

Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Sistemas de Energia Elétrica



Estudo de Paralelismo de Alimentadores Radiais de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Alexandre Batista de Jesus Soares

Campinas 2012



Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Sistemas de Energia Elétrica



Estudo de Paralelismo de Alimentadores Radiais de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Autor: Alexandre Batista de Jesus Soares

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho Co-Orientador: Prof. Dr. Fujio Sato

> **Tese de Doutorado** apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Energia Elétrica.**

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (presidente) — DSCE/FEEC/UNICAMP Prof. Dr. Geomar Machado Martins — DESP/UFSM Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado — EESC/USP - SÃO CARLOS Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Tavares — DSCE/FEEC/UNICAMP Prof. Dr. Gilmar Barreto — DSIF/FEEC/UNICAMP

> Campinas 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Solle	Soares, Alexandre Batista de Jesus Estudo de paralelismo de alimentadores radiais de sistemas de distribuição de energia elétrica / Alexandre Batista de Jesus Soares -Campinas, SP: [s.n.], 2012.
	Orientador: Ernesto Ruppert Filho Coorientador: Fujio Sato. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Banco de dados. 3. Transitórios (Eletricidade). 4. Transformadores elétricos. 5. Sobretensão. I. Ruppert Filho, Ernesto,1948 II. Sato, Fujio, 1944 III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Studies about radial feeders in electrical energy distribution systems Palavras-chave em Inglês: Electricity - Distribution, Database, Transients (Electricity), Electrical transformers, Surge Área de concentração: Energia Elétrica Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica Banca examinadora: Geomar Machado Martins, Ricardo Quadros Machado, Maria Cristina Tavares, Gilmar Barreto Data da defesa: 05-10-2012 Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Alexandre Batista de Jesus Soares

Data da Defesa: 5 de outubro de 2012

Titulo da Tese: "Estudo de Paralelismo de Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica"

	hC
	Alanta
Prof. Dr. Ernesto Ruppert P	The (Presidente)
Prof. Dr. Geomar Machado	Martins:
Prof. Dr. Ricardo Quadros I	Machado:
Profa. Dra. Maria Cristina D	Dias_Tavares;QQQU>
Prof. Dr. Gilmar Barreto:	G!1

Resumo

Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional denominada Gerenciador de Paralelismo de Alimentadores Radiais de Distribuição (GPARD), que foi desenvolvida para o estudo de manobras de paralelismo entre alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica, localizados na mesma subestação ou em subestações diferentes, derivados do mesmo transformador ou de transformadores diferentes.

O GPARD é uma ferramenta computacional que contribui para a operação de sistemas de distribuição auxiliando os operadores do sistema na tomada de decisão para a realização de manobras de paralelismo durante a operação ou em estudos prévios, fundamentada na análise gráfica de resultados de simulação e de medidas remotas, resultando em flexibilidade operacional para o sistema e segurança para os consumidores.

Tal ferramenta computacional poderá ser bastante utilizada em um ambiente de rede inteligente onde ações rápidas envolvendo medições, transmissão de dados e controle são necessárias durante a operação do sistema elétrico.

Palavras-chave: Energia elétrica - distribuição, banco de dados, transitórios (eletricidade), transformadores elétricos, sobretensão.

Abstract

This work presents a computational tool named Management of Parallel Distribution Radial Feeders (GPARD), dedicated to the study of radial distribution feeders parallelism maneuvers, located in the same substation or in different substations, supplied by the same transformer or by different transformers.

The GPARD is a computational tool that helps the operation of distribution systems helping system operators in making decisions for the maneuvers of parallelism during the operation or in previous studies, based on graphical analysis of simulation results and remote measurements resulting in operational flexibility to the system and safety to consumers.

This computational tool can be utilized in a smart grid environment where fast actions involving measurements, data transmission and control are necessary for the operation of the electric system.

Keywords: *Electricity – distribution, database, transients (electricity), electrical transformers, surge.*

Dedico esta tese aos amores da minha vida, minha esposa Mónica e minha filha Luana, pelo seu amor e carinho. "No jardim de nossas vidas há muitas rosas em flor, mas nenhuma é mais bonita que a Luaninha, rosa do nosso amor".

Agradecimentos

Ao professor Ernesto Ruppert Filho pelo respeito, seriedade e paciência com que orientou as atividades ao longo do período da realização desta tese.

Ao professor Fujio Sato pela ajuda e recomendações que contribuíram para a realização desta tese.

Aos amigos e colegas de curso o meu reconhecimento por todo o apoio, críticas e sugestões que contribuíram para o enriquecimento desta tese.

A CNPQ e a CAPES pelos apoios financeiros.

Sumário

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELASxxi
LISTA DE ABREVIAÇÕESxxiii
LISTA DE SÍMBOLOSxxv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO
CAPÍTULO 2 - PARALELISMO DE ALIMENTADORES RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO 48
3.2 SIMULAÇÕES COM O SIMPOWERSYSTEMS 58
3.3 SIMULAÇÕES COM O PSCAD 68
3.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE MANOBRAS DE PARALELISMO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM MATEMÁTICA DO GPARD 75
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO GPARD 85
CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA DO GPARD 91
5.1 CRIAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA COM O APLICATIVO GUIDE DO MATLAB 92

5.2 BANCOS DE DADOS DAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA	96
5.3 INTERFACE GRÁFICA DO GPARD	98
5.3.1 MÓDULO ENTRADA DE DADOS DOS ALIMENTADORES	99
5.4.1.1 PRESENÇA DE BANCO DE CAPACITORES NOS ALIMENTADORES	. 102
5.4.2 MÓDULO PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO	. 105
5.4.3 MÓDULO PARÂMETROS DO CHAVEAMENTO	. 106
5.4.4 MÓDULO SIMULAÇÃO	. 109
5.4.5 MENU ARQUIVO	. 110
5.4.6 MENU SUBESTAÇÕES	. 111
5.4.7 MENU ALIMENTADOR A	. 113
5.4.8 MENU ALIMENTADOR B	. 116
5.4.9 MENU CHAVE	. 118
5.4.10 MENU RECONFIGURAÇÃO	. 120
CAPÍTULO 6 - MANOBRAS DE PARALELISMO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	. 121
6.1 MEDIÇÕES EM CAMPO DE MANOBRAS DE PARALELISMO NO SISTEMA	DE
DISTRIBUIÇÃO	. 122
6.1.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	. 125
6.1.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIÇÕES	. 131
6.1.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MANOBRAS DE PARALELISMO	. 131
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	. 133
PUBLICAÇÕES	. 137
REFERÊNCIAS	. 139
BIBLIOGRÁFIA	. 143

APÊNDICE	A -	DETERMINAÇÃO	DE	PARÂMETROS	DE	TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS A	ATRAV	YÉS DOS ENSAIOS D	DE RO	TINA DOS FABRI	CAN	FES 147
A.1 ENSAIO I	DE CUF	RTO-CIRCUITO				
A.2 ENSAIO A	A VAZI	0				
APÊNDICE B	- MÉTO	DDO DE REDUÇÃO	DE KI	RON	•••••	
B.1 MÉTODO	DE RE	DUÇÃO DE KRON			•••••	
B.1.1 SISTEN	MA EXI	EMPLO				
ANEXO					•••••	
1 RELATÓRIC) de ei	NSAIOS DO TRANSI	FORM	ADOR DE 25 MV	A	
2 RELATÓRIC	D DE EI	NSAIOS DO TRANSI	FORM	ADOR DE 15 MV	A	

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Operação de paralelismo de dois transformadores
Figura 2.2 – Modelo de circuito elétrico equivalente da operação em paralelismo
Figura 2.3 – Tipo I: alimentadores derivados do mesmo transformador
Figura 2.4 – Tipo II: alimentadores derivados de diferentes transformadores
Figura 2.5 – Tipo III: alimentadores derivados de diferentes transformadores localizados em
diferentes subestações
Figura 3.1 – Planta de localização dos alimentadores do sistema Guarujá
Figura 3.2 – Diagrama unifilar dos alimentadores GUT40 e GUT47
Figura 3.3– Circuito equivalente do transformador de 25 MVA 52
Figura 3.4 – Interface do transformador de 25 MVA 53
Figura 3.5 – Modelo equivalente do transformador de 15 MVA 56
Figura 3.6 – Interface do Transformador de 15 MVA 57
Figura 3 7 – Sistema Guarujá implementado no SimPowerSystem
Figura 3.8 – Correntes na chave de manobra 60
Figura 3.9 – Tensões na chave de manobra 61
Figura 3.10 – Tensões na chave de manobra com os alimentadores GUT40 e GUT47 sem banco
de capacitores
Figura 3.11 – Correntes no transformador de 15 MVA63
Figura 3.12 – Correntes no transformador de 25 MVA 64
Figura 3.13 – Tensões no transformador de 15 MVA
Figura 3.14 – Tensões no transformador de 25 MVA67
Figura 3.16 – Esquema de proteção de sobrecorrente dos transformadores

Figura 5.15 - Simulação com condições iniciais e tempos de manobra distintos nas c	naves de
manobra	108
Figura 5.16 – Janela simulação	109
Figura 5.17 – Janela abrir e salvar arquivo	110
Figura 5.18 – Opção de visualização das tensões nas subestações	111
Figura 5.19 – Tensões nas subestações A e B.	112
Figura 5.20 - Opção de visualização dos gráficos correntes e tensões e dos gráficos	fluxo de
carga e perdas de potência	113
Figura 5.21 – Gráficos das correntes e tensões no transformador A.	114
Figura 5.22 – Fluxo de carga e perdas de potência no alimentador A	115
Figura 5.23 – Gráficos das correntes e tensões no transformador B	116
Figura 5.24 – Gráficos do fluxo de carga e das perdas de potência no alimentador B	117
Figura 5.25 – Opção de visualização das correntes e tensões na chave de manobra	118
Figura 5.26 – Gráficos das correntes e tensões na chave de manobra	119
Figura 5.27 – Reconfiguração da rede do alimentador A	
Figura 6.1 – Diagrama simplificado da manobra de paralelismo	122
Figura 6.2 – TP do lado de chegada do alimentador GUT40 na chave de manobra	123
Figura 6.3 – Ligações do osciloscópio para o registro das medições das tensões	124
Figura 6.4 – Esquema de ligação para o registro das medições das tensões	125
Figura 6.5 – Gráficos dos registros das medições no MATLAB, o retângulo demarca os	instantes
de transição da chave de manobra	126
Figura 6.6 – Fechamento da chave 2 com a chave 1 fechada	127
Figura 6.7 – Abertura da chave 2 com a chave 1 fechada.	128
Figura 6.8 – Fechamento da chave 2 com a chave 1 aberta	129
Figura 6.9 – Abertura da chave 2 com a chave 1 aberta.	
Figura A.1.– Ensaio de curto circuito em transformador trifásico.	148
Figura A.2 – Ensaio a vazio em transformador trifásico	
Figura AI.1 – Relatório de ensaios do transformador de 25 MVA.	161
Figura AI 2 – Relatório de ensaios do transformador de 25 MVA	

Lista de Tabelas

Гabela 3.1 – Dados nominais do transformador	50
Гabela 3.2 – Dados do ensaio de curto-circuito	50
Гabela 3.3 – Dados do ensaio a vazio	51
Tabela 3.4 – Valores das resistências e reatâncias	52
Гabela 3.5 – Dados do transformador de 25 MVA	53
Гabela 3.6 – Dados do alimentador GUT40	54
Гabela 3.7 – Dados nominais do transformador	54
Tabela 3.8 – Dados do ensaio de curto-circuito	55
Гabela 3.9 – Dados do ensaio a vazio	55
Гabela 3.10 – Valores das resistências e reatâncias	56
Гabela 3.11 – Dados do transformador de 15 MVA	57
Tabela 3.12 – Dados do alimentador GUT47	58

Lista de Abreviações

ATP – Alternative Transient Program é um programa de livre domínio para análise de circuitos elétricos, especialmente em regime transitório. O programa permite o modelamento matemático de sistemas elétricos, mecânicos e de controle, monofásicos ou polifásicos.

COD - Centro de Operações da Distribuição.

GPARD - Gerenciador de Paralelismo de Alimentadores Radiais de Distribuição.

GUIDE – Graphical User Interface Development Environment é o aplicativo do MATLAB para criação de interfaces gráficas para interação com o usuário.

GUI – Graphical User Interface é uma interface gráfica criada no GUIDE para interação com o usuário.

MATLAB – MATrix LABoratory é um programa interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico integrado por análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e recursos gráficos de alta qualidade.

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition são Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados que utilizam programas para monitorar e supervisionar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de drivers específicos. Estes sistemas podem assumir topologia mono-posto, cliente-servidor ou múltiplos servidores-clientes. Atualmente tendem a libertar-se de protocolos de comunicação proprietários, como os dispositivos PACs (Controladores Programáveis para Automação), módulos de entradas/saídas remotas, controladores programáveis (CLPs), registradores, entre outros, para arquiteturas cliente-servidor OPC (OLE for Process Control).

SIMPOWERSYSTEMS – Aplicativo do Simulink com ferramentas para modelagem e simulação de sistemas elétricos de potência de geração, transmissão e distribuição.

SIMULINK – Aplicativo do MATLAB para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, amplamente usado em teoria de controle, processamento digital de sinais, sistemas elétricos de potência entre outros, para projeto e simulação multidomínios.

TP – Transformador de potencial, são dispositivos que possuem o enrolamento primário em derivação com o circuito principal e reproduz em seu enrolamento secundário uma tensão cujo valor é função da tensão primária e da relação direta das quantidades de espiras dos enrolamentos, que tem por objetivo reduzir o valor da tensão de um determinado circuito para níveis compatíveis com instrumentos de medição e relés de proteção.

TRIP – Sinal de natureza elétrica enviado por uma função de proteção a um disjuntor de alta tensão para promover sua abertura.

