



Raphael Martins Chabar

**Otimização Global da Localização, Topologia e Capacidade
de uma Rede de Transmissão: Uma Abordagem de
Programação Não-Linear Inteira Mista**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho

Co-orientador: Prof. Mario Veiga Ferraz Pereira

Rio de Janeiro

Abril de 2010



Raphael Martins Chabar

**Otimização Global da Localização, Topologia e Capacidade
de uma Rede de Transmissão: Uma Abordagem de
Programação Não-Linear Inteira Mista**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Mario Veiga Ferraz Pereira
Co-Orientador
PSR

Prof. Roberto Nogueira Fontoura Filho
Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

Prof. Alexandre Street de Aguiar
Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Silvio Binato
PSR

Prof. Geraldo Veiga
R^N Tecnologia

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 5 de abril de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Raphael Martins Chabar

Raphael Martins Chabar é formado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Apoio à Decisão e Telecomunicações pela PUC-Rio (2002) e obteve seu título de MSc em Métodos de Apoio à Decisão também pela PUC-Rio (2005). Dentre os temas de sua linha de pesquisa destacam-se: otimização estocástica, otimização da operação de sistemas hidrotérmicos, otimização da operação de usinas termelétricas e otimização de portfólios de ativos físico-financeiros sob restrições de risco.

Ficha Catalográfica

Chabar, Raphael Martins

Otimização Global da Localização, Topologia e Capacidade de uma Rede de Transmissão: Uma Abordagem de Programação Não-Linear Inteira Mista / Raphael Martins Chabar; orientador: Álvaro de Lima Veiga Filho; co-orientador: Mario Veiga Ferraz Pereira – 2010.

127 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Otimização Global. 3. Redes de Transmissão. 4. Programação Não-Linear Inteira Mista. I. Veiga Filho, Álvaro de Lima. II. Pereira, Mario Veiga Ferraz III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

À minha querida mãe Mary.

À Carolina Leite.

Agradecimentos

À minha saudosa mãe, que por todo amor, dedicação e exemplo é, e sempre será, a responsável por todas as vitórias e conquistas que tenho na vida.

À Carolina Leite, pelo amor e carinho em todos os momentos e pela paciência, compreensão e estímulo enquanto me dediquei ao desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, pelo amor, compreensão e incentivo durante todos os momentos.

Ao amigo Mario Veiga Ferraz Pereira, pela oportunidade de realização deste trabalho e pela orientação e motivação indispensáveis em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Luiz Maurício Thomé, por todo o apoio e amizade, além dos valiosos ensinamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho e em muitos outros momentos, agregando sempre novos conhecimentos.

Ao amigo Sérgio Granville, pelo apoio e pela enorme paciência nas interessantes discussões sobre formulações ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Luiz Augusto Barroso, pela disposição incansável em ajudar durante toda a realização deste trabalho.

Ao professor Álvaro Veiga, pelas aulas, orientação, estímulo e apoio.

A todos os meus amigos, pelo incentivo e ajuda, ainda que indireta, para a realização deste trabalho.

A todos os amigos da PSR.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

Resumo

Chabar, Raphael Martins; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Orientador); Pereira, Mario Veiga Ferraz (Co-Orientador). **Otimização Global da Localização, Topologia e Capacidade de uma Rede de Transmissão: Uma Abordagem de Programação Não-Linear Inteira Mista**. Rio de Janeiro. 2010. 127p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Brasil é um dos líderes mundiais no uso de energia renovável. Além da fonte principal hidroelétrica, que historicamente tem dominado a produção de energia no país, duas fontes renováveis tornaram-se competitivas para a expansão de grande porte nos últimos cinco anos: a bioeletricidade (BE), proveniente da cogeração a partir do bagaço de cana de açúcar, e as pequenas centrais hidroelétricas (PCHs), com capacidade de geração de até 30 MW. Em torno de 8.000 MW de BE e PCHs já estão em operação ou em construção. Esta tese descreve as soluções técnicas para o planejamento da rede de transmissão de integração destas usinas à Rede Básica. O problema de planejamento é complexo haja vista que as usinas encontram-se dispersas por áreas extensas. Como consequência, a rede de integração pode apresentar camadas de subestações subcoletoras de diferentes níveis de tensão. O problema consiste em definir a topologia da rede, o posicionamento das subestações, o comprimento dos circuitos e suas capacidades e o dimensionamento dos equipamentos de transformação que resulte no plano de investimento de menor custo global. Isto envolve o *trade-off* entre o uso de circuitos individuais de maior comprimento e capacidades menores conectando cada gerador diretamente à Rede Básica ou circuitos mais curtos conectando os geradores à uma subestação subcoletora, que concentrará o fluxo em um único circuito de maior capacidade, o qual levará a energia à Rede Básica. As perdas na transmissão podem ser também consideradas no planejamento. Este problema é formulado por Programação Não-linear Inteira Mista, com restrições lineares.

