	458.1
24	0	478.2
25	0	0
26	0	231.9
27	220	0
28	800	0
29	0	0
30	0	0
31	700	0
32	500	0

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
33	0	229.1
34	748	0
35	0	216
36	0	90.1
37	300	0
38	0	216
39	600	0
40	0	262.1
41	0	0
42	0	1607.9
43	0	0
44	0	79.1
45	0	86.7
46	700	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 12 - Dados de ramos: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário A.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	7	270	0.0616	4349	1	5
1	2	270	0.1065	7076	2	5
4	9	270	0.0924	6217	1	5
5	9	270	0.1173	7732	1	5
5	8	270	0.1132	7480	1	5
7	8	270	0.1023	6823	1	5
4	5	270	0.0566	4046	2	5
2	5	270	0.0324	2581	2	5
8	13	240	0.1348	8793	1	5
9	14	220	0.1756	11267	2	5
12	14	270	0.0740	5106	2	5
14	18	240	0.1514	9803	2	5
13	18	220	0.1805	11570	1	5
13	20	270	0.1073	7126	1	5
18	20	200	0.1997	12732	1	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
19	21	1500	0.0278	32632	1	5
16	17	2000	0.0078	10505	1	5
17	19	2000	0.0061	8715	1	5
14	26	220	0.1614	10409	1	5
14	22	270	0.0840	5712	1	5
22	26	270	0.0790	5409	1	5
20	23	270	0.0932	6268	2	5
23	24	270	0.0774	5308	2	5
26	27	270	0.0832	5662	2	5
24	34	220	0.1647	10611	1	5
24	33	240	0.1448	9399	1	5
33	34	270	0.1265	8288	1	5
27	36	270	0.0915	6167	1	5
27	38	200	0.2080	13237	2	5
36	37	270	0.1057	7025	1	5
34	35	270	0.0491	3591	2	5
35	38	200	0.1980	12631	1	5
37	39	270	0.0283	2329	1	5
37	40	270	0.1281	8389	1	5
37	42	200	0.2105	13388	1	5
39	42	200	0.2030	12934	3	5
40	42	270	0.0932	6268	1	5
38	42	270	0.0907	6116	3	5
32	43	1400	0.0309	35957	1	5
42	44	270	0.1206	7934	1	5
44	45	200	0.1864	11924	1	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 13 - Dados de barras: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário B.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	0	0
2	0	443.1
3	0	0

(continuação)		
Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
4	0	300.7
5	0	238
6	0	0
7	0	0
8	0	72.2
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	511.9
13	0	185.8
14	944	0
15	0	0
16	1366	0
17	1000	0
18	0	0
19	773	0
20	0	1091.2
21	0	0
22	0	81.9
23	0	458.1
24	0	478.2
25	0	0
26	0	231.9
27	54	0
28	730	0
29	0	0
30	0	0
31	310	0
32	450	0
33	0	229.1
34	221	0
35	0	216
36	0	90.1
37	212	0

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
38	0	216
39	221	0
40	0	262.1
41	0	0
42	0	1607.9
43	0	0
44	0	79.1
45	0	86.7
46	599	0