Lista de Símbolos

C chave

- $\cos(\phi_0)$ fator de potência a vazio
- C_{p1}, C_{p2} capacitâncias dos bancos de capacitores dos alimentadores A e B
- F_1, F_2 alimentadores 1 e 2
- f_n frequência nominal
- G_{barra} matriz nodal de condutância
- $G_{\scriptscriptstyle E\!E}~$ matriz condutância da rede externa
- $G_{\rm EF}~$ matriz condutância da rede externa e fronteira
- $G_{\rm FE}~$ matriz condutância da fronteira e rede externa
- $G_{\rm FF}~$ matriz condutância da fronteira
- $G_{\it FF}^{\it eq}$, $Y_{\it FF}^{\it eq}$ matrizes obtidas por redução de Kron
- i_0 corrente a vazio ou de excitação em pu
- I_0 corrente eficaz a vazio
- $i_1,...,i_{13}$ correntes de malha
- I_1, I_2 correntes nos transformadores 1 e 2
- I_{1T1}, I_{1T2} correntes nos primários dos transformadores 1 e 2

 $I_{2T1}^{'}, I_{2T2}^{'}$ correntes nos secundários dos transformadores 1 e 2 referidas ao primário *i* corrente de malha

- *i* derivada em relação ao tempo de *i*
- I matriz identidade
- i_{cc} corrente de curto circuito do transformador em pu
- I_{CC} corrente de curto circuito do transformador
- *I*_{ch} corrente de circulação na chave C

 I_{CT1}, I_{CT2} correntes nas cargas 1 e 2 dos transformadores T_1 e T_2

 I_{CT1} , I_{CT2} correntes nas cargas 1 e 2 referidas aos primários dos transformadores T_1 e T_2

- I_E vetor das correntes da rede externa
- I_F vetor das correntes da fronteira
- *i*_{*fe*} corrente na resistência de magnetização do transformador
- I_1 vetor das correntes da rede interna
- i_m corrente na reatância de magnetização do transformador
- I_n corrente nominal do transformador
- [L] matriz das indutâncias e capacitâncias
- p_0 perdas a vazio do transformador em pu
- P_1, P_2 potências nos enrolamentos do transformador
- p_{cc} perdas de curto circuito do transformador em pu
- P_n potência ativa nominal do transformador
- *pu* por unidade
- [*R*] matriz das resistências elétricas do sistema elétrico

 R_1, L_1 resistência elétrica e indutância do primário do transformador

 R_{11}, L_{11} resistência elétrica e indutância do primário do transformador A, referidas ao secundário

 R_{12}, L_{12} resistência elétrica e indutância do secundário do transformador A R_{1T1}, X_{1T1} resistência elétrica e reatância do primário do transformador 1 R_{1T2}, X_{1T2} resistência elétrica e reatância do primário do transformador 2 R_2, L_2 resistência elétrica e indutância do secundário do transformador R_{21}, L_{21} resistência elétrica e indutância do primário do transformador B R_{22}, L_{22} resistência elétrica e indutância do secundário do transformador B

 R_{c11}, L_{c11} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador A R_{c12}, L_{c12} resistência elétrica e indutância em série do equivalente do alimentador A R_{c13}, L_{c13} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador A R_{c21}, L_{c21} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador B R_{c22}, L_{c22} resistência elétrica e indutância em série do equivalente do alimentador B R_{c23}, L_{c23} resistência elétrica e indutância em série do equivalente do alimentador B R_{c23}, L_{c23} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador B R_{c23}, L_{c23} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador B

R_{ch} resistência elétrica da chave de manobra

 R_{d12}, L_{d12} resistência elétrica e indutância em série do equivalente do alimentador A R_{d13}, L_{d13} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador A R_{d22}, L_{d22} resistência elétrica e indutância em série do equivalente do alimentador B R_{d23}, L_{d23} resistência elétrica e indutância em paralelo do equivalente do alimentador B r_{fe} resistência elétrica de dispersão do transformador

 R_{feT1}, X_{mT1} resistência elétrica de dispersão e reatância de magnetização do transformador 1 R_{feT2}, X_{mT2} resistência elétrica de dispersão e reatância de magnetização do transformador 2 R_m, L_m resistência elétrica e indutância de magnetização do transformador R_{p1}, L_{m1} resistência elétrica e indutância de magnetização do transformador A

 R_{p2}, L_{m2} resistência elétrica e indutância de magnetização do transformador B

 S_1, S_2 subestações 1 e 2

 S_n potência aparente nominal do transformador

 T_1, T_2 transformadores 1 e 2

u vetor de entradas do sistema

- \dot{V} derivada em relação ao tempo de V
- V vetor das fontes de tensão
- V_A, V_B tensões das fontes que representam as subestações $A \in B$
- $V_{\rm 0}~$ tensão eficaz a vazio do transformador
- v_0 tensão a vazio do transformador em pu
- V_1, V_2 tensões do primário e do secundário do transformador

 V_{1T1}, V_{1T2} fontes de tensão

 V_{2T1} , V_{2T2} tensões nos secundários dos transformadores 1 e 2 referidas aos seus primários

- V_{cc} tensão eficaz de curto circuito do transformador
- v_{cc} tensão de curto circuito em pu

 V_{cp1}, V_{cp2} tensões nos capacitores 1 e 2

- \overline{V}_{E} vetor das tensões da rede externa
- 🔽 vetor das tensões da fronteira
- \overline{V}_{I} vetor das tensões da rede interna
- V_n tensão nominal do transformador
- x vetor das varáveis de estado
- *x*_d reatância de dispersão do transformador
- *x_m* reatância de magnetização do transformador

- Y_{EE} matriz das admitâncias da rede externa
- $Y_{\rm EF}~$ matriz das admitâncias da rede externa e fronteira
- Y_{FE} matriz das admitâncias da fronteira e rede externa
- Y_{FF} matriz das admitâncias da fronteira
- Y_{II} matriz das admitâncias da rede interna
- $Y_{_{FI}}$ matriz das admitâncias da fronteira e rede interna
- Y_{IF} matriz das admitâncias da rede interna e fronteira

 Z_{CT1}, Z_{CT2} impedâncias das cargas 1 e 2

 Z_{CT1} , Z_{CT2} impedâncias das cargas 1 e 2 referidas aos primários dos transformadores T_1 e T_2

 z_{cc} impedância de curto circuito do transformador em pu

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional dedicada ao estudo de paralelismo entre alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica, denominada Gerenciador de Paralelismo de Alimentadores Radiais de Distribuição (GPARD). O GPARD realiza a simulação de manobras de paralelismo entre dois alimentadores de distribuição localizados na mesma subestação ou em subestações diferentes, derivados do mesmo transformador ou de transformadores diferentes.

O GPARD é uma contribuição na área de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica trazendo flexibilidade operacional ao sistema, pois é uma ferramenta computacional que auxilia os operadores do sistema na tomada de decisão para a realização ou não de manobras de paralelismo entre dois alimentadores de distribuição fundamentada na análise gráfica de resultados de simulação e de medições remotas.

A motivação para este estudo surgiu da constatação da carência de informações sobre o assunto e da ausência de uma ferramenta computacional simples nas concessionárias de energia elétrica que auxilie os operadores do sistema na realização de manobras de paralelismo que, ainda nos dias de hoje, são realizadas respaldadas somente nas suas experiências individuais acumuladas ao longo do tempo. Neste contexto, o GPARD atende à necessidade das concessionárias de ferramentas computacionais com interfaces gráficas que utilizem sua base de dados permitindo uma visualização real de seus sistemas elétricos servindo de suporte aos profissionais de diferentes setores na tomada de decisões fundamentadas na visualização gráfica de simulações e medições do sistema de distribuição.

O desenvolvimento do GPARD pode ser dividido em quatro etapas constituídas de etapas de desenvolvimento e de validação descritas na sequência do trabalho.

Na primeira etapa com as informações de um sistema de distribuição real, fornecidas pela concessionária de energia elétrica, foram implementados modelos teóricos deste "sistema de distribuição" nos programas SimPowerSystems do MATLAB¹ e PSCAD. As simulações realizadas com estes modelos teóricos tiveram como objetivo analisar a viabilidade da realização das manobras de paralelismo no sistema de distribuição e serviram para o desenvolvimento do GPARD.

As preocupações dos operadores do sistema para a realização das manobras de paralelismo no sistema de distribuição eram os transitórios de tensão e de corrente na chave de manobra e nos transformadores de potência dos alimentadores, que foram analisados com o SimPowerSystems, e as atuações das proteções de sobrecorrente dos transformadores de potência, decorrentes destas manobras de paralelismo, que foram analisadas com o PSCAD.

Na segunda etapa o objetivo foi obter as equações diferenciais que fundamentam a modelagem matemática do GPARD obtidas a partir do modelo monofásico equivalente do sistema de distribuição. Para isso o sistema de distribuição foi reduzido a um modelo equivalente trifásico, utilizando-se a técnica de equivalentes externos (método de redução de Kron). Através de simulações com o SimPowerSystems verificou-se que o modelo trifásico consegue reproduzir as mesmas características transitórias das tensões e das correntes do

¹ MATLAB/Simulink/SimPowerSystem: Simulink é o pacote de programas para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. SimPowerSystem é o aplicativo do Simulink para simulação de sistemas elétricos que compõem o MATLAB.

sistema de distribuição original. Desse modelo trifásico obteve-se o modelo monofásico que foi equacionado através de equações diferenciais que fundamentam o GPARD.

A terceira etapa do desenvolvimento do GPARD consiste na integração da modelagem matemática com a interface gráfica que foi desenvolvida usando o aplicativo GUIDE² do MATLAB para criação de interfaces gráficas para interação com o usuário.

A quarta etapa consiste na validação do GPARD e dos modelos teóricos implementados no SimPowerSystems e no PSCAD através dos resultados das medições em campo das manobras de paralelismo realizadas com os alimentadores do sistema de distribuição real.

Os capítulos da tese estão organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma introdução ao estudo de paralelismo de alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica fundamentada na revisão bibliográfica.

O capítulo 3 apresenta a primeira etapa do desenvolvimento do GPARD que consiste na apresentação do sistema real, denominado como sistema de distribuição Guarujá, cujas informações fornecidas pela concessionária de energia elétrica serviram para implementar modelos teóricos do sistema nos programas SimPowerSystems e PSCAD. Através de simulações de manobras de paralelismo entre dois alimentadores de distribuição obteve-se o comportamento dos transitórios de tensão e de corrente na chave de manobra e nos transformadores de potência, verificando-se a possibilidade da atuação das proteções de sobrecorrente destes transformadores e a viabilidade da realização dessas manobras de paralelismo neste sistema.

O capítulo 4 apresenta a segunda etapa do desenvolvimento do GPARD onde o sistema de distribuição Guarujá foi reduzido a um modelo equivalente trifásico, utilizando-se a técnica de equivalentes de externos (método de redução de Kron), de onde se obteve o modelo

² GUIDE (graphical user interface development environment) é o aplicativo de criação de interfaces gráficas do MATLAB para interação com o usuário.

monofásico que foi equacionado originando as equações diferenciais que fundamentam o GPARD.

O capítulo 5 apresenta a última etapa do desenvolvimento do GPARD que consiste na integração da modelagem matemática com a interface gráfica desenvolvida com o aplicativo GUIDE do MATLAB para criação de interfaces gráficas.

O capítulo 6 apresenta a quarta etapa que consiste na validação da ferramenta computacional GPARD e dos modelos teóricos implementados no SimPowerSystems e no PSCAD, através dos resultados das medições em campo em manobras de paralelismo entre os alimentadores GUT40 e GUT realizadas no sistema de distribuição Guarujá.

O capítulo 7 apresenta as conclusões e as considerações finais para trabalhos futuros.
Capítulo 2

Paralelismo entre Alimentadores Radiais de Distribuição de Energia Elétrica

Este capítulo apresenta uma introdução ao estudo de paralelismo entre alimentadores radiais de distribuição fundamentada na revisão bibliográfica. Constatou-se que na literatura, tanto em artigos publicados em anais de conferências quanto em revistas internacionais, existe uma carência de trabalhos sobre o tema de paralelismo de alimentadores de sistemas elétricos de distribuição.

A manobra de paralelismo de alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica é uma operação necessária nos sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica, normalmente realizada para interligação de curta duração para atender a transferência de carga entre os alimentadores ou em paradas programadas para manutenção dos transformadores de potência (PONCE 2008).

(THOMPSON 2000) e (JAUCH 2001) mencionam que para a operação de paralelismo seja bem sucedida, é necessário considerar alguns fatores importantes: a) nem sempre os transformadores estão próximos entre si, podendo estar conectados a barramentos de subestações diferentes, b) os transformadores normalmente não possuem parâmetros exatamente idênticos, principalmente quando são de fabricantes distintos ou são de potências diferentes, c) em geral, podem estar alimentando cargas de valores distintos.

Para analisar estes problemas será utilizada a Figura 2.1 que é uma representação simplificada da operação em paralelo de dois transformadores (T_1 e T_2) que alimentam as cargas Z_{CT1} e Z_{CT2} , respectivamente, pelo fechamento da chave *C*.



Figura 2.1 – Operação de paralelismo de dois transformadores.

Considerando dois casos: no primeiro os transformadores T_1 e T_2 da Figura 2.1 estão distantes entre si, mas ligados à mesma subestação (mesma tensão de entrada) possuindo parâmetros distintos (fabricantes diferentes ou de potências diferentes) e que alimentam cargas desiguais ($Z_{CT1} \neq Z_{CT2}$). Durante a operação em paralelo surge uma corrente de circulação I_{ch} após o fechamento da chave *C*, conforme apresentado na Figura 2.1. O mesmo pode acontecer quando dois transformadores estão operando em paralelo ligados a barramentos distintos (fontes de tensão separadas com tensões diferentes), nesse caso, a corrente de circulação pode ser ainda maior, devido à maior probabilidade das tensões de alimentação destes transformadores apresentarem maiores defasagens angulares ou diferenças de amplitude.

