

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TRATAMENTO COMPUTACIONAL DA TOPOLOGIA DE
GRANDES REDES ELÉTRICAS

Daniel Stevens Torres Cárdenas

Março/2011

DANIEL STEVENS TORRES CÁRDENAS

TRATAMENTO COMPUTACIONAL DA TOPOLOGIA DE
GRANDES REDES ELÉTRICAS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Orientadores:

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

Profa. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D. Sc.

Niterói, RJ - Brasil
2011

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

T693 Torres Cárdenas, Daniel Stevens.
Tratamento computacional da topologia de grandes redes elétricas
/ Daniel Stevens Torres Cárdenas. – Niterói, RJ : [s.n.], 2011.
127 f.

Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal
Fluminense, 2011.

Orientadores: Marcus Theodor Schilling, Tatiana Mariano Lessa
de Assis.

1. Sistemas de potência. 2. Rede elétrica. 3. Mineração de dados.
4. Grafo. 5. Curto-circuito. 6. Topologia. I. Título.

CDD 621.3191

DANIEL STEVENS TORRES CÁRDENAS

**TRATAMENTO COMPUTACIONAL DA TOPOLOGIA DE GRANDES REDES
ELÉTRICAS**

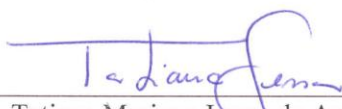
Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Aplicações (Computação em Potência).

Aprovada em 04 de março de 2011.


BANCA EXAMINADORA




Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc. - Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense



Profa. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D. Sc. - Orientadora
UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D. Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. Sergio Gomes Junior, D. Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense /
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica



Prof. João Alberto Passos Filho, D. Sc.
UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora

“Dios, dame serenidad para aceptar los problemas que no puedo resolver; persistencia para resolver los problemas que puedo; y sabiduría para saber diferenciarlos.”

“Deus, dê-me serenidade para aceitar os problemas que não posso resolver; persistência para resolver os problemas que eu posso; e sabedoria para saber diferenciá-los.”

“God grant me the serenity to accept the problems I cannot solve; the persistence to solve the problems that I can; and the wisdom to know the difference.”

Reinhold Niebuhr

Dedico esta Dissertação de Mestrado aos meus queridos pais e irmãos, pelo apoio incondicional outorgado e pelo incentivo na minha superação pessoal.

AGRADECIMENTOS

Principalmente a Deus por ter me dado capacidade, paciência e perseverança suficientes para concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais Daniel e Lidia por todo o amor, apoio e carinho que têm me incentivado a terminar esta jornada; aos meus irmãos Jonathan e Hans, pela amizade que me dá as forças necessárias para continuar melhorando.

Um agradecimento muito especial aos meus orientadores: Marcus e Tatiana, pela orientação, dedicação e ensinamentos dados; sem mencionar a preocupação que sempre demonstraram ter comigo. Não posso deixar de citar também o quanto sua paciência sempre me surpreendeu e o quanto sua gentileza sempre me motivou.

Agradeço a Johnny pelo grande apoio oferecido desde o primeiro dia em que cheguei à cidade de Niterói. Agradeço aos amigos com quem dividi residência: Emanuel, Warley (Toca), Rafael (Guto), Rafael (Nardi). Agradeço pelo acolhimento e convivência agradável da senhora Zenilda, do Senhor Vanderley e família; dos quais recebi o amor familiar que deixei no meu país.

Dentre os amigos que fiz na UFF, agradeço principalmente àqueles que são hoje como irmãos para mim: meu grande amigo Allison, parceiro desde os primeiros momentos na UFF, Yuri Ferreira, o cara prestativo e amável; e Marcelo Pinheiro, que embora tenha passado pouco tempo no IC, deixou uma grande amizade durante a sua estadia.

Agradeço a todos os amigos e colegas que eu encontrei na UFF. Correndo o risco de cometer injustiças, cito aqueles com quem tive maior contato: Juliano, amigo de grandes valores morais; Henrique Bueno; Carlos; Janine, sempre prestativa; Stênio Sã; e Jaques, amigo sinônimo de perseverança.

Agradeço as pessoas que apesar de ter conhecido recentemente as considero especiais na minha vida: Carolina Oliveira, pelo grande apoio emocional e espiritual; Adriana, amiga inseparável que sempre me ofereceu grande ajuda; Célia, pelo grande acolhimento oferecido; e Lívia, pela grande amizade oferecida.

Agradeço também o incentivo prestado pelos Eng. Ricardo Penido Dutt-Ross (CEPEL), Dr. João Clávio Salari Filho (CEPEL), Dr. Sergio Porto Romero (CEPEL), Dr. Gilberto Pires de Azevedo (CEPEL), Dr. Marcelos G. dos Santos (ONS), Eng. Flávio F. Pazo Blanco (ONS).