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 14 - Dados de ramos: Sistema Sul Brasileiro de 46 barras: Cenário B.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
1	7	270	0.0616	4349	1	5
1	2	270	0.1065	7076	2	5
4	9	270	0.0924	6217	1	5
5	9	270	0.1173	7732	1	5
5	8	270	0.1132	7480	1	5
7	8	270	0.1023	6823	1	5
4	5	270	0.0566	4046	2	5
2	5	270	0.0324	2581	2	5
8	13	240	0.1348	8793	1	5
9	14	220	0.1756	11267	2	5
12	14	270	0.0740	5106	2	5
14	18	240	0.1514	9803	2	5
13	18	220	0.1805	11570	1	5
13	20	270	0.1073	7126	1	5
18	20	200	0.1997	12732	1	5
19	21	1500	0.0278	32632	1	5
16	17	2000	0.0078	10505	1	5
17	19	2000	0.0061	8715	1	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
14	26	220	0.1614	10409	1	5
14	22	270	0.0840	5712	1	5
22	26	270	0.0790	5409	1	5
20	23	270	0.0932	6268	2	5
23	24	270	0.0774	5308	2	5
26	27	270	0.0832	5662	2	5
24	34	220	0.1647	10611	1	5
24	33	240	0.1448	9399	1	5
33	34	270	0.1265	8288	1	5
27	36	270	0.0915	6167	1	5
27	38	200	0.2080	13237	2	5
36	37	270	0.1057	7025	1	5
34	35	270	0.0491	3591	2	5
35	38	200	0.1980	12631	1	5
37	39	270	0.0283	2329	1	5
37	40	270	0.1281	8389	1	5
37	42	200	0.2105	13388	1	5
39	42	200	0.2030	12934	3	5
40	42	270	0.0932	6268	1	5
38	42	270	0.0907	6116	3	5
32	43	1400	0.0309	35957	1	5
42	44	270	0.1206	7934	1	5
44	45	200	0.1864	11924	1	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

A.3 Sistema Colombiano de 93 barras

Tabela 15 - Dados de barras: Sistema Colombianos de 93 barras.

(continua)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
1	240.1	0.00
2	165.0	486.66
3	0.0	587.08
4	0.0	0.00
5	40.0	351.42
6	34.0	0.00
7	136.0	448.03
8	230.0	505.87
9	0.0	519.69
10	0.0	88.84
11	108.0	220.15
12	47.0	0.00
13	0.0	260.08
14	0.0	0.00
15	0.0	562.84
16	0.0	351.90
17	35.0	203.00
18	540.0	54.10
19	1340.0	29.28
20	45.0	302.27
21	0.0	277.44
22	200.0	79.17
23	0.0	302.27
24	150.0	0.00
25	86.0	0.00
26	70.0	0.00
27	0.0	396.71
28	14.0	486.39
29	618.0	505.96
30	0.0	199.55
31	189.0	391.88
32	0.0	188.33

(continuação)		
Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
33	0.0	247.24
34	0.0	115.81
35	200.0	256.86
36	44.0	167.29
37	138.0	176.30
38	15.0	129.72
39	15.0	268.19
40	305.0	0.00
41	100.0	81.85
42	0.0	152.39
43	0.0	52.90
44	23.0	384.64
45	1208.0	0.00
46	150.0	181.62
47	0.0	61.60
48	885.0	896.26
49	0.0	193.27
50	240.0	632.75
51	0.0	190.45
52	0.0	55.60
53	320.0	0.00
54	0.0	114.19
55	40.0	333.59
56	0.0	0.00
57	130.0	336.94
58	190.0	0.00
59	160.0	0.00
60	1216.0	0.00
61	155.0	0.00
62	0.0	0.00
63	1090.0	52.77
64	280.0	132.35
65	0.0	197.58
66	300.0	0.00

(conclusão)

Barra	Geração(MW)	Demanda(MW)
67	474.0	397.98
68	0.0	0.00
69	0.0	106.61
70	180.0	0.00
71	424.0	471.21
72	0.0	0.00
73	0.0	0.00
74	0.0	0.00
75	0.0	0.00
76	40.0	0.00
77	0.0	82.85
78	0.0	54.07
79	300.0	146.87
80	0.0	88.34
81	0.0	0.00
82	0.0	0.00
83	0.0	0.00
84	500.0	0.00
85	0.0	0.00
86	850.0	0.00
87	0.0	0.00
88	300.0	0.00
89	0.0	0.00
90	0.0	0.00
91	0.0	0.00
92	0.0	0.00
93	0.0	0.00

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

Tabela 16 - Dados de ramos: Sistema Colombiano de 93 barras.