A diferença entre os valores dos parâmetros dos transformadores T_1 e T_2 , com tensões de alimentação idênticas e cargas iguais, também ocasiona o aparecimento da corrente de circulação I_{ch} . Isto se deve ao fato de que, com a diferença destes parâmetros os valores das tensões nos pontos 1 e 2 da Figura 2.1 são também diferentes, ou seja, as relações entre as tensões dos enrolamentos primário e secundário de cada transformador não são iguais, produzindo a corrente I_{ch} que, como no caso anterior, iguala estas relações (*taps*) após o fechamento da chave *C*.

Outro fator citado anteriormente e que causa o surgimento da corrente de circulação após o fechamento da chave *C*, é a alimentação de cargas desequilibradas pelos transformadores T_1 e T_2 (mesmo que operem com tensões de alimentação idênticas e tenham parâmetros iguais). Isto ocorre porque, quando a chave *C* estiver aberta e houver diferenças nos valores destas cargas, tais transformadores apresentam perdas diferentes em seus enrolamentos (representadas por quedas de tensões diferentes em seus modelos de circuito elétrico equivalente), causando uma diferença nas relações entre as tensões dos enrolamentos primário e secundário de cada transformador (*taps*).

Para melhor ilustrar estas características da operação de transformadores ligados em paralelo tem-se, na Figura 2.2, a representação desta operação através do modelo de circuito elétrico equivalente de dois transformadores T_1 e T_2 , referidos a um dos enrolamentos.



Figura 2.2 – Modelo de circuito elétrico equivalente da operação em paralelismo.

Na Figura 2.2, observa-se que quando as tensões de alimentação V_{1T1} e V_{1T2} são diferentes (barramentos distintos ou transformadores distantes), considerando os parâmetros dos transformadores como sendo idênticos e cargas $Z'_{CT1} e Z'_{CT2}$ iguais, tem-se que as tensões V'_{2T1} e V'_{2T2} nos secundários também são distintas entre si quando a chave *C* estiver aberta. No entanto, ao se fechar esta chave, surgirá uma corrente I_{ch} entre os nós 1 e 2 da Figura 2.2, uma vez que, nesta nova configuração, as tensões V'_{2T1} e V'_{2T2} são iguais e as tensões V_{1T1} e V_{1T2} continuam distintas. Assim, esta corrente de circulação através da chave surge devido às diferenças entre as relações de tensão V_{1T1}/V'_{2T1} e V_{1T2}/V'_{2T2} (*taps*) destes transformadores, a fim de se obter o novo equilíbrio do sistema.

Quando as tensões de alimentação V_{1T1} e V_{1T2} são idênticas e as cargas $Z'_{CT1} e Z'_{CT2}$ também, porém os transformadores são diferentes (parâmetros distintos), novamente a corrente I_{ch} surge ao ser fechada a chave *C*, uma vez que as tensões V'_{2T1} e V'_{2T2} são diferentes antes de seu fechamento. Por último, quando as tensões V_{1T1} e V_{1T2} são iguais e os transformadores são idênticos, porém as cargas $Z'_{CT1} e Z'_{CT2}$ são diferentes, também surge a corrente de circulação na chave Capós o seu fechamento já que, antes disso, as tensões V'_{2T1} e V'_{2T2} eram diferentes devido às maiores perdas nos enrolamentos do transformador com maior carga havendo maior queda de tensão no circuito equivalente do transformador da Figura 2.2 com maior carga.

Supondo uma situação ideal, em que os transformadores T_1 e T_2 da Figura 2.2 sejam idênticos, com tensões de alimentação e cargas iguais, não há o surgimento da corrente de circulação I_{ch} na chave *C* após o seu fechamento, ou seja, tudo se passa como se tal chave não existisse uma vez que não há diferenças nos *taps* destes transformadores.

Um dos problemas operacionais causados pela corrente de circulação I_{ch} , é que quando esta atinge valores muito elevados, ocorre um significativo aumento das perdas ôhmicas nos enrolamentos dos transformadores que operam em paralelo.

Com isso ocorre um sobreaquecimento nos transformadores à medida que esta corrente aumenta, podendo acarretar sérios danos à isolação deles, além de outros problemas, como a diminuição do rendimento dos transformadores. Além disso, quando as tensões instantâneas entre os nós 1 e 2 da Figura 2.2 são muito diferentes, é preciso levar em conta que esta corrente pode assumir valores muito elevados quando se fecha a chave *C*.

A manobra de paralelismo de alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica é uma operação necessária na operação de sistemas de distribuição inteligentes das concessionárias de energia elétrica. Essa manobra consiste no paralelismo (fechamento em anel), através de uma chave de manobra, entre dois alimentadores de distribuição, normalmente realizada para transferência de carga entre os alimentadores, para paradas programadas para manutenção ou em caso de contingências. Entretanto, esse recurso somente tem sido usado para interligação de curta duração atualmente.

Conforme apresentado em (HUANG 2002), (CHEN 2004) e (SANTOS 2008), dependendo da localização e da derivação dos alimentadores, as manobras de paralelismo podem ser classificadas como: Tipo I, Tipo II e Tipo III, descritos na seqüência.

Tipo I: Nesse arranjo os alimentadores F_1 e F_2 estão localizados na mesma subestação e são derivados do mesmo transformador, conforme apresentado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Tipo I: alimentadores derivados do mesmo transformador.

Esta manobra é realizada nas concessionárias porque dentre os três arranjos é o mais simples e o mais viável por apresentar um número menor de restrições. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados, observando-se as seguintes características dos alimentadores: a) dimensões (comprimentos, ramais), b) carregamento, c) característica das cargas nos alimentadores, d) bloqueio dos relés de religamento rápido dos disjuntores dos alimentadores, e) a somatória das correntes nos dois alimentadores não deve ultrapassar a capacidade de um único alimentador. O problema operacional que pode surgir com esta manobra é o valor da corrente de circulação na chave de manobra, que pode fazer operar os relés de sobrecorrente das proteções e desarmar os disjuntores dos alimentadores envolvidos.

Tipo II: Nesse arranjo os alimentadores F_1 e F_2 estão localizados na mesma subestação, mas são derivados de diferentes transformadores T_1 e T_2 , conforme apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Tipo II: alimentadores derivados de diferentes transformadores.

É um arranjo de complexidade maior do que o do Tipo I, porque apresenta um maior numero de restrições. Por isso, as concessionárias não executam este tipo de manobra com frequência sendo que algumas delas nem sequer a executam, seja devido à falta de controle na segurança, nas medidas técnicas ou pelo conservadorismo adotado por falta de uma sistemática de operação, ou até pelo desconhecimento dos fenômenos físicos consequentes deste tipo de manobra (SANTOS 2008). Além dos cuidados apresentados para o arranjo do Tipo I, devem ser consideradas, adicionalmente, as seguintes características dos alimentadores: a) diferença das capacidades dos transformadores, b) impedâncias dos transformadores, c) níveis de tensão e posicionamento dos seletores de *taps* dos transformadores. Dentre os problemas operacionais que podem surgir desta manobra estão: o fluxo de corrente que atravessa a chave de manobra, cujo sentido é determinado pelo alimentador de maior carregamento, e o fechamento dos pólos da chave de manobra que no caso de um contato mal fechado pode provocar uma resistência de contato alta, gerando um aquecimento, que pode destruir a chave de manobra.

Tipo III: Nesse arranjo os alimentadores F_1 e F_2 são derivados de diferentes transformadores T_1 e T_2 , localizados em diferentes subestações S_1 e S_2 , conforme apresentado na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Tipo III: alimentadores derivados de diferentes transformadores localizados em diferentes subestações.

Esta é a pior condição de manobra a ser executada na formação de paralelismo entre dois alimentadores. Os cuidados e as restrições aumentam quando se interliga duas subestações através de seus circuitos aéreos primários por isso, este tipo de manobra é evitado nas concessionárias de energia.

As subestações não têm seus equipamentos padronizados, ou seja, muitos transformadores com impedâncias e carregamentos diferentes e alimentadores com características de carga diversas. Além dos cuidados adotados nas manobras dos Tipos I e II, devem ser consideradas as seguintes características das subestações: a) potência de curtocircuito no lado primário das subestações envolvidas, b) níveis de tensão das subestações, c) ângulo de fase e tensão das linhas que alimentam as subestações.

Como nos casos anteriores, quando os alimentadores estiverem operando em anel, têmse os problemas operacionais citados nos arranjos dos tipos I e II e ainda a preocupação com a defasagem angular da tensão primária das subestações. Se houver uma defasagem angular acima de 30° não se deve executar qualquer manobra de fechamento em anel, pois o nível de tensão entre os pólos da chave de manobra, de uma mesma fase, pode provocar uma sobrecorrente, prejudicando o equipamento e podendo causar um acidente quando houver eletricista operando na rede (SANTOS 2008).

A maioria dos trabalhos sobre paralelismo de alimentadores radiais de distribuição apresenta metodologias e procedimentos visando a execução da manobra de paralelismo sempre respeitando os limites de operação do sistema sem que ocorram paralisações no fornecimento de energia para os consumidores decorrentes do paralelismo.

Os casos estudados são normalmente de transferência de carga com os alimentadores operando em paralelo durante curtos períodos de tempo. As metodologias utilizadas são similares, o sistema de distribuição é implementado em um programa de simulação de sistemas elétricos (ATP, MATLAB, PSCAD) e, através de simulações, verifica-se a viabilidade da realização das manobras de paralelismo neste sistema.

Quando as manobras são realizadas no sistema de distribuição os resultados em campo são comparados com os resultados obtidos em simulação para validar os modelos

43

implementados ou os procedimentos propostos para realização das manobras (BERNARDOM 2006).

Estudos mais recentes (LOPES 2009) e (BERMAN 2010) propõem a operação de paralelismo dos alimentadores durante períodos mais longos de tempo, como uma possível solução para os problemas operacionais como: carregamento, queda nos limites de tensão e perdas de energia nos alimentadores e considerando o lado econômico um meio de postergação da necessidade de investimento na reforma da rede. A melhora no desempenho individual de cada alimentador seria o resultado da melhor distribuição de carga entre eles, através do aumento da margem de operação pela diminuição da carga individual de cada um.

Entretanto essa operação prolongada pode provocar um aumento nos índices de interrupção de fornecimento de energia para os consumidores. Isto ocorre porque o uso de chaves convencionais de manobras neste tipo de operação desliga ambos os alimentadores caso ocorra um defeito na linha troncal³ de um deles.

Em (PONCE 2008) foi apresentada uma solução para este problema que consiste no uso de religadores com duplo relé de direcionalidade (funções 67 e 67N). Este recurso permite a localização e eliminação automática do trecho da rota troncal com defeito, sem perturbar os demais consumidores, além de não depender de comunicação entre os equipamentos, tornando–se um modelo inovador para automação de redes de distribuição.

Na literatura os trabalhos encontrados na sua maioria são referentes a estudos realizados nos sistemas de distribuição da Taiwan Power Company, dentre estes trabalhos podem ser citados: (CHEN 1995 e 2004), (HUANG 2002), (LEE 2006).

No Brasil poucos trabalhos foram encontrados sobre paralelismo de alimentadores de distribuição, os já citados anteriormente (PONCE 2008) e (SANTOS 2008), e os trabalhos de (SOARES 2005) e (BERNARDOM 2006).

Em (SOARES 2005) é apresentado um estudo de paralelismo de alimentadores de distribuição pertencentes à mesma subestação e supridos por diferentes transformadores. O objetivo deste estudo foi analisar o impacto dos transitórios de tensão e de corrente resultantes

³ As redes primárias de distribuição de energia elétrica contam com um tronco principal do qual se derivam ramais, que usualmente são protegidos por fusíveis (KAGAN 2005).

das manobras de paralelismo nos transformadores de potência e na chave de manobra. O sistema foi implementado no SimPowerSystems e, através de simulações, verificou-se os transitórios de tensão e de corrente nos transformadores de potência e na chave de manobra. Considerando os resultados dos estudos prévios, as manobras de paralelismo foram realizadas com sucesso no sistema de distribuição.

Em (BERNARDOM 2006) a proposta do trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica para desligamentos programados que envolviam manobras em anel nas redes de distribuição atendidas por subestações de diferentes fontes, através do uso do programa ATP. O objetivo destas análises foi evitar o desligamento de consumidores, durante um curto espaço de tempo, para fechamento e/ou abertura de equipamentos de manobra. Os estudos elétricos foram realizados considerando-se aspectos de carregamento, tensão e proteção, em regime permanente e transitório. Como estudo de caso foi analisado a solicitação de um desligamento programado de uma subestação do sistema em estudo.

Não se pode conceber um sistema de distribuição de redes elétricas inteligentes sem a possibilidade de execução de paralelismo entre alimentadores produzindo redes conectadas em anel.

Capítulo 3

Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Este capítulo apresenta a primeira etapa do desenvolvimento do GPARD, onde é apresentado o sistema de distribuição de energia elétrica que serviu de base para o desenvolvimento da modelagem matemática do GPARD. Com as informações fornecidas pela concessionária o sistema foi implementado nos programas SimPowerSystems e PSCAD. Através de simulações com o SimPowerSystems e o PSCAD verificou-se a viabilidade da realização de manobras de paralelismo neste sistema de distribuição. As preocupações dos operadores do sistema para a realização dessas manobras no sistema eram os transitórios de tensão e de corrente na chave de manobra e nos transformadores de potência dos alimentadores e a possibilidade das atuações indevidas das proteções destes transformadores devido às manobras de paralelismo.

3.1 Apresentação do Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição estudado pertence à rede urbana de energia elétrica de uma concessionária de energia elétrica, localizado na cidade do Guarujá no estado de São Paulo, situada na região litorânea que possui características de cidade turística. O sistema de distribuição possui pouco mais de 3,7 mil km de extensão de rede primária atendendo a 203,8 mil unidades consumidoras.