Palavras-chave

Engenharia Elétrica; Otimização Global; Redes de Transmissão; Programação Não-Linear Inteira Mista.

Abstract

Chabar, Raphael Martins; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Advisor); Pereira, Mario Veiga Ferraz (Co-Advisor). **Global Optimization of the Location, Topology and Capacity of a Transmission Network: A Mixed-Integer Non-Linear Programming Approach.** Rio de Janeiro, 2009. 127p. Doctoral Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Brazil is one of the world leaders in the use of renewable power. In addition to the mainstream hydropower, which has historically dominated the country's electricity production, two renewable sources have become competitive for large scale expansion in the last five years: bioelectricity (BE), cogeneration from sugarcane bagasse; and small hydro (SH), which comprises hydro plants smaller than 30 MW. About 8,000 MW of BE and SH plants are already in operation or under construction. This thesis describes the technical solutions to the planning of the transmission network that integrates them to the main grid. The planning issue is complex because the plants are spread over large areas. As a consequence, the integration network has layers of collector substations at different voltages. The problem is to define the network topology, positioning of the substations (SE), length of circuits, circuits' capacities and dimensioning of transformation equipment that result in the least cost investment plan. This involves the trade-off between using longer circuits with individual lower capacities connecting each generator to the main grid or shorter circuits connecting the generators to a SE, which concentrates the flow in a single circuit of higher capacity that will transport the energy to the main grid. Transmission losses can be also considered. This problem is formulated as a Mixed-Integer Non-Linear Program with linear constraints.

Keywords

Electrical Engineering, Global Optimization; Transmission Networks; Mixed-Integer Non-Linear Programming.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Energia renovável no Brasil	16
1.2 O desafio da conexão à rede	17
1.3 Regulamentação atual e alocação de custos na rede	19
1.4 Planejando a rede de integração	23
1.5 Objetivo da Tese	26
1.6 Contribuições da tese	27
1.7 Organização da Tese	28
2 COMPONENTES DA REDE DE INTEGRAÇÃO	30
2.1 Geradores	30
2.2 Linhas de transmissão	32
2.3 Subestações subcoletoras	34
2.4 Coletoras da Rede Básica	36
2.5 Subestações de transformação	37
2.6 Transformadores	38
3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA REDE	40
3.1 A topologia da rede e sua relação com a abordagem de solução	40
3.2 Problemas relacionados na literatura	42
3.3 A contribuição da tese	44
4 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO	45
4.1 Obtenção da rede candidata	45
4.2 A obtenção da topologia	47
4.3 Aproximação linear para a distância	50
4.4 O problema com custo por quilômetro por fluxo para os condutores	57
4.5 A garantia da estrutura em árvore	58

4.6	Formulação alternativa aos circuitos candidatos em paralelo	61
4.7	A inclusão dos custos das entradas de linha	64
4.8	O problema com custo fixo das subestações subcoletoras	64
4.9	O problema com custo variável das subestações subcoletoras em função do número de conexões	66
4.10	O problema com custo das subestações de transformação	68
4.11	A consideração dos custos dos transformadores	73
4.12	Custo das perdas na transmissão	76
4.13	Formulação completa	77
5	RESULTADOS	81
5.1	Descrição geral dos casos de estudo	81
5.2	Planejamento das redes de integração para as usinas de Mato Grosso do Sul e Goiás	82
5.3	Planejamento das redes de integração para as usinas de Minas Gerais	101
6	CONCLUSÕES	123
7	TRABALHOS FUTUROS	124
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