(continua)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
52	88	300	0.098	34.190	0	5
43	88	250	0.1816	39.560	0	5
57	81	550	0.0219	58.890	0	5
73	82	550	0.0374	97.960	0	5
27	89	450	0.0267	13.270	0	5
74	89	550	0.0034	14.570	0	5
73	89	550	0.0246	66.650	0	5
79	83	350	0.0457	15.400	0	5
8	67	250	0.224	29.200	0	5
39	86	350	0.0545	9.880	0	5
25	28	320	0.0565	9.767	1	5
25	29	320	0.057	9.882	1	5
13	14	350	0.0009	3.902	2	5
13	20	350	0.0178	5.742	1	5
13	23	350	0.0277	7.007	1	5
14	31	250	0.1307	18.622	2	5
14	18	250	0.1494	20.232	2	5
14	60	300	0.1067	15.977	2	5
2	4	350	0.0271	6.662	2	5
2	9	350	0.0122	5.282	1	5
2	83	570	0.02	5.972	1	5
9	83	400	0.02	5.972	1	5
15	18	450	0.0365	7.927	1	5
15	17	320	0.0483	9.422	1	5
15	20	320	0.0513	9.652	1	5
15	76	320	0.0414	9.882	1	5
15	24	350	0.0145	5.282	1	5
37	61	350	0.0139	4.937	1	5
19	61	250	0.1105	16.092	2	5
61	68	250	0.0789	12.412	1	5
37	68	320	0.0544	9.652	1	5
40	68	320	0.132	18.162	1	5
12	75	320	0.0641	11.492	1	5
24	75	350	0.0161	5.512	1	5

(continuação)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
35	36	250	0.2074	27.362	1	5
27	35	250	0.1498	22.072	1	5
35	44	250	0.1358	20.347	2	5
38	68	350	0.0389	7.927	1	5
38	39	350	0.03	6.317	1	5
27	80	350	0.0242	7.007	1	5
44	80	250	0.1014	17.587	1	5
56	81	550	0.0114	32.858	1	5
45	54	320	0.0946	13.562	1	5
45	50	350	0.007	4.362	2	5
10	78	350	0.0102	4.937	1	5
7	78	350	0.0043	4.132	1	5
30	64	250	0.1533	20.577	1	5
30	65	250	0.091	13.677	1	5
30	72	350	0.0173	5.512	2	5
55	57	600	0.0174	46.808	1	5
57	84	600	0.0087	26.658	1	5
55	84	600	0.0087	26.658	1	5
56	57	600	0.024	62.618	2	5
9	77	350	0.019	5.857	1	5
77	79	350	0.0097	5.167	1	5
1	59	350	0.0232	6.202	2	5
59	67	250	0.118	16.667	2	5
8	59	250	0.1056	15.402	2	5
1	3	250	0.104	15.862	1	5
3	71	450	0.0136	5.167	1	5
3	6	350	0.0497	9.422	1	5
55	62	550	0.0281	70.988	1	5
47	52	350	0.0644	10.572	1	5
51	52	250	0.0859	12.872	1	5
29	31	250	0.1042	32.981	2	5
41	42	350	0.0094	4.707	1	5
40	42	350	0.0153	5.167	1	5
46	53	250	0.1041	14.597	2	5
46	51	250	0.1141	16.322	1	5