Por conveniência o sistema de distribuição estudado será referido como "sistema Guarujá", mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Planta de localização dos alimentadores do sistema Guarujá.

O sistema Guarujá é uma rede de distribuição primária radial, constituída por dois alimentadores GUT40 e GUT47, localizados na mesma subestação, derivados de dois transformadores sendo um de 25 MVA – 144,9-13,8 kV e outro de 15 MVA – 144,9-13,8 kV, conforme apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Diagrama unifilar dos alimentadores GUT40 e GUT47.

Os alimentadores GUT40 e GUT47 apresentam características similares, suprem cargas predominantemente residenciais, ambos os alimentadores apresentam bancos de capacitores de 1,2 MVAr em trechos próximos da chave de manobra (chave normalmente aberta NA) que pode ser fechada para interligar os mesmos numa manobra de paralelismo.

As preocupações dos operadores do sistema para a realização das manobras de paralelismo no sistema Guarujá eram os transitórios de tensão e de corrente na chave de manobra (1732) e nos transformadores de 15 e 25 MVA e a possibilidade da atuação indevida das proteções destes transformadores.

Na implementação do sistema Guarujá no SimPowerSystems foram consideradas as seguintes informações fornecidas pela concessionária: a) parâmetros dos alimentadores por unidade de comprimento, tipo de condutor e carga acumulada no trecho, b) relatório dos ensaios a vazio e de curto-circuito dos transformadores de 15 e 25 MVA.

Entretanto para implementar o sistema no SimPowerSystems foi necessário primeiro calcular os parâmetros dos transformadores de 25 e 15 MVA de acordo com o exigido na interface do programa, para isso foram utilizadas as informações do relatório de ensaios do fabricante de cada transformador (Anexo).

Nas Tabelas 3.1 a 3.3 são apresentadas as características técnicas do transformador de 25 MVA do alimentador GUT40.

Potência (MVA)	25
Tensão AT (kV)	144,9
Tensão BT (kV)	13,8
Corrente AT (A)	99,61
Corrente BT (A)	1045,92
Ligação	Yyd

Tabela 3.1 – Dados nominais do transformador

Tabela 3.2 – Dados do ensaio de curto-circuito

Vcc (kV)	15,52
Pcc (kW)	75,64
Icc (A)	99,61

Tabela 3.3 – Dados do ensaio a vazio

Vo (kV)	13,8
P _o (kV)	19,91
Io (kV)	1,2

A metodologia para a determinação de parâmetros de transformadores trifásicos a partir dos ensaios de curto-circuito e a vazio é apresentada no Apêndice A.

Usando as equações (A.1) a (A.14) foram calculados os parâmetros do transformador de 25 MVA em *pu*,

$$v_{cc} = \frac{15,52}{144,9} = 0,1071pu$$

$$p_{cc} = \frac{75,64}{25000} = 0,0030pu$$

$$i_{cc} = \frac{99,61}{99,61} = 1,0pu$$

$$z_{cc} = \frac{0,1071}{1,0} = 0,1071pu$$

$$r_{cc} = \frac{0,0030}{1,0} = 0,0030pu$$

$$x_{d} = \sqrt{0,1071^{2} - 0,0030^{2}} = 0,1071pu$$

$$v_{o} = \frac{13,8}{13,8} = 1,0pu$$

$$i_{o} = \frac{1,2}{1045,92} = 0,001147pu$$

$$p_{o} = \frac{19,91}{25000} = 0,0007964pu$$

$$cos(\phi_{o}) = \frac{0,0007964}{0,001147} = 0,6943$$

$$\phi_{o} = 46,03^{\circ}$$

$$sen(\phi_{o}) = 0,7197$$

$$\begin{split} i_{fe} &= 0,001147 * 0,6943 = 0,0007964 \, pu \\ i_m &= 0,001147 * 0,7197 = 0,0008254 \, pu \\ r_{fe} &= \frac{1,0}{0,0007964} = 1255,9 \, pu \\ x_m &= \frac{1,0}{0,0008254} = 1210,6 \, pu \end{split}$$

A Tabela 3.4 apresenta os valores dos parâmetros em *p.u.* do transformador de 25 MVA.

Tabela 3.4 - Valores das resistências e reatâncias

rcc	$\boldsymbol{\chi}_d$	r fe	χ_m
0,0030	0,1071	1255,9	1210,6

A Figura 3.3 mostra o circuito equivalente por fase do transformador de 25 MVA utilizado pelo SimPowerSystems (MATHWORKS 2003).



Figura 3.3 - Circuito equivalente do transformador de 25 MVA.

A Figura 3.4 mostra a interface do transformador trifásico de 25 MVA no SimPowerSystems preenchida com os parâmetros calculados anteriormente.

This block implements a three-phase tr ransformers. Set the winding connecti wint of the Wye. arameters	ansfo <mark>rmer</mark> by u on to 'Yn' whe	sing three <mark>single-ph</mark> n you want to acce	ase ss the neutral
arameters			
Nominal power and frequency [Pn(V/	A) , fn(Hz)]		
[25e6,60]			
Winding 1 (ABC) connection : Yg			•
Winding parameters [V1 Ph-Ph(Vrms)	, R1(pu) , L1(p	u)]	
[144900 , 0.0015 , 0.05355]			
Winding 2 (abc) connection : Yg			*
Winding parameters [V2 Ph-Ph(Vms)	, R2(pu) , L2(p	u)]	
[13800 , 0.0015 , 0.05355]			
Saturable core			
Magnetization resistance Rm (pu)			
1255.9			
Magnetization reactance Lm (pu)			
1210.6			
Measurements All measurements (V I	Fluxes)		
Show additional paran	neters		

Figura 3.4 – Interface do transformador de 25 MVA.

Nas Tabelas 3.5 e 3.6 são apresentados os dados do transformador de 25 MVA e da rede do alimentador GUT40.

Valores Nominais			Ensaio em Vazio			
V_1 (kV)	V2 (kV)	S _n (MVA)	V_0 (kV)	Io (A)	Po (k	W)
144,9	13,8	25	13,8	1,2	19,9	91
Ensai	o de Curto C	Circuito		Parâmetros	em (pu)	
Vcc (kV)	Icc (A)	Pcc (kW)	rcc	Xd	r fe	Xm
15,52	99,61	75,64	0,003	0,1071	1255,9	1210,6

Tabela 3.5 – Dados do transformador de 25 MVA.

Trecho	Ponto	Potência Instalada (kVA)	Máxima Demanda (kVA)	Fator de Potência	Cabo ⁴	Comprimento (m)
SE -00	00	-	-	-	240 mm ²	30
00-01	01	75,0	56,0	0,956	CC - 4/0	283
01-02	02	0,0	0,0	0,956	CC – 4/0	70
02-03	03	45,0	38,0	0,956	CC – 4/0	140
02-04	04	225,0	152,0	0,956	CC – 4/0	506
01-05	05	345,0	74,0	0,956	CC – 4/0	494
05-06	06	5038,0	675,0	0,956	CC – 4/0	580
06-07	07	645,0	76,0	0,956	CC – 4/0	164
07-08	08	1763,0	260,0	0,956	CC – 4/0	143
08-09	09	4850,0	720,0	0,956	CC – 4/0	700
07-10	10	150,0	28,0	0,956	CC – 4/0	90
09-11	11	6.012,0	1147,0	0,956	CC – 4/0	211
05-12	12	1762,0	290,0	0,956	CC – 4/0	206

Tabela 3.6 - Dados do alimentador GUT40.

Para calcular o valor da impedância de cada trecho do alimentador GUT40 foi multiplicado o valor da impedância do cabo pelo seu comprimento em km, por exemplo, Trecho 00-01 cabo CC – 4/0, z = (0,1883 + j0,4084)*0,283 = (0,0533 + j0,1156) Ω .

Para a determinação dos parâmetros do transformador de 15 MVA do alimentador GUT47 foi realizada a mesma sequência de cálculos apresentada anteriormente.

Nas Tabelas 3.7 a 3.9 são apresentadas as informações técnicas do transformador de 15 MVA do alimentador GUT47 obtidas do seu relatório de ensaio (Anexo).

Tabela 3.7 – Dados nominais do transformador

Potência (MVA)	15
Tensão AT (kV)	144,9
Tensão BT (kV)	13,8
Corrente AT (A)	59,77
Corrente BT (A)	627,55
Ligação	Yyd

⁴ Impedância de seqüência positiva: Cabo de cobre $4/0 - (0,1883 + j0,4084) \Omega/km$.

Tabela 3.8 – Dados do ensaio de curto-circuito

Vcc (kV)	12,49
Pcc (kW)	72,38
Icc (A)	59,77

Tabela 3.9 – Dados do ensaio a vazio

Vo (kV)	13,8
P _o (kV)	23,63
Io (kV)	4,068

Com as informações dos ensaios de rotina foram calculados os parâmetros do transformador de 15 MVA, em *pu*.

$$v_{cc} = \frac{12,49}{144,9} = 0,0862 \, pu$$

$$p_{cc} = \frac{72,38}{15000} = 0,0048 \, pu$$

$$i_{cc} = \frac{59,77}{59,77} = 1,0 \, pu$$

$$z_{cc} = \frac{0,0862}{1,0} = 0,0862 \, pu$$

$$r_{cc} = \frac{0,0048}{1,0} = 0,0048 \, pu$$

$$x_{d} = \sqrt{0,0862^{2} - 0,0048^{2}} = 0,0861 \, pu$$

$$v_{o} = \frac{13,8}{13,8} = 1,0 \, pu$$

$$i_{o} = \frac{4,068}{627,55} = 0,00648 \, pu$$

$$p_{o} = \frac{23,63}{15000} = 0,001575 \, pu$$

$$cos(\phi_{o}) = \frac{0,001575}{0,00648} = 0,243$$

$$\phi_{o} = 75,94^{\circ}$$

$$s en(\phi_o) = 0,970$$

$$i_{fe} = 0,00648 * 0,243 = 0,001575 pu$$

$$i_m = 0,00648 * 0,970 = 0,006286 pu$$

$$r_{fe} = \frac{1,0}{0,001575} = 634,9 pu$$

$$x_m = \frac{1,0}{0,006286} = 159,0 pu$$

A Tabela 3.10 apresenta os valores dos parâmetros em *pu* do transformador de 15 MVA.

Tabela 3.10 – Valores das resistências e reatâncias

Г сс	χ_d	r fe	χ_m
0,0048	0,0861	634,9	159,08

A Figura 3.5 mostra o circuito equivalente por fase do transformador de 15 MVA.



Figura 3.5 – Modelo equivalente do transformador de 15 MVA.

A Figura 3.6 apresenta a interface do transformador trifásico de 15 MVA no SimPowerSystems preenchida com os parâmetros calculados anteriormente.

hree-Phase Transformer (Two	Windings) (mask) (link)	
This block implements a three-p transformers. Set the winding co point of the Wye.	phase transformer by using three single-phas onnection to 'Yn' when you want to access	e the <mark>neu</mark> tral
arameters		
Nominal power and frequency	[Pn(VA) , fn(Hz)]	
[15e6,60]		
Winding 1 (ABC) connection :	Yg	•
Winding parameters [V1 Ph-Ph	h(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)]	
[144900 , 0.0024 , 0.0431]		
Winding 2 (abc) connection :	Yg	•
Winding parameters [V2 Ph-Ph	h(Vrms) , R2(pu) , <mark>L2(pu)</mark>]	
[13800 , 0.0024 , 0.0431]		
Saturable core		
Magnetization resistance Rm ((pu)	
634.9		
Magnetization reactance Lm (p	ou)	
159		
Measurements All measureme	ents (V I Fluxes)	•
Show addition	al parameters	
	1440 AV	

Figura 3.6 – Interface do Transformador de 15 MVA.

Nas Tabelas 3.11 e 3.12 são apresentados os dados do transformador de 15 MVA e da rede do alimentador GUT40.

V	alores Nomi	nais	Ensaio em Vazio				
V1 (kV)	V2 (kV)	S _n (MVA)	V_0 (kV)	$I_0(A)$	Po (kW)		
144,9	13,8	15	13,8	4,068	23,63		
Ensai	io de Curto O	Circuito	Parâmetros em (pu)				
Vcc (kV)	Icc (A)	Pcc (kW)	r _{cc}	Xd	r fe	Xm	
12,49	59,77	72,38	0,0048	0,0861	634,89	159,03	

Tabela 3.11 – Dados do transformador de 15 MVA

Trecho	Ponto	Potência Instalada (kVA)	Máxima Demanda (kVA)	Fator de Potência	Cabo	Comprimento (m)
SE -00	00	-	-	-	CA - 336	30
00-01	01	112,5	92,0	0,962	CC - 4/0	518
01-02	02	75,0	64,0	0,962	CC – 4/0	364
02-03	03	90,0	67,0	0,962	CC – 4/0	215
03-04	04	825,0	178,0	0,962	CC – 4/0	605
04-05	05	5388,0	1675,0	0,962	CC – 4/0	285
05-06	06	4800,0	1149,0	0,962	CC – 4/0	232
06-07	07	675,0	64,0	0,962	CC – 2/0	158
06-08	08	10584,0	2125,0	0,962	CC – 4/0	276
08-09	09	6430,0	840,0	0,962	CC – 4/0	127
06-10	10	225,0	54,0	0,962	CC – 4/0	65
08-11	11	4957,0	631,0	0,962	CC – 4/0	356
05-12	12	1375,0	321,0	0,962	CC – 4/0	143

Tabela 3.12 - Dados do alimentador GUT47

Para calcular o valor da impedância de cada trecho do alimentador GUT47 foi multiplicado o valor da impedância do cabo pelo seu comprimento em km, por exemplo, Trecho 00-01 cabo CC – 4/0, $z = (0,1883 + j0,4084)*0,518 = (0,0975 + j0,2116) \Omega$.