Lista de figuras

Figura 1-1	– Localizações das usinas de bioeletricidade e PCHs	18
Figura 1-2	– Alguns projetos candidatos de bioeletricidade no Mato Grosso do Sul	18
Figura 1-3	– Modelo conceitual para o planejamento e cálculo de preços de transmissão no Brasil	19
Figura 1-4	– Novo paradigma para o planejamento e alocação de custos de transmissão	21

Figura 1-5 – A rede de integração	24
Figura 1-6 – Exemplo de rede de integração com duas subestações coletoras	25
Figura 1-7 – Exemplo de rede de integração com três subestações subcoletoras	25
Figura 3-1 – Representação implícita das subestações de transformação	41
Figura 4-1 – Rede candidata	46
Figura 4-2 – Obtenção da sub-árvore ótima	47
Figura 4-4 – Valor absoluto do erro médio em função de α e λ	54
Figura 4-5 – Valor absoluto do erro médio em função de α e λ : projeção no plano ($ \text{Erro}(\alpha, \lambda) - 1 $, α)	54
Figura 4-6 – Representação de múltiplos condutores candidatos como circuitos paralelos	58
Figura 4-7 – Topologia com <i>loop</i>	59
Figura 4-8 – Exemplo de variáveis adicionais para restrição de saída única em cada nó da rede	60
Figura 4-9 – Custo dos condutores em função da capacidade máxima de fluxo e respectiva regressão linear	62
Figura 4-10 – Custo das subestações em função do número de <i>bays</i> e respectiva regressão linear	67
Figura 4-11 – Custo dos transformadores 13,8 kV/138 kV em função da capacidade máxima de fluxo	74
Figura 5-1 – Localização geográfica das usinas de Mato Grosso do Sul	82
Figura 5-2 – Localização geográfica das usinas de Mato Grosso do Sul e das coletoras da Rede Básica disponíveis para conexão na região	83
Figura 5-3 – Sidrolândia: localização geográfica	84
Figura 5-4 – Sidrolândia: diagrama unifilar da rede projetada	85
Figura 5-5 – Rio Brilhante: localização geográfica	86
Figura 5-6 – Rio Brilhante: diagrama unifilar da rede projetada	88
Figura 5-7 – Ivinhema: localização geográfica	88

Figura 5-8 – Ivinhema: diagrama unifilar da rede projetada	90
Figura 5-9 – Mato Grosso do Sul: diagrama unifilar das redes projetadas	90
Figura 5-10 – Localização geográfica das usinas de Goiás e da fronteira Mato Grosso do Sul/Goiás	91
Figura 5-11 – Localização geográfica das usinas de Goiás e fronteira Mato Grosso do Sul/Goiás e das coletoras da Rede Básica disponíveis para conexão na região	92
Figura 5-12 – Jataí: localização geográfica	92
Figura 5-13 – Jataí: diagrama unifilar da rede projetada	95
Figura 5-14 – Chapadão do Sul: localização geográfica	96
Figura 5-15 – Chapadão do Sul: diagrama unifilar da rede projetada	98
Figura 5-16 – Inocência: localização geográfica	99
Figura 5-17 – Inocência: diagrama unifilar da rede projetada	100
Figura 5-18 – Goiás e fronteira Mato Grosso do Sul/Goiás: diagrama unifilar das redes projetadas	101
Figura 5-19 – Localização geográfica das usinas de Minas Gerais	102
Figura 5-20 – Localização geográfica das usinas de Minas Gerais e das coletoras da Rede Básica disponíveis para conexão na região	103
Figura 5-21 – União de Minas: localização geográfica	104
Figura 5-22 – União de Minas: diagrama unifilar da rede projetada	106
Figura 5-23 – Gurinhatã: localização geográfica	106
Figura 5-24 – Gurinhatã: diagrama unifilar da rede projetada	108
Figura 5-25 – Itapagipe: localização geográfica	109
Figura 5-26 – Itapagipe: diagrama unifilar da rede projetada	111
Figura 5-27 – Prata3: localização geográfica	111
Figura 5-28 – Prata3: diagrama unifilar da rede projetada	112
Figura 5-29 – Monte Alegre: localização geográfica	113
Figura 5-30 – Monte Alegre: diagrama unifilar da rede projetada	115
Figura 5-31 – Nova Ponte: localização geográfica	115
Figura 5-32 – Nova Ponte: diagrama unifilar da rede projetada	118
Figura 5-33 – Volta Grande: localização geográfica	118