(continuação)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
69	70	350	0.0228	6.202	2	5
66	69	250	0.1217	17.127	2	5
9	69	350	0.1098	15.747	2	5
60	69	350	0.0906	13.677	2	5
31	32	350	0.0259	6.547	1	5
32	34	350	0.054	9.767	1	5
16	18	350	0.0625	10.917	1	5
16	23	350	0.0238	6.892	1	5
16	21	350	0.0282	6.892	1	5
31	34	250	0.0792	12.412	1	5
31	33	350	0.0248	6.432	2	5
31	60	250	0.1944	25.982	2	5
31	72	350	0.0244	6.317	2	5
47	54	250	0.1003	14.252	2	5
47	49	250	0.0942	13.562	2	5
18	58	350	0.0212	5.742	2	5
18	20	350	0.0504	9.537	1	5
18	66	350	0.0664	11.377	2	5
18	21	350	0.0348	7.467	1	5
18	22	350	0.0209	6.432	1	5
19	22	350	0.0691	11.722	1	5
4	5	350	0.0049	4.247	3	5
5	6	350	0.0074	4.477	2	5
17	23	250	0.0913	12.987	1	5
17	76	350	0.002	3.902	1	5
12	17	350	0.0086	4.707	1	5
1	71	250	0.0841	14.367	2	5
1	8	250	0.081	13.217	1	5
1	11	250	0.0799	12.527	1	5
4	36	250	0.085	13.562	2	5
19	58	320	0.0826	11.722	1	5
27	64	350	0.028	6.777	1	5
27	28	350	0.0238	6.202	1	5
27	44	250	0.0893	16.322	1	5
26	27	350	0.0657	10.917	1	5

(continuação)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
27	29	350	0.0166	5.052	1	5
19	66	350	0.0516	9.307	1	5
73	74	600	0.0214	58.278	1	5
64	65	350	0.0741	11.837	1	5
29	64	350	0.0063	4.362	1	5
4	34	270	0.1016	14.942	2	5
34	70	350	0.0415	8.272	2	5
33	34	320	0.1139	16.322	1	5
8	71	400	0.0075	4.477	1	5
54	63	320	0.0495	9.077	3	5
48	63	350	0.0238	6.317	1	5
67	68	250	0.166	22.072	2	5
39	68	350	0.0145	5.282	1	5
8	9	350	0.0168	5.972	1	5
79	87	350	0.0071	4.477	1	5
8	87	350	0.0132	5.167	1	5
39	43	250	0.1163	16.552	1	5
41	43	250	0.1142	16.322	1	5
23	24	350	0.0255	6.317	1	5
21	22	350	0.0549	9.882	1	5
26	28	350	0.0512	9.307	1	5
28	29	350	0.0281	6.777	1	5
6	10	350	0.0337	7.582	1	5
33	72	350	0.0228	6.202	1	5
39	40	250	0.102	16.207	2	5
12	76	350	0.0081	4.707	1	5
48	54	350	0.0396	8.042	3	5
50	54	250	0.0876	12.872	2	5
62	73	750	0.0272	73.158	1	5
49	53	250	0.1008	14.252	2	5
40	41	350	0.0186	5.742	1	5
45	81	450	0.0267	13.270	1	5
64	74	500	0.0267	13.270	1	5
54	56	450	0.0267	13.270	3	5
60	62	450	0.0257	13.270	3	5

(conclusão)

Barra de	Barra para	Fluxo máximo(MW)	Reat. (pu)	Custo (10^3 US\$)	n_{ij}^0	n_{max}
72	73	500	0.0267	13.270	2	5
19	82	450	0.0267	13.270	1	5
55	82	550	0.029	77.498	1	5
62	82	600	0.0101	30.998	1	5
83	85	450	0.0267	13.270	2	5
82	85	700	0.0341	89.898	1	5
19	86	300	0.1513	20.922	1	5
68	86	350	0.0404	8.272	1	5
7	90	350	0.005	4.247	2	5
3	90	350	0.0074	4.592	1	5
90	91	550	0.0267	13.270	1	5
85	91	600	0.0139	40.298	1	5
11	92	450	0.0267	13.270	1	5
1	93	450	0.0267	13.270	1	5
92	93	600	0.0097	30.068	1	5
91	92	600	0.0088	27.588	1	5

Fonte: Dados de pesquisa do próprio autor

APÊNDICE B - TRABALHO PUBLICADO PELO AUTOR

ROMERO, R.; KHORASANI, H.; NASCIMENTO, E. "*Efficiency Oriented Transmission System Expansion Planning*." IET Generation, Transmission & Distribution, Aceito e aguardando publicação. Dez. 2013.