3.2 Simulações com o SimPowerSystems

Para verificar a viabilidade das manobras de paralelismo entre os alimentadores GUT40 e GUT47 foram feitas as seguintes simulações: a) análise da corrente e da tensão na chave de manobra, b) análise das correntes nos secundários dos transformadores de 15 e 25 MVA, c) análise das tensões nos secundários dos transformadores de 15 e 25 MVA, d) análise do comportamento das proteções de sobrecorrente nos transformadores de 15 e 25 MVA. Com as informações fornecidas pela concessionária, o sistema Guarujá foi implementado no SimPowerSystem, conforme apresentado na Figura 3.7.



Figura 37 – Sistema Guarujá implementado no SimPowerSystem.

As simulações tiveram como dados: a) tempo de simulação de 0,5 s, b) chave de manobra com duas transições, partindo da posição aberta. Na primeira transição a 0,2 s a chave de manobra é fechada e os alimentadores passam a operar em paralelo. Na segunda transição a 0,4 s a chave de manobra é aberta, e os alimentadores retornam a operar radialmente.





Figura 3.8 – Correntes na chave de manobra.



A Figura 3.9 mostra os gráficos das tensões na chave de manobra.

Figura 3.9 – Tensões na chave de manobra.

Pela análise dos resultados das simulações das correntes na chave de manobra, Figura 3.8, observa-se que, no fechamento da chave em 0,2 s surgem, sobrecorrentes nas três fases com valores instantâneos de aproximadamente 225 A. Esses transitórios são esperados porque são inerentes a manobras de chaveamento (ARAUJO 2005).

Pela análise das tensões na chave de manobra, Figura 3.9, pode-se observar que na reabertura da chave de manobra em 0,4 s, ocorreram sobretensões nas três fases com valores instantâneos de aproximadamente 925 V. Estes transitórios são resultantes da presença de bancos de capacitores de 1,2 MVAr em trechos próximos da chave de manobra em ambos os alimentadores GUT40 e GUT47. Isto pode ser comprovado pela análise dos resultados da Figura 3.10, onde as simulações foram realizadas com os alimentadores GUT40 e GUT47 sem banco de capacitores próximos à chave de manobra.



Figura 3.10 – Tensões na chave de manobra com os alimentadores GUT40 e GUT47 sem banco de capacitores.



A Figura 3.11 mostra os gráficos das correntes no secundário do transformador de 15 MVA.

Figura 3.11 – Correntes no transformador de 15 MVA.



A Figura 3.12 apresenta os gráficos das correntes no secundário do transformador de 25 MVA.

Figura 3.12 – Correntes no transformador de 25 MVA.

Pela análise dos resultados das correntes nos secundários dos transformadores de 15 e 25 MVA, Figuras 3.11 e 3.12, pode-se concluir que, durante o período em que os alimentadores GUT40 e GUT47 estão operando em paralelo, ocorre uma redistribuição no fluxo de carga entre os alimentadores, que neste caso, resulta numa diminuição na solicitação de corrente do transformador de 15 MVA do alimentador GUT47, de aproximadamente 150 A, Figura 3.11.

Isto ocorre porque o transformador de 25 MVA do alimentador GUT40, por possuir maior potência e por não estar sobrecarregado assume, durante o período em que estão em paralelo, parte da carga do transformador de 15 MVA, aliviando assim a carga no alimentador GUT47 diminuindo seu carregamento temporariamente.

Como pode ser observado na Figura 3.12, pela redistribuição do fluxo de carga entre os alimentadores GUT40 e GUT47, a solicitação de corrente no transformador de 25 MVA do alimentador GUT40 aumenta de aproximadamente 150 A, o que era esperado uma vez que a relação de distribuição entre os alimentadores deve ser proporcional à carga.

Esse aumento na solicitação da corrente de carga no transformador de 25 MVA não causa danos ao mesmo porque ele opera em condições normais, com carregamento adequado à sua potência, o que possibilita uma margem de carregamento adicional.

Pode-se concluir que o alívio no carregamento dos transformadores é uma das vantagens para a operação em tempo integral de alimentadores em paralelo, isto traria flexibilidade operacional e seria um meio de postergar investimentos na troca de equipamentos, além de contribuir para a melhora no rendimento do sistema de distribuição, melhorando a eficiência energética global.



A Figura 3.13 mostra os gráficos das tensões no secundário do transformador de 15 MVA.

Figura 3.13 – Tensões no transformador de 15 MVA.



A Figura 3.14 mostra os gráficos das tensões no secundário do transformador de 25 MVA.

Figura 3.14 – Tensões no transformador de 25 MVA.

Pela análise da Figura 3.13, no fechamento da chave de manobra em 0,2s pode-se se observar que ocorre um aumento na tensão do secundário do transformador de 15 MVA que prossegue até a reabertura da chave em 0,4s.

Pode-se observar na Figura 3.14, que no fechamento da chave de manobra em 0,2s ocorre uma diminuição na tensão no secundário do transformador de 25 MVA que prossegue até a reabertura da chave de manobra em 0,4s.

Pelos resultados das simulações das tensões nos transformadores de 15 e 25 MVA podese concluir que durante o período em que os alimentadores GUT47 e GUT40 estão operando em paralelo, ocorrem variações nas tensões dos secundários dos seus respectivos transformadores, sendo estas variações imperceptíveis operacionalmente tanto para os transformadores quanto para o sistema Guarujá.

Entretanto, numa situação real de manobras de paralelismo no sistema de distribuição as variações das tensões nos secundários de transformadores de potência podem ser maiores ou menores dependendo de vários fatores, tais como, condições operacionais, características construtivas, diferenças das características das cargas supridas por estes transformadores.

3.3 Simulações com o PSCAD

Dentre as preocupações dos operadores do sistema antes da realização das manobras de paralelismo no sistema Guarujá, estava a possibilidade da atuação das proteções de sobrecorrente dos transformadores de 15 e 25 MVA. Este estudo não foi realizado com o programa SimPowerSystem porque o mesmo não possui aplicativo com modelos de equipamentos de proteção nas suas ferramentas. Para verificar esta possibilidade foi utilizado o programa PSCAD que possui um aplicativo chamado, PROTECTION, que apresenta modelos de equipamentos de proteção dentre os quais foram utilizados os relés de sobrecorrente.

O sistema Guarujá foi então implementado no PSCAD, conforme apresentado na Figura 3.15.

68



Figura 3.15 – Sistema Guarujá implementado no PSCAD.

A Figura 3.16 apresenta o esquema de proteção de sobrecorrente dos transformadores de 15 e 25 MVA no PSCAD.



Figura 3.16 - Esquema de proteção de sobrecorrente dos transformadores no PSCAD.

Nas simulações a corrente de disparo dos relés (TRIP⁵) foi ajustada para 10 kA, valor de curto circuito máximo usualmente utilizado para o ajuste da proteção de barras de média tensão de subestações.

As Figuras 3.17 e 3.18 mostram as correntes nos relés de sobrecorrente dos transformadores de 15 MVA e 25 MVA, respectivamente nas fases A, B e C com seus correspondentes TRIP.

⁵ TRIP: Sinal de natureza elétrica enviado por uma função de proteção a um disjuntor de alta tensão para promover sua abertura.


Figura 3.17 – Correntes e TRIP dos relés de sobrecorrente do transformador de 15 MVA.



Figura 3.18 – Correntes e TRIP dos relés de sobrecorrente do transformador de 25 MVA.

Pela análise dos gráficos das Figuras 3.17 e 3.18 pode-se observar que não ocorreu disparo dos relés de sobrecorrente dos transformadores de 15 e 25 MVA em nenhuma de suas fases A, B e C.

3.4 Análise da Viabilidade de Manobras de Paralelismo no Sistema de Distribuição

Pela análise dos resultados das simulações com o SimPowerSystems e com o PSCAD pode-se concluir que as manobras de paralelismo entre os alimentadores GUT40 e GUT47 podem ser realizadas no sistema Guarujá, com segurança tanto para o sistema quanto para os consumidores. Os resultados dos transitórios de tensão e de corrente não apresentaram valores que representem riscos tanto de danificar a chave de manobra quanto para a atuação indevida das proteções dos transformadores de 15 e 25 MVA que suprem, respectivamente, os alimentadores GUT47 e GUT40.

Estes resultados foram confirmados posteriormente nas medições realizadas em campo durante as manobras de paralelismo realizada no sistema Guarujá. Na ocasião não se verificou nenhuma atuação indevida das proteções dos transformadores de 15 e 25 MVA, que pudesse ocasionar a interrupção no fornecimento de energia aos consumidores decorrente das manobras de paralelismo.

Devem ser feitas as seguintes considerações sobre a implementação do sistema no SimPowerSystems e no PSCAD: a) As linhas foram representadas somente por seus parâmetros série porque as redes de distribuição são linhas curtas, b) nos transformadores não foram considerados os efeitos da saturação magnética, c) não foi considerada a presença de cargas não lineares no sistema.

73

Capítulo 4

Desenvolvimento da Modelagem Matemática do GPARD

Este capítulo apresenta a segunda etapa do desenvolvimento do GPARD onde o sistema de distribuição Guarujá foi reduzido a um modelo equivalente trifásico, utilizando-se a técnica de equivalentes externos fundamentado no método de redução de Kron, de onde se obteve o modelo monofásico que foi equacionado originando as equações diferenciais que fundamentam o GPARD.

4.1 Modelagem Matemática do Sistema de Distribuição

A modelagem matemática do GPARD está fundamentada em equações diferenciais que foram obtidas do equacionamento do modelo equivalente monofásico do sistema Guarujá, que foram obtidas conforme a metodologia apresentada na sequência.

Inicialmente o sistema Guarujá foi reduzido a um modelo equivalente trifásico utilizando-se a técnica de equivalentes externos com base no método de redução de Kron (Apêndice 2).

O método de redução de Kron (SATO 1981) foi aplicado somente na rede dos alimentadores GUT40 e GUT47. Normalmente o resultado obtido com este método é um modelo equivalente trifásico do tipo π , conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Modelo equivalente trifásico π dos alimentadores GUT40 e GUT47.

Entretanto os alimentadores GUT40 e GUT 47 possuem bancos de capacitores em trechos próximos da chave de manobra, que influenciam nos transitórios de tensão e correntes conforme apresentado nas Figuras 3.9 e 3.10. No processo de cálculo da construção do modelo equivalente trifásico verificou-se que os valores das indutâncias e das capacitâncias tendem a se anularem o que acaba com o efeito transitório do banco de capacitores sobre a chave de manobra. Por esta

razão para que o modelo equivalente trifásico reproduza as mesmas respostas transitórias de tensão e de corrente do sistema Guarujá, os equivalentes dos alimentadores GUT40 e GUT47 devem ser construídos preservando-se os trechos das redes entre os bancos de capacitores e a chave de manobra, isto é, estes trechos não devem entrar no cálculo do modelo equivalente trifásico dos alimentadores.

A Figura 4.2 apresenta o modelo equivalente trifásico dos alimentadores GUT40 e GUT47 com a presença de bancos de capacitores.



Figura 4.2 – Modelo equivalente trifásico dos alimentadores com banco de capacitores.

A presença de banco de capacitores nos alimentadores GUT40 e GUT47 origina quatro casos na construção dos seus modelos equivalentes trifásicos: a) os alimentadores GUT40 e GUT47 possuem banco de capacitores. Nesse caso, os equivalentes dos alimentadores GUT40 e GUT47 devem ser construídos preservando-se o trecho do sistema original onde estão os bancos de capacitores, b) o alimentador GUT40 possui banco de capacitores e o alimentador GUT47 não possui. Nesse caso, o equivalente do alimentador GUT40 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o equivalente do alimentador GUT40 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o equivalente do alimentador GUT47 é construído conforme o modelo equivalente π , c) o alimentador GUT47 possui banco de capacitores e o alimentador GUT47 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o alimentador GUT47 possui banco de capacitores e o alimentador GUT47 possui banco de capacitores e o alimentador GUT40 não possui. Nesse caso, o equivalente do alimentador GUT47 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o equivalente do alimentador GUT47 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o equivalente do alimentador GUT47 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o equivalente do alimentador GUT40 exercitores e o equivalente do alimentador GUT40 exercitores e o equivalente do alimentador GUT47 deve ser construído preservando-se o trecho do sistema original onde está o banco de capacitores e o equivalente do alimentador GUT40 é construído conforme o modelo equivalente

 π , d) os alimentadores GUT40 e GUT47 não possuem banco de capacitores. Nesse caso, os equivalentes dos alimentadores GUT40 e GUT47 serão construídos conforme o modelo equivalente π .

A Figura 4.3 apresenta o modelo equivalente trifásico dos alimentadores GUT40 e GUT47, com os valores de impedâncias equivalentes que foram calculados pelo método de redução de Kron.



Figura 4.3 - Modelo equivalente dos alimentadores GUT40 e GUT47.

Para verificar se os modelos equivalentes construídos dos alimentadores GUT40 e GUT 47 reproduzem as mesmas respostas transitórias das tensões e correntes obtidas no sistema Guarujá (Figura 3.7) durante as manobras de paralelismo, o sistema equivalente trifásico completo foi implementado no SimPowerSystems, conforme mostrado na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Modelo equivalente trifásico do sistema Guarujá.

Para o sistema equivalente trifásico foram feitas as mesmas simulações realizadas no sistema Guarujá. São apresentados somente os gráficos das correntes e tensões na chave de manobra, Figura 4.5, que podem ser comparados com os resultados encontrados nas Figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.





Figura 4.5 – Gráficos das correntes e tensões na chave de manobra simulados com o modelo equivalente trifásico do sistema Guarujá.

Pela análise dos resultados da Figura 4.5 confirma-se que o modelo equivalente trifásico reproduz as mesmas características do sistema Guarujá apresentando respostas similares às deste sistema, tanto em regime permanente quanto em regime transitório durante as manobras de paralelismo dos alimentadores GUT40 e GUT47.