Os nomes citados aqui tornaram possível, em maior ou menor escala, a conclusão de mais essa etapa de minha vida, mas agradeço também a todos aqueles que por eventual esquecimento não foram mencionados.

Nota: A elaboração desta Dissertação foi viabilizada graças ao suporte financeiro do CEPEL (Centro de Pesquisas de Engenharia Elétrica). Registra-se ainda o apoio do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e INERGE (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia Elétrica).

* * *

Resumo da Dissertação apresentada ao Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense – UFF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

TRATAMENTO COMPUTACIONAL DA TOPOLOGIA DE GRANDES REDES ELÉTRICAS

Daniel Stevens Torres Cárdenas

Março, 2011

Orientadores:

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

Profa. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D. Sc.

Esta Dissertação descreve a concepção de um novo aplicativo computacional (*Anatopo*) composto por diversos módulos, visando a identificação, diagnóstico e vários tipos de tratamento de configurações topológicas representativas de sistemas de potência descritos por grafos. Tais grafos são definidos por listas de nós (*e.g.* subestações ou barras), ramos longitudinais (*e.g.* linhas de transmissão, transformadores, elementos série) e transversais (*e.g.* cargas, injeções, capacitores e reatores em derivação). O utilitário proposto é útil para operações de pré-processamento de estudos convencionais de fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, curto-circuito, confiabilidade, estimação de estado, estabilidade, ou para a avaliação de propriedades estruturais inerentes à topologia de redes.

Palavras-chave: *Circuito, curto-circuito, fluxo de potência, grafo, mineração de dados, rede, sistema de potência, topologia.*

* * *

Summary of the Dissertation presented to the Institute of Computation of the Fluminense Federal University – UFF to fulfill the necessary requirements to obtain the Degree of Master in Sciences (M. Sc.).

COMPUTER BASED TOPOLOGICAL ANALYSIS OF LARGE SCALE ELECTRICAL NETWORKS

Daniel Stevens Torres Cárdenas

March, 2011

Advisors:

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.

Profa. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D. Sc.

This Dissertation describes the design of a new computer application (*Anatopo*) composed of several modules, for the identification, diagnosis and treatment of various types of problems associated with power systems described by graphs. These graphs are defined by lists of nodes (*e.g.* substations or busses), longitudinal branches (*e.g.* transmission lines, transformers, series elements) and shunts (*e.g.* loads, injections, capacitors and reactors). The proposed computer program is useful for pre-processing of conventional power flow studies, optimal power flow, short circuit, reliability, state estimation, stability, or for the evaluation of inherent structural properties of the topology of networks.

Key-words: *Circuit, short circuit, power flow, graph, data mining, network, power system, topology.*

* * *

ANAFAS	- Programa de Análise de Falhas Simultâneas
ANAREDE	- Programa de Análise de Redes Elétricas
ANATOPO	- Programa Analisador de Topologias de Redes Elétricas
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CCT	- Método de Identificação de Conectividade Coerente de Tensões
CEPEL	- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CFG	- Grafo de Controle de Fluxos (<i>Control Flow Graphs</i>)
CIM	- Modelo de Informação Comum (<i>Common Information Model</i>)
CIO	- Método de Identificação via Código Intrínseco Opcional da Lista Investigada
CNB	- Método de Identificação via Caracteres do Nome da Barra
DB	- Método de Identificação via Dicionário de Barras
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	- Sistemas Flexíveis de Transmissão de Corrente Alternada (<i>Flexible Alternate Current Transmission Systems</i>)
HI	- Método de Identificação Híbrida Inteligente
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	- Sistema Interligado Nacional

Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Glossário.....	xi
Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xv
Capítulo I - Introdução	1
1.1 - Considerações Preliminares	1
1.2 - Objetivo	3
1.3 - Conceitos Básicos.....	3
1.4 - Estrutura da Dissertação	5
1.5- Publicações.....	6
Capítulo II - Proposição Conceitual.....	7
2.1 - Introdução.....	7
2.2 - Dados de Entrada.....	7
2.3 - Modularidade.....	8
2.4 - Identificação, Estatística e Diagnose	9
2.5 - Ordenação dos Códigos de Barras	14
2.6 - Renumeração Simples	15
2.7 - Comparador.....	17
2.8 - Renumerador Duplo	18
2.9 - Manipulação de Áreas	19
2.10 - Cálculo de Métricas	20
2.11 - Ajuste de Ponto de Operação	20
2.12 - Módulo Matricial	21
2.13 - Módulo Equivalentador	21
2.14 - Relacionamento e Renomeação Nodal	21
2.15 - Configurador	22
2.16 - Sumário.....	22
Capítulo III - Implementação Computacional	23
3.1 - Introdução.....	23
3.2 - Protótipo Computacional Anatopo (Versão 1.0).....	23
3.3 - Arquivos de Entrada.....	27
3.4 - Módulos Funcionais de Processamento.....	31
3.4.1 - Identificação Estatística e Diagnose.....	31
3.4.2 - Ordenador.....	44
3.4.3 - Renumerador Simples.....	45
3.4.4 - Comparador.....	49
3.4.5 - Renumerador Duplo.....	50
3.4.6 - Relacionador e Renumerador Nodal.....	51