Figura 5-34 – Volta Grande: diagrama unifilar da rede projetada	121
Figura 5-35 – Minas Gerais: diagrama unifilar das redes projetadas	122

Lista de tabelas

Tabela 2-1 – Exemplo de dados necessários dos geradores	31
Tabela 2-2 – Exemplo de dados necessários das subestações de usina de diferentes níveis de tensão	32
Tabela 2-3 - Exemplo de dados necessários para LTs	33
Tabela 2-4 – Exemplo de dados necessários das subestações subcoletoras de diferentes níveis de tensão	35
Tabela 2-5 – Exemplo de dados necessários das coletoras da Rede Básica	36
Tabela 2-6 – Exemplo de dados necessários dos transformadores de diferentes níveis de tensão: custo em função da potência	38
Tabela 2-7 – Exemplo de dados necessários dos transformadores de diferentes níveis de tensão: custo das conexões de baixa e alta tensões	39
Tabela 5-1 – Sidrolândia: dados de usinas	84
Tabela 5-2 – Sidrolândia: dados da coletora da Rede Básica	84
Tabela 5-3 – Sidrolândia: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	85
Tabela 5-4 – Rio Brilhante: dados de usinas	86
Tabela 5-5 – Rio Brilhante: dados da coletora da Rede Básica	86
Tabela 5-6 – Rio Brilhante: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	87
Tabela 5-7 – Ivinhema: dados de usinas	88
Tabela 5-8 – Ivinhema: dados da coletora da Rede Básica	88
Tabela 5-9 – Ivinhema: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	89
Tabela 5-10 – Jataí: dados de usinas	93
Tabela 5-11 – Jataí: dados da coletora da Rede Básica	93
Tabela 5-12 – Jataí: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	94
Tabela 5-13 – Chapadão do Sul: dados de usinas	96

Tabela 5-14 – Chapadão do Sul: dados da coletora da Rede Básica	96
Tabela 5-15 – Chapadão do Sul: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	97
Tabela 5-16 – Inocência: dados de usinas	99
Tabela 5-17 – Inocência: dados da coletora da Rede Básica	99
Tabela 5-18 – Inocência: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	100
Tabela 5-19 – União de Minas: dados de usinas	104
Tabela 5-20 – União de Minas: dados da coletora da Rede Básica	104
Tabela 5-21 – União de Minas: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	105
Tabela 5-22 – Gurinhatã: dados de usinas	107
Tabela 5-23 – Gurinhatã: dados da coletora da Rede Básica	107
Tabela 5-24 – Gurinhatã: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	108
Tabela 5-25 – Itapagipe: dados de usinas	109
Tabela 5-26 – Itapagipe: dados da coletora da Rede Básica	109
Tabela 5-27 – Itapagipe: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	110
Tabela 5-28 – Prata3: dados de usinas	111
Tabela 5-29 – Prata3: dados da coletora da Rede Básica	111
Tabela 5-30 – Prata3: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	112
Tabela 5-31 – Monte Alegre: dados de usinas	113
Tabela 5-32 – Monte Alegre: dados da coletora da Rede Básica	113
Tabela 5-33 – Monte Alegre: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	114
Tabela 5-34 – Nova Ponte: dados de usinas	116
Tabela 5-35 – Nova Ponte: dados da coletora da Rede Básica	116
Tabela 5-36 – Nova Ponte: dados dos equipamentos da rede de integração de mínimo custo	117
Tabela 5-37 – Volta Grande: dados de usinas	119
Tabela 5-38 – Volta Grande: dados da coletora da Rede Básica	119

Tabela 5-39 – Volta Grande: dados dos equipamentos
da rede de integração de mínimo custo

120