Pode-se concluir que, se o modelo equivalente trifásico reproduz os resultados encontrados no sistema Guarujá, o modelo equivalente monofásico obtido deste sistema trifásico também reproduz estes resultados. Para comprovar esta suposição, o circuito equivalente monofásico do sistema Guarujá foi implementado no SimPowerSystems considerando-se a fase A do sistema.

A Figura 4.6 mostra este modelo equivalente monofásico, constituído por duas fontes de tensão em suas extremidades (V_{1a} e V_{2a}) que representam a subestação Guarujá de onde derivam os alimentadores GUT40 e GUT47 representados pelos seus equivalentes, construídos considerando-se a presença de bancos de capacitores em ambos os alimentadores, supridos pelos transformadores de potência de 25 e 15 MVA, respectivamente.



(a)



Alimentador GUT40



(b)



Figura 4.6 – a) Modelo equivalente monofásico completo do sistema Guarujá b) Alimentador GUT40 c) Alimentador GUT47.

A Figura 4.7 mostra os resultados das correntes e tensões na chave de manobra, simulados com o modelo equivalente monofásico do sistema Guarujá, que podem ser comparados com os resultados da Figura 4.5.







Figura 4.7 – Gráficos das correntes e tensões na chave de manobra simulados com o modelo equivalente monofásico do sistema Guarujá.

4.2 Modelagem Matemática do GPARD

O circuito monofásico mostrado na Figura 4.8, foi equacionado para obtenção das equações diferencias que fundamentam a modelagem matemática do GPARD.

Deve-se ressaltar que esta modelagem matemática é abrangente e permite que sejam simulados os três tipos de paralelismo que podem ser realizados entre alimentadores radiais de distribuição (capítulo 2). Considerando que o diagrama da Figura 4.8 represente a fase A de um sistema elétrico de distribuição constituído por duas subestações V_A e V_B de onde derivam dois alimentadores A e B supridos por dois transformadores A e B respectivamente, numerou-se as malhas de 1 até 13 (da esquerda para a direita, adotando-se o mesmo sentido da corrente da malha 1, para as correntes de todas as demais malhas). Começando a análise do circuito a partir da fonte de tensão (V_A) tem-se as correntes de malhas de 1 até 6 ($i_1,...,i_6$), Figura 4.8a. A malha de número 7 é a que contém a chave de manobra e sua corrente elétrica foi denotada como i_{ch} .

Na sequência, a partir da malha da chave de manobra, têm-se as malhas de 8 até 13 $(i_{8},...,i_{13})$ até a fonte de tensão (V_B) , Figura 4.8b.



Figura 4.8 – Diagrama monofásico de um sistema de distribuição.

Equacionando o circuito da Figura 4.8, conforme o sentido adotado da esquerda para a direita a partir da malha 1 até a 13, tem-se:

Onde:

$$i, V$$
 são derivadas $\frac{di}{dt} e \frac{dV}{dt}$;

 V_A, V_B são tensões das fontes que representam as subestações A e B;

 R_{11}, L_{11} são resistência elétrica e indutância do primário do transformador A, referidas ao secundário;

 R_{12}, L_{12} são resistência elétrica e indutância do secundário do transformador A;

 R_{p1}, L_{m1} são resistência elétrica e indutância de magnetização do transformador A, referidas ao secundário;

 R_{C11}, L_{C11} são resistência elétrica e indutância em paralelo do circuito equivalente do alimentador A;

 R_{C12}, L_{C12} são resistência elétrica e indutância em série do circuito equivalente do alimentador A;

 R_{C13}, L_{C13} são resistência elétrica e indutância em paralelo do circuito equivalente do alimentador A;

 C_{p1} é o capacitor do banco de capacitores do circuito equivalente do alimentador A;

 R_{d12} , L_{d12} são resistência elétrica e indutância em série do circuito equivalente do alimentador A; R_{d13} , L_{d13} são resistência elétrica e indutância em paralelo do circuito equivalente do alimentador A;

 R_{ch} é a resistência elétrica da chave de manobra;

 R_{21}, L_{21} são resistência elétrica e indutância do primário do transformador B;

 R_{22}, L_{22} são resistência elétrica e indutância do secundário do transformador B, referidas ao primário;

 R_{p2}, L_{m2} são resistência elétrica e indutância de magnetização do transformador B;

 R_{C21} , L_{C21} são resistência elétrica e indutância em paralelo do circuito equivalente do alimentador B;

 R_{C22}, L_{C22} são resistência elétrica e indutância em série do circuito equivalente do alimentador B;

 R_{C23}, L_{C23} são resistência elétrica e indutância em paralelo do circuito equivalente do alimentador B;

 $C_{_{p2}}$ é o capacitor do banco de capacitores do circuito equivalente do alimentador B;

 R_{d22}, L_{d22} são resistência elétrica e indutância em série do circuito equivalente do alimentador B; R_{d23}, L_{d23} são resistência elétrica e indutância em paralelo do circuito equivalente do alimentador B.

Na forma matricial as equações (4.1) são representadas como:

$$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \dot{i} = -[R] \dot{i} + V$$

$$\dot{i} = -[L]^{-1} [R] \dot{i} + [L]^{-1} V$$

$$\int \dot{i} = \int \left(-[L]^{-1} [R] \dot{i} + [L]^{-1} V \right) dt$$
(4.2)

Sendo: [L] é a matriz das indutâncias e capacitâncias, [R] é a matriz das resistências elétricas, *i* é o vetor das correntes de malha, *V* é o vetor das fontes de tensão.

Para resolver o sistema de equações (4.2), encontrando os valores de suas incógnitas, que são as correntes de malha $(i_1, ..., i_{13})$ e as tensões nos capacitores $(V_{cp1} \ e \ V_{cp2})$, foi utilizado o método de integração trapezoidal, mostrado a seguir.

Discretizando a equação (4.2) e integrando usando a regra do trapézio tem-se:

$$\begin{split} i_{(k+1)} - i_{(k)} &= \left(-\left[L\right]^{-1} \left[R\right] \dot{i}_{(k+1)} - \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \dot{i}_{(k)} \right) \frac{T}{2} + \left[L\right]^{-1} \left(V_{(k+1)} + V_{(k)}\right) \frac{T}{2} \\ i_{(k+1)} + \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \dot{i}_{(k+1)} \frac{T}{2} &= i_{(k)} - \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \dot{i}_{(k)} \frac{T}{2} + \left[L\right]^{-1} \left(V_{(k+1)} + V_{(k)}\right) \frac{T}{2} \\ i_{(k+1)} \left(I + \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right) &= i_{(k)} \left(I - \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right) + \left[L\right]^{-1} \left(V_{(k+1)} + V_{(k)}\right) \frac{T}{2} \\ i_{(k+1)} &= \left(I + \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right)^{-1} \left[i_{(k)} \left(I - \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right) + \left[L\right]^{-1} \left(V_{(k+1)} + V_{(k)}\right) \frac{T}{2}\right] \\ i_{(k+1)} &= \left(I + \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right)^{-1} \left(I - \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right) i_{(k)} + \left(I + \left[L\right]^{-1} \left[R\right] \frac{T}{2}\right)^{-1} \left[L\right]^{-1} \left(V_{(k+1)} + V_{(k)}\right) \frac{T}{2} \end{split}$$

Sendo: *T* o passo de discretização.

$$V_{cp1(k+1)} = V_{cp1(k)} + \frac{1}{C_{p1}} (i_{5(k)} - i_{6(k)})$$

$$V_{cp2(k+1)} = V_{cp2(k)} + \frac{1}{C_{p2}} (i_{8(k)} - i_{9(k)})$$
(4.4)

Onde: V_{cp1}, V_{cp2} são as tensões dos capacitores C_{p1} e C_{p2} , i_5, i_6 e i_8, i_9 são as correntes de malha nos capacitores C_{p1} e C_{p2} , respectivamente.

Capítulo 5

Desenvolvimento da Interface Gráfica do GPARD

Este capítulo apresenta a terceira etapa, ultima do desenvolvimento do GPARD que consiste na integração das equações diferenciais (4.1) usando o método trapezoidal com a interface gráfica que foi desenvolvida no aplicativo GUIDE do MATLAB.

No transcorrer deste capítulo será descrita com detalhes a criação dessa interface gráfica e suas funcionalidades.

5.1 Criação da Interface Gráfica com o Aplicativo GUIDE do MATLAB

A interface gráfica do GPARD foi desenvolvida para ser amigável, podendo ser utilizada por qualquer usuário, sem a necessidade de conhecimento prévio de como ela funciona, tendo somente que escolher as informações na interface, que são acessadas diretamente do banco de dados da concessionária de energia elétrica.

A interface gráfica do GPARD foi desenvolvida usando o GUIDE (grafical user interface development environment) que é o aplicativo de criação de interfaces gráficas com o usuário do MATLAB para interação com o usuário através da criação de uma GUI (grafical user interface) ou interface gráfica (KNIGHT 2000).

Uma GUI é uma interface "pictórica" para um programa que provê um ambiente familiar para o trabalho do usuário, fornecendo recursos como janelas, botões, menus, entre outros. A interface gráfica deve se comportar de maneira inteligível, de forma que o usuário presuma qual a ação que o programa executará quando este interagir com um dos seus componentes (SIQUEIRA 2010).

A criação de uma interface gráfica no GUIDE inicia digitando-se na janela de comandos do MATLAB:

>> guide

Na sequência é exibida a janela inicial do GUIDE com as seguintes opções: abrir uma nova GUI (Blank GUI (Default)), abrir uma GUI já existente (Open Existing GUI), ou abrir um exemplo de GUI do MATLAB (GUI with Uicontrols, GUI with Axes and Menu, Modal Question Dialog), conforme mostrado na Figura 5.1.

GUIDE Quick Start	X
Create New GUI Open Existing G	SUI
GUIDE templates	Preview
 Elank GUI (Default) GUI with Uicontrols GUI with Axes and Menu Modal Question Dialog 	BLANK
☐ Save on startup as: C∿Program	Files\MATLAB71\work\untitled.fig Browse
	OK Cancel Help

Figura 5.1 – Janela de opções de abertura da GUI.

Quando o usuário escolhe "Blank GUI (Default)" é exibida a janela da Figura 5.2 que é uma GUI em branco onde será criada a interface gráfica, composta basicamente pela área de projeto e pela lista de componentes.

Na lista de componentes estão disponíveis menus, janelas, botões e caixas de texto que serão inseridos na área de projeto para a construção da interface gráfica. Estes componentes possuem o recurso de arrastar e soltar, então basta selecionar o componente na lista e arrastar para a área de projeto. Isto simplifica o processo de diagramação e programação das interfaces gráficas (VIEIRA 2009).

🜱 untitled.fig											X
<u>File Edit View L</u>	ayout]	[ools <u>H</u>	elp								
D 🛩 🖬 🐇 I	t 🛍	5 0	₿	12) 🖻 😚						
R Select				1							*
📧 Push Button											
🚥 Slider	Palh	eta de	Com	poner	ites						
Radio Button				P							_
🗹 Check Box											
🕅 Edit Text											
🚥 Static Text						Area	de Pr	ojeto			
📼 Pop-up Menu											
El Listbox				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						i i i i i	
🔟 Toggle Button											
🔛 Axes											
🛅 Panel											
📳 Button Group											
🗙 ActiveX Control											
_											
										-	
											Ŧ
	4				_				 		F

Figura 5.2 – Janela inicial exibindo uma GUI em branco.

Quando uma GUI é criada são criados dois arquivos do MATLAB: o arquivo do corpo da interface gráfica (que é salvo como uma figura de extensão *.fig*) e outro arquivo contendo funções que controlam como a GUI funcionará, salvo como um arquivo de função *.m*. Esta função contém as rotinas para iniciar a GUI e contém as funções dos componentes da interface gráfica denominados *callbacks*.

A cada elemento está associada uma *callback* onde são escritas as rotinas e os comandos que serão executados quando o usuário interagir com um componente da interface (BLINKDAGGER 2007). Na Figura 5.3 são apresentadas as janelas das etapas de construção da interface gráfica do GPARD. No primeiro plano é apresentada a interface gráfica finalizada, com a qual o usuário interage e que não pode ser mais modificada, nomeada Gerenciador_de_Paralelismo_GPARD. No segundo plano é apresentada a GUI de construção da interface com a lista e com os seus componentes inseridos na área de projeto, mas que ainda pode ser modificada, nomeada Gerenciador_de_Paralelismo_GPARD.*fig*. No terceiro plano é apresentado o arquivo da função nomeado Gerenciador_de_Paralelismo_GPARD.*m* que contem os *callbacks* de cada componente com os seus respectivos comandos e rotinas que serão executadas quando o usuário interagir com algum componente da interface gráfica do GPARD.



Figura 5.3 – Janelas das etapas de construção da interface gráfica do GPARD.

5.2 Bancos de Dados das Concessionárias de Energia Elétrica

O GPARD realiza a simulação de manobras de paralelismo acessando as informações necessárias diretamente do banco de dados da concessionária de energia elétrica.

No Brasil as concessionárias CPFL (MENEZES 2009), CHESF (DUARTE 2003), dentre outras utilizam o sistema SCADA⁶.

O sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) é um sistema de gerenciamento de dados, assim denominado, em virtude de suas funções de coleta de dados e atuação sobre os equipamentos no campo (COSTA 1995). Este sistema é responsável pelas medições de tensão, corrente e fluxos de potência ao longo da rede, além da monitoração das indicações de estado de equipamentos tais como chaves, religadores, bancos de capacitores, possibilitando ainda o telecontrole dos equipamentos, bem como sua parametrização remota (ALMEIDA 2009).

O sistema SCADA está localizado no gerenciamento e operação da rede elétrica, denominado de Centro de Operação da Distribuição (COD), que concentra a operação das subestações, bem como da rede de distribuição de energia, de uma região, de modo a garantir o suprimento de energia ao consumidor, no caso de falhas, de manutenções programadas ou promover a transferência de carga entre circuitos objetivando afetar o menor numero de consumidores (CRISPINO 2000).

Os sistemas SCADA típicos implementam bancos de dados e possuem pacotes para criação de IHM (Interface Homem Máquina). Entretanto os bancos de dados mais comuns nas concessionárias de energia são o ORACLE da Oracle Corporation, o SQL SERVER e o ACCESS, que interagem com o VB (Visual Basic) programa para criação de interfaces gráficas, todos da Microsoft Corporation (BORGES 2005).

⁶ CONCERT TECHNOLOGIES: <u>http://www.concert.com.br/pt/pdf/folder_clientes.pdf</u>. (2012).

Para que o GPARD possa interagir com o banco de dados da concessionária é necessário primeiramente ajustá-lo para que reconheça nos arquivos de cadastro da rede ou de medições, os seus "flags", isto é, que saiba identificar no código adotado pela concessionária os componentes da rede como transformadores, chaves, banco de capacitores e no caso das medições, valores de corrente, tensão, potência entre outras informações necessárias.

Deve-se salientar que não é do escopo deste trabalho apresentar nenhuma proposta ou metodologia para integração do GPARD ao programa de gerenciamento de dados da concessionária.

Entretanto na Figura 5.4 é apresentada simplificadamente as etapas do acesso do GPARD à base de dados da concessionária.



Figura 5.4 – Fluxograma de acesso do GPARD aos bancos de dados.

5.3 Interface Gráfica do GPARD

A Figura 5.5 mostra a interface gráfica do GPARD, composta por quatro módulos denominados: Entrada de Dados dos Alimentadores, Parâmetros da Simulação, Parâmetros do Chaveamento e Simulação e seis menus denominados: Arquivo, Subestações, Alimentador A, Alimentador B, Chave e Reconfiguração. Na sua inicialização é apresentada como condições iniciais as informações do sistema de distribuição Guarujá (Capítulo 3), que serve de exemplo para o usuário de como as informações devem ser escolhidas/entradas.

Todos os gráficos apresentados neste Capítulo foram simulados com o GPARD, considerando as informações da interface da Figura 5.5.

oviu	Subestações	Alimentador A	Alimentador B	Chave	Reconfigura	ção	
E	ntrada de Dad	los dos Alimenta	dores			_ Parametros da Simulaç	:ao
F	Alimentador A	۹				Tempo Inicial	0.0 s
	Subestaçao	GUA 3 🔺	144.9 kV	0	•	Tempo Final	D.5 S
	Alimentador	GUT 40 🔹					
	Transformado	ar 25 Mb (A +	1440 K	/ 138	- w	Parametros do Chavear	mento
	Tansionnauc	123 MWA	1 144.5	1 10.0	ST NY	Chave da Fase A	Ť.
	Banco de Ca	pacitor 1.2	MVAr			Condiçao Inicial At	perta 👻
- -	Alimentador E	3				Tempos 0.2 s	s 0.4 s
	Subestaçao	GUA 3 📩	144.9 kV	0		Chave da Fase B	
	Alimentador	GUT 47 💌				Condicao Inicial At	verta 🚽
8	Transformado	r 15 MVA 🔺	144.9 kV	13.8	_ k∨	Tempos 0.2 s	0.4 S
	Banco de Ca	pacitor 1.2	MVAr				
						Chave da Fase C	
						Condiçao Inicial 🛛 🗛	oerta
_ Si	imulaçao ——					Tempos 0.2 s	0.4 s
	Sim	iular	Relat	orio			

Figura 5.5 – Interface gráfica do GPARD.

5.3.1 MÓDULO ENTRADA DE DADOS DOS ALIMENTADORES

A Figura 5.6 apresenta a sequência de informações que o usuário escolherá neste módulo.



Figura 5.6 – Sequência da entrada de dados dos alimentadores.

Deve-se salientar que as informações das subestações, dos alimentadores e dos transformadores são acessadas diretamente do banco de dados da concessionária, ou seja, é necessário que existam bancos de dados referentes às subestações, aos alimentadores e aos transformadores e que estes bancos de dados estejam interligados, Figura 5.6.

Por exemplo, na Figura 5.7, se no alimentador A fosse escolhida a subestação GUA 3, automaticamente a lista de alimentadores apresentada ao usuário seriam dos alimentadores pertencentes à subestação GUA 3. Escolhido o alimentador, por exemplo GUT40, automaticamente seria apresentada uma lista de transformadores, sendo a primeira opção o transformador real que supre este alimentador, no caso, 25 MVA. Também são apresentados outros transformadores de diferentes potências caso o usuário queira simular com outro transformador.

A Figura 5.7 ilustra o descrito anteriormente, apresentando uma listagem para escolha da subestação do alimentador e do transformador, respectivamente.

Alimentador A		
Subestaçao	GUA 3	- 144.9 kV 0 °
	GUA 3	
Alimentador	GUA 1	
	STM 1	
Transformador	STM 2	144.9 kV 13.8 kV
	POA 3	,
Banco de Capa	POA 2	MVAr

Alimentador A	
Subestaçao	GUA 3 - 144.9 KV 0 °
Alimentador	GUT 40 🗾
Transformador	GUT 40 GUT 47 GUT 50
Banco de Capa	GUT 53 MVAr

- Alimentador A-		
Subestaçao	GUA 3	▼ 144.9 kV 0 °
Alimentador	GUT 40	-
Transformador	25 MVA	▼ 144.9 kV 13.8 kV
Banco de Capa	25 MVA 20 MVA	MVAr
	15 MVA 33 MVA	

Figura 5.7 – Listagem de escolha da subestação, do alimentador e do transformador.

Caso o usuário escolha a mesma subestação no alimentador A e no alimentador B, aparecerá a mensagem "Os alimentadores pertencem à mesma subestação?", Figura 6.8, se a resposta for "Sim" o programa preenche automaticamente o campo da tensão e do ângulo da subestação, com o mesmo valor da tensão e do ângulo da primeira subestação escolhida A ou B. Neste caso, o usuário não poderá modificar estes parâmetros, a não ser que escolha diferentes subestações nos alimentadores A ou B.

Entrada de Dados dos Alimen	tadores	Parametros da Simulaçao
Alimentador A		Tempo Inicial 0.0 s
Subestaçao GUA 3 _	144.9 kV 0 °	Tempo Final 0.5 s
Alimentador GUT 40 _	Subestação	
Transformador 25 MVA _		
Banco de Capacitor 1.2		rtencem a mesma subestação?
	Sim	Não S
Alimentador B	-	
Subestaçao 🛛 🕞 🚽	144.9 kV 0 °	- Chave da Fase B
Alimentador GUT 47 🔫		Condicao Inicial Aberta -
Transformador 15 MV/A	1 144.9 kV 13.9 kV	
Banco de Capacitor 1.2	MVAr	Chave da Fase C
I		Condicao Inicial Aberta
Simulaçao		
Simular	Relatorio	

Figura 5.8 – Alimentadores A e B pertencem à mesma subestação.

5.4.1.1 Presença de banco de capacitores nos alimentadores

Uma característica importante dos alimentadores é a presença de banco de capacitores em trechos próximos da chave de manobra, conforme visto no Capítulo 4. A presença de banco de capacitores nos alimentadores é mostrada na interface gráfica do GPARD, Figura 5.9.

- Entrada de Dados dos Alimentadores	- Entrada de Dados dos Alimentadores
Alimentador A	Alimentador A
Subestaçao GUA3 - 144.9 KV 0 °	Subestaçao GUA 3 - 144.9 kV 0 °
Alimentador GUT 40 -	Alimentador GUT 40 🚬
Transformador 25 MVA 💽 144.9 kV 13.8 kV	Transformador 25 MVA - 144.9 KV 13.8 KV
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Banco de Capacitor 1.2 MVAr
Alimentador B	Alimentador B
Subestaçao GUA 3 💉 144.9 kV 0 °	Subestação GUA 3 🕌 144.9 kV 0 °
Alimentador GUT 47 -	Alimentador GUT 47 💌
Transformador 15 MVA - 144.9 kV 13.8 kV	Transformador 15 MVA v 144.9 kV 13.8 kV
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Banco de Capacitor 0.0 MVAr
(a)	(b)
Entrada de Dados dos Alimentadores	Entrada de Dados dos Alimentadores
Entrada de Dados dos Alimentadores	Entrada de Dados dos Alimentadores
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 1 144.9 kV 0 °	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 1 144.9 kV 0 °
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 Y 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 Y	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 → 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 →
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 · 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 · Transformador 25 MVA · 144.9 kV 13.8 kV	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 • 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 • Transformador 25 MVA • 144.9 kV 13.8 kV
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 · 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 · Transformador 25 MVA · 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 • 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 • Transformador 25 MVA • 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 · 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 · Transformador 25 MVA · 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 1 Transformador 25 MVA 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 * Transformador 25 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 °	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 • 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 • Transformador 25 MVA • 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 • 144.9 kV 0 °
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 * Transformador 25 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestação GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 *	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 × Transformador 25 MVA × 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 × 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 ×
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 + 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 • Transformador 25 MVA + 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestação GUA 3 + 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 + Transformador 15 MVA + 144.9 kV 13.8 kV	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 • 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 • Transformador 25 MVA • 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestação GUA 3 • 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 • Transformador 15 MVA • 144.9 kV 13.8 kV
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 * Transformador 25 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 * Transformador 15 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 * Transformador 25 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 * Transformador 15 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 * Transformador 25 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 * 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 47 * Transformador 15 MVA * 144.9 kV 13.8 kV Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 * 144.9 KV 0 ° Alimentador GUT 40 * Transformador 25 MVA * 144.9 KV 13.8 KV Banco de Capacitor 0.0 MVAr Alimentador B Subestaçao GUA 3 * 144.9 KV 0 ° Alimentador GUT 47 * Transformador 15 MVA * 144.9 KV 13.8 KV Banco de Capacitor 0.0 MVAr

Figura 5.9 – Presença de banco de capacitores nos alimentadores.

Na Figura 5.9 tem-se: a) alimentadores A e B com banco de capacitores (1,2 MVAr), b) alimentadores A com banco de capacitores (1,2 MVAr) e alimentador B sem banco de capacitores (0,0 MVAr), c) alimentador A sem banco de capacitores (0,0 MVAr) e alimentador B com banco de capacitores (1,2 MVAr), d) alimentadores A e B sem bancos de capacitores (0,0 MVAr).

Na programação do GPARD, existem quatro rotinas para o cálculo do equivalente dos alimentadores, uma para cada caso, escolhida automaticamente dependendo do valor que o usuário entrar para o banco de capacitores. No caso do usuário entrar com o valor "0.0" o GPARD considerará que o alimentador A ou B não possui banco de capacitores. No caso do usuário entrar com qualquer outro valor positivo será considerado como capacitância existente, porque o GPARD assumirá que o usuário teve a intenção de simular com este valor. Neste caso não será apresentada nenhuma mensagem de erro. Isto só ocorrerá quando o usuário entrar com um valor negativo para o banco de capacitores, então será apresentada a mensagem conforme mostrado na Figura 5.10.

quivo Subestações Alimentador A Alimentador B Chave Reconfi <u>c</u>	uração
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 - 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 - Transformador 25 MVA - 144.9 kV 13.8 kV	Parametros da Simulaçao Tempo Inicial 0.0 s Tempo Final 0.5 s Parametros do Chaveamento
Banco de Capacitor MVAr	Condiçao Inicial Aberta -
Alimentador B Subestaçao GUA 0 Banco de Capacitores deve ser	maior ou igual a Zero.
Alimentador GUT OK Transformador 15 MVA - 144.9 KV 13.8 KV	Aberta - Tempos 0.2 s 0.4 s
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Chave da Fase C Condiçao Inicial Aberta <u>-</u>
Simulaçao	Tempos 0.2 s 0.4 s



A Figura 5.11 apresenta os gráficos da tensão na chave de manobra obtida com o GPARD considerando o caso quando os alimentadores A e B possuem bancos de capacitores de "1.2 MVAr" e o caso quando os alimentadores A e B não possuem bancos de capacitores "0.0" MVAr.



Figura 5.11 – Tensão na chave com banco de capacitores e sem banco de capacitores nos alimentadores.

5.4.2 MÓDULO PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Neste módulo o usuário entra com os parâmetros da simulação que são: tempo inicial e tempo final. Na entrada do tempo inicial não são permitidos números negativos nem números maiores do que o tempo final de simulação. Na entrada do tempo final não são permitidos valores menores que o tempo inicial.

Caso o usuário entre com um destes valores aparecerá uma das mensagens de erro, conforme mostrado na Figura 5.12.

intrada de Dados dos Alimentadores	Parametros da Simulação
- Alimentador A	Tempo Inicial 0.6 s
Subest Erro 📼 🖾	Tempo Final S
Alimen 0 Tempo inicial deve ser maior ou igual a Zero.	- Parametros do Chaveamento
Transfor OK	Chave da Fase A
Banco to capacitor 1.2 INTYAL	Condiçao Inicial Aberta
- Alimen 🛃 Erro	Tempos 0.2 s 0.4 s
Subes O Tempo final deve ser maior que o Tempo inicial.	Chave da Fase B
Alimer	Condiçao Inicial Aberta 🕝
Transfe ,	Tempos 0.2 \$ 0.4 s
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	
	Chave da Fase C
	Condiçao Inicial Aberta 🔹
Simular Relatorio	Tempos 0.2 s 0.4 s

Figura 5.12 - Mensagens de erro na entrada do tempo inicial e tempo final da simulação.

5.4.3 MÓDULO PARÂMETROS DO CHAVEAMENTO

Neste módulo o usuário entra com os parâmetros de chaveamento das chaves de manobra das fases A, B e C. As chaves atuam de forma independente, podendo partir em condições iniciais diferentes abertas ou fechadas e serem manobradas em instantes de tempo diferentes, conforme mostrado na Figura 5.13.

Arquivo Subestações Alimentador A Alimentador B Chave Recon	figuração
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestaçao GUA 3 - 144.9 kV 0 ° Alimentador GUT 40 -	Parametros da Simulaçao Tempo Inicial 0.2 s Tempo Final 0.5 s
Transformador 25 MVA 🔄 144.9 KV 13.8 KV Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Parametros do Chaveamento Chave da Fase A Condiçao Inicial Aberta
Alimentador B Subestação GUA 3 - 144.9 KV 0 ° Alimentador GUT 47 - Transformador 15 MV(A - 144.9 KV 13.9 KV	Tempos 0.3 s 0.6 s Chave da Fase B Condiçao Inicial Fechada - Tempos 0.25 s 0.46 s
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Chave da Fase C Condiçao Inicial Aberta - Tempos 0.27 s 0.43 s

Figura 5.13 – Parâmetros das chaves com condições iniciais e tempos de manobra distintos.

Na entrada dos valores dos tempos das manobras não são permitidos: a) no primeiro instante de tempo a entrada de valores negativos e nem a entrada de valores maiores do que o segundo instante de tempo, b) no segundo instante de tempo a entrada de valores negativos e nem a entrada de valores menores do que o primeiro instante de tempo.
Se o usuário entrar com algum dos valores citados anteriormente serão mostradas as mensagens de erro, da Figura 5.14.

Auto anatomiate dimensional dimensional politike iter	eeringanagaas
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 T 144.9 kV 0 °	Parametros da Simulaçao Tempo Inicial 0.0 s Tempo Final 0.5 s
Erro O primeiro tempo de chaveamento deve ser maior ou igual OK	arametros do Chaveamento La Zero. Condiçao Inicial Aberta Tempos 0.3 s s
Erro C Segundo tempo de chaveamento deve ser maior que o f OK	rimeiro. Chave da Fase B Condiçao Inicial Aberta ✓ Tempos 0.2 s 0.4 s
Simulaçao Simular Relatorio	Chave da Fase C Condiçao Inicial Aberta <u> </u>

Figura 5.14 – Mensagens de erro na entrada dos tempos das manobras das chaves.

A manobra de paralelismo usualmente é realizada em dois tempos de chaveamento, no primeiro o fechamento da chave de manobra e no segundo o tempo a sua abertura. No GPARD também foram considerados somente dois tempos para as manobras das chaves, no primeiro o fechamento e no segundo a abertura da chave de manobra ou vice-versa, dependendo da escolha do usuário para a condição de partida das chaves Aberta/Fechada ou Fechada/Aberta.

Entretanto o usuário poderá utilizar como artifício para anular um dos tempos de transição da chave, entrar com valores menores ou maiores ao intervalo de tempo da simulação, conforme foi mostrado na Figura 5.13 onde foi usado este artifício na chave da Fase A.

A Figura 5.15 apresenta os gráficos das correntes e tensões nas chaves de manobras simuladas com o GPARD considerando condições iniciais e tempos de manobras distintos nas chaves. Nas chaves são realizadas duas transições, a chave da fase A inicia na condição fechada, em 0,1s é aberta e em 0,3s é fechada novamente, a chave da fase B inicia na condição aberta, em 0,2 é fechada e em 0,6s seria aberta, a chave da fase C inicia na condição fechada, em 0,4 é aberta e em 0,7s seria fechada. Os tempos de 0,6s e 0,7s são superiores ao tempo de simulação de 0,5s, este é um artifício que o usuário utiliza para que a chave de manobra permaneça na condição que se encontra de aberta ou fechada até o final da simulação.



Figura 5.15 – Simulação com condições iniciais e tempos de manobra distintos nas chaves de manobra.

5.4.4 MÓDULO SIMULAÇÃO

Neste módulo o usuário inicia a simulação através do botão "Simular" e ao final da simulação pode gerar um relatório final através do botão "Relatório", contendo gráficos e informações das simulações realizadas, tais como, tensões e correntes nas subestações e alimentadores, fluxos de carga e perdas de potência nos alimentadores, informações sobre as condições operacionais em que foram realizadas as simulações, entre outras informações que podem serem impressas ou salvas como um arquivo. Quando o usuário inicia a simulação é exibida a janela "Simulação" que demonstra que o programa está em execução através da barra de progressão de tempo que indica o percentual já simulado, o tempo decorrido e o tempo estimado restante da simulação, conforme mostrado na Figura 5.16. Durante a realização da simulação o usuário não tem acesso aos módulos nem aos menus do GPARD que permaneceram bloqueados até que esta termine. A simulação pode ser interrompida pelo usuário a qualquer momento apertando o botão "Parar" na janela Simulação.

iivo Subestações AlimentadorA AlimentadorB Chave Reconfig	guração
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação GUA 3 + 144.9 k∨ 0 °	Parametros da Simulaçao Tempo Inicial 0.0 s Tempo Final 0.5 s
Alimentador GUT 40 + Transformador 25 MVA + 144.9 kV 13.8 kV	Parametros do Chaveamento
Banco de Capac Simulação	ial Aberta
Alimentador B	55% 0.4 s
Subestação d Tempo Decorrido: 0:00:47 Alimentador d Tempo Estimado Restante: 0:00:38	Parar jal Aberta •
Transformador 15 MVA - 144.9 kV 13.8 kV	Tempos 0.2 s 0.4 s
Banco de Capacitor 1.2 MVAr Simulação	Chave da Fase C Condiçao Inicial Aberta 💽 Tempos 0.2 s 0.4 s

Figura 5.16 – Janela simulação.

5.4.5 MENU ARQUIVO

Neste menu "Arquivo" o usuário pode abrir uma interface gráfica ou um gráfico já existente através da opção "Abrir" ou salvar a interface gráfica atual com suas informações através da opção "Salvar", conforme mostrado na Figura 5.17.

	Asayoo Aminenaaana Aminenaaana ahayo naxo naxoniigaayaa	
brir		
alvar	de Dados dos Alimentadores Parametros da Simulação	
- Alim	Escolha um arquivo	
0.4	Examinar: 📕 GPARD 🔹 🗧 🖆 💷 🗸 Tanana Final	
Suc	Nome	,
Alin	Não Especificado (64)	
<u></u>	Alimentador_A_Carregamento.fig	
Tran	Alimentador A Carregamento.m	
Ban	Condicao Inicial Aberta	-
	Nome: Abrir	
- Alim	Ipo: Todos os arquivos MATLAB (*m, *fig, *mat ▼ Cancelar Iempos 0.2 S 0.4	. s
Sub		
	Chave da Fase B	
Alim	Savarem: GPARD GPARD Aberta Condiçao Inicial Aberta	*
Tran	Alimentador A Pardas fin	
	Alimentador_A_Perdas.m	6 (9997)
Ban	Alimentador B Carregamento fig	
<u> </u>	Chave da Fase C	
	Nome: Salvar Condiçao Inicial Aberta	-
Simula	Tipo: Todos os arquivos MATLAB (* m. * fig. * mai ▼ Cancelar Tempos 0.2 s 0.4	l s

Figura 5.17 – Janela abrir e salvar arquivo.

5.4.6 MENU SUBESTAÇÕES

No menu "Subestações" o usuário pode visualizar os gráficos das tensões nas subestações A e B. Deve-se ressaltar que as informações das tensões são obtidas do banco de dados da concessionária, sendo assim, são medidas remotas das tensões nas subestações e não valores simulados. Por isso, os operadores do sistema podem simular a manobra de paralelismo durante a operação visualizando o comportamento do sistema para qualquer condições operacionais em qualquer período de carga.

uivo Subestações Alimentador A Alimentador B Chave Reconfi	guração
Grancos Tensões	
– Entrada de Dados dos Alimentadores	Parametros da Simulaçao
Alimentador A	Tempo Inicial 0.0 s
Subestaçao GUA 3 💽 144.9 kV 0 °	Tempo Final 0.5 S
Alimentador GUT 40 +	
	Parametros do Chaveamento
Transformador 25 MVA - 144.9 KV 13.8 KV	Chave da Fase A
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Condiçao Inicial Aberta 🝷
Alimentador B	Tempos 0.2 s 0.4 s
Subestaçao GUA3 - 144.9 kV 0 °	Chave da Fase B
Alimentador GUT 47 🛫	Condiçao Inicial Aberta 🚽
Transformador 15 MVA 🝸 144.9 kV 13.8 kV	Tempos 0.2 S 0.4 s
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	
	Chave da Fase C
	Condiçao Inicial Aberta 🕑
- Simulaçao	Tempos 0.2 s 0.4 s
Simular Relatorio	

Figura 5.18 – Opção de visualização das tensões nas subestações.

Na Figura 5.19 são apresentados os gráficos das tensões nas subestações A e B para o caso em que os alimentadores A e B pertencem à mesma subestação, ou seja, a subestação A é igual a subestação B, neste caso são a GUA 3, por esta razão, os gráficos são iguais. No caso em que os alimentadores A e B estão localizados em subestações diferentes, ou seja, subestação A (GUA 3) diferente da subestação B (GUA 1), os gráficos seriam diferentes.



Figura 5.19 – Tensões nas subestações A e B.

5.4.7 MENU ALIMENTADOR A

Neste menu o usuário tem a opção de visualizar os gráficos das correntes e tensões no secundário do transformador do alimentador A (Figura 5.21) e os gráficos do fluxo de carga e das perdas de potência neste alimentador (Figuras 5.22), simulados com as informações da Figura 5.20.

ivo Subestações Alimentador A Alimentador B Chave Reconfi	guração
Gráficos Correntes e Tensőes	
Entrada de Dado, Gráficos Fluxo e Perdas	Parametros da Simulaçao
Alimentador A	Tempo Inicial 0.0 s
Subestação GUA 3 📩 144.9 kV 🛛 °	Tempo Final 0.5 s
Alimentador GUT 40 -	- Parametros do Chaveamento
Transformador 25 MVA - 144.9 kV 13.8 kV	Chave da Fase A
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	Condiçao Inicial Aberta 🕣
Alimentador B	Tempos 0.2 s 0.4 s
Subestaçao GUA3 - 144.9 kV 0 °	
Alimentador GUT 47 💌	Condiçao Inicial Aberta 💽
Transformador 15 MVA 🔪 144.9 kV 13.8 kV	Tempos 0.2 \$ 0.4 s
Banco de Capacitor 1.2 MVAr	
Simulaçao	Condição inicial Aberta
Simular Relatorio	rempos 0.2 s 0.4 s

Figura 5.20 – Opção de visualização dos gráficos correntes e tensões e dos gráficos fluxo de carga e perdas de potência.

A Figura 5.21 apresenta os gráficos das correntes e tensões no secundário do transformador A (25 MVA) simulados com o GPARD.



Figura 5.21 – Gráficos das correntes e tensões no transformador A.

A Figura 5.22 apresenta o fluxo de carga e as perdas de potência no alimentador A (GUT40).



Figura 5.22 – Fluxo de carga e perdas de potência no alimentador A.

5.4.8 MENU ALIMENTADOR B

Neste menu o usuário tem a opção de visualizar os gráficos das correntes e tensões no secundário do transformador B (Figura 5.23) e os gráficos do fluxo de carga e das perdas de potência deste alimentador (Figura 5.24), obtidas com as informações da Figura 5.20.

A Figura 5.23 apresenta os gráficos das correntes e tensões no secundário do transformador B (15 MVA).



Figura 5.23 – Gráficos das correntes e tensões no transformador B.

A Figura 5.24 apresenta os gráficos do fluxo de carga e das perdas de potência no alimentador B (GUT47).



Figura 5.24 – Gráficos do fluxo de carga e das perdas de potência no alimentador B.

A transferência de carga entre os alimentadores A e B (alimentadores GUT40 e GUT47) durante a operação em paralelo foi analisada no capítulo 3. Deve-se salientar que os gráficos do fluxo de carga e das perdas de potência servem para mostrar ao usuário a tendência do comportamento dos alimentadores caso a operação de paralelismo seja mantida por um período de tempo mais longo. Considerando condições normais de operação o fluxo de carga e as perdas de potência tendem a se estabilizarem entrando em regime permanente.

5.4.9 MENU CHAVE

No menu "Chave" o usuário pode visualizar os gráficos das correntes e tensões na chave de manobra, conforme mostrado na Figura 5.25.

quivo Subestações Alimentador A Alimentador B C	ave Reconfiguração Gráficos Correntes e Tensões
Entrada de Dados dos Alimentadores Alimentador A Subestação QUA 3 • 144.9 kV 1 Alimentador GUT 40 • Transformador 25 MVA • 144.9 kV 1 Banco de Capacitor 1.2 MVAr Alimentador B Subestação GUA 3 • 144.9 kV 10 Alimentador GUT 47 •	Parametros da Simulaçao Tempo Inicial 0.0 s Tempo Final 0.5 \$ Parametros do Chaveamento Chave da Fase A Condiçao Inicial Aberta → Tempos 0.2 s 0.4 s Chave da Fase B Condiçao Inicial Aberta →
Simulaçao	.8 kV Chave da Fase C Condiçao Inicial Aberta • Tempos 0.2 s 0.4 s







Figura 5.26 – Gráficos das correntes e tensões na chave de manobra.

5.4.10 MENU RECONFIGURAÇÃO

No menu "Reconfiguração" o usuário pode reconfigurar a rede dos alimentadores A e B através do botão carregar. Automaticamente o GPARD carrega as informações do alimentador a ser reconfigurado. Assim o usuário pode reconfigurar a rede do alimentador adicionando trechos, mudando o valor das cargas, fator de potência, comprimento dos trechos, conforme apresentado na Figura 5.27.

Bai Inicial	Barra Inicial Final Ponto		Carga (KVA)	Fator Comprimento Potencia (m)		Carregar Dados do Alimentador