3.5 - Arquivos de Saída.....	51
3.6 - Sumário.....	52
Capítulo IV - Aplicação e Resultados	53
4.1 - Introdução	53
4.2 - Relação de Experimentos	53
4.3 - Sistemas-Teste Utilizados.....	54
4.4 - Resultados dos Experimentos.....	58
A - Experimento 1: Identificar Tensões.....	58
B - Experimento 2: Obter a Estrutura Topológica.....	68
C - Experimento 3: Ordenação Nodal.....	79
D - Experimento 4: Renumeração Nodal Simples.....	81
E - Experimento 5: Comparar duas Topologias.....	84
F - Experimento 6: Renumerar duas Topologias.....	87
G - Experimento 7: Relacionar e Renomear Barras.....	89
4.5 - Sumário	90
Capítulo V - Conclusões	91
5.1 - Retrospectiva	91
5.2 - Complementação Futura.....	92
Referências Bibliográficas	93
Apêndice A Sistemas-Teste.....	95
Apêndice B Manual de Usuário.....	108
Apêndice C Funções e Sub-rotinas do <i>Anatopo</i>.....	123
Apêndice D Estrutura do CD.....	127

* * *

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura Computacional Completa.....	9
Figura 2.2 - Formas de Identificação Topológica.....	10
Figura 2.3 - Métodos de Identificação do Nível de Tensão.....	12
Figura 3.1 - Estrutura geral da Ferramenta Computacional.....	24
Figura 3.2 - Grafo do Fluxo de Controle da Ferramenta Computacional.....	26
Figura 3.3 - Módulos do Protótipo Computacional <i>Anatopo (versão 1.0)</i>	31
Figura 3.4 - Divisão da Rede Elétrica por Ilhas (Sistemas Isolados).....	32
Figura 3.5 - Distribuição dos Barramentos agrupados por Ilhas.....	32
Figura 3.6 - Fluxograma Identificação via Caracteres do Nome da Barra.....	35
Figura 3.7 - Pseudocódigo da Identificação via Caracteres do Nome da Barra.....	36
Figura 3.8 - Lista de Barras identificadas pelo nome.....	37
Figura 3.9 - Fluxograma Identificação via Dicionário de Barras.....	37
Figura 3.10 - Fluxograma Identificação via Código Intrínseco Opcional.....	39
Figura 3.11 - Fluxograma Identificação via Conectividade Coerente de Tensões.....	38
Figura 3.12 - Pseudocódigo da Identificação via Conectividade Coerente de Tensões.....	41
Figura 3.13 - Fluxograma Identificação Híbrida Inteligente.....	44
Figura 3.14 - Algoritmo do Método de Ordenação <i>Quicksort</i>	45
Figura 3.15 - Fluxograma Renumeração Sequencial Simples.....	46
Figura 3.16 - Renumeração Simples (Hierárquica de Agregados).....	47
Figura 3.17 - Fluxograma Renumeração Simples (Hierárquica de Agregados).....	48
Figura 3.18 - Fluxograma Módulo Comparador.....	49
Figura 4.1 - Sistema-Teste Fictício de 15 Barras.....	55
Figura 4.2 - Grafo Representativo do Sistema-Teste Fictício de 15 Barras.....	55
Figura 4.3 - Sistema-Teste Fictício de 33 Barras.....	56
Figura 4.4 - Grafo Representativo do Sistema-Teste Fictício de 33 Barras.....	56
Figura 4.5 - Sistema-Teste Fictício de 58 Barras.....	57
Figura 4.6 - Grafo Representativo do Sistema-Teste Fictício de 58 Barras.....	57
Figura 4.7 - Conectividade da Barra 538 do Sistema-Teste 4.....	61
Figura 4.8 - Conectividade da Barra 178 do Sistema-Teste 8.....	61
Figura 4.9 - Grafo Representativo do Sistema-Teste Fictício de 48 Barras.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de Ramos Incidentes em um Nó.....	11
Tabela 2.2 - Diagnoses Inicial e Final de Áreas.....	19
Tabela 2.3 - Tradutor de Barras Representativas de um Mesmo Sistema.....	22
Tabela 3.1 - Descrições dos Nós do CFG.....	26
Tabela 3.2 - Comandos utilizados do Programa <i>Anarede</i>	28
Tabela 3.3 - Comandos utilizados do Programa <i>Anafas</i>	29
Tabela 3.4 - Comandos Utilizados no Dicionário de Barras.....	30
Tabela 3.5 - Tensões Típicas de Registro usadas em Estudos de Planejamento.....	34
Tabela 3.6 - Tensões Atípicas usadas em Estudos de Planejamento do SIN.....	34
Tabela 3.7 - Exemplificação das Regras da Metodologia Híbrida Inteligente.....	43
Tabela 4.1 - Relação de Experimentos.....	53
Tabela 4.2 - Informações sobre os Sistemas-Teste.....	54
Tabela 4.3 - Contabilizações Topológicas dos Sistemas-Teste.....	58
Tabela 4.4 - Discriminação da Quantidade de Barras por Grau de Radialidade.....	59
Tabela 4.5 - Barras com Maior Grau de Radialidade.....	60
Tabela 4.6 - Discriminação da Quantidade de Barras por Nível de Tensão.....	62
Tabela 4.7 - Quantidade de Malhas Não Singulares por Nível de Tensão.....	63
Tabela 4.8 - Barras Sementes Sugeridas.....	64
Tabela 4.9 - Resultados do Experimento 2.1 (CNB).....	68
Tabela 4.10 - Erros do Sistema-Teste 1 do Experimento 2.1 (CNB).....	69
Tabela 4.11 - Erros do Sistema-Teste 3 do Experimento 2.1 (CNB).....	69
Tabela 4.12 - Resultados do Experimento 2.2 (CIO).....	70
Tabela 4.13 - Erros do Sistema-Teste 3 do Experimento 2.2 (CIO).....	70
Tabela 4.14 - Resultados do Experimento 2.3 (CNB e CIO).....	71
Tabela 4.15 - Desempenho da Metodologia CNB + CIO.....	71
Tabela 4.16 - Erros do Sistema-Teste 3 do Experimento 2.3 (Metodologias CNB e CIO)..	72
Tabela 4.17 - Resumo do Experimento 2	72
Tabela 4.18 - Resultados do Experimento 2.4.1 (Metodologia CCT).....	73
Tabela 4.19 - Quantificação de Barras Sementes do Experimento 2.4.1 (CCT).....	73

Tabela 4.20 - Resultados do Experimento 2.4.2 (CCT).....	74
Tabela 4.21 - Erros do Sistema-Teste 1 do Experimento 2.4.2 (CCT).....	74
Tabela 4.22 - Resultados do Experimento 2.4.3 (CCT).....	75
Tabela 4.23 - Desempenho da Metodologia CCT (2.4.3).....	76
Tabela 4.24 - Resultados do Experimento 2.5.1 (CCT).....	76
Tabela 4.25 - Resultados do Experimento 2.5.2 (CNB+CIO com prioridade).....	77
Tabela 4.26 - Resultados do Experimento 2.5.3 (CCT+DB).....	77
Tabela 4.27 - Desempenho da Metodologia CCT (2.4.3).....	78
Tabela 4.28 - Ordenação Simples do Sistema-Teste 2.....	79
Tabela 4.29 - Ordenação Qualificada – Nível de Tensão Crescente.....	80
Tabela 4.30 - Ordenação Qualificada – Nível de Tensão e Área Crescente.....	80
Tabela 4.31 - Ordenação Qualificada – Região e Estado.....	80
Tabela 4.32 - Ordenação Qualificada – Região, Área e Estado Decrescente.....	81
Tabela 4.33 - Operação de Batismo do Sistema-Teste 2.....	82
Tabela 4.34 - Exemplo 1 da Renumeração Sequencial Simples do Sistema-Teste 2.....	82
Tabela 4.35 - Exemplo 2 da Renumeração Sequencial Simples do Sistema-Teste 2.....	82
Tabela 4.36 - Renumeração Aleatória do Sistema-Teste 2.....	83
Tabela 4.37 - Renumeração por Hierarquia do Sistema-Teste 2.....	86
Tabela 4.38 - Comparação Nodal Sistema-Teste 1 e 12.....	86
Tabela 4.39 - Comparação Ramal Sistema-Teste 1 e 12.....	86
Tabela 4.40 - Comparação Radial Sistema-Teste 1 e 12.....	87
Tabela 4.41 - Renumeração Dupla Sistema-Teste 1 e 12.....	88
Tabela 4.42 - Renomeação dos Sistema-Teste 1 e 12.....	89

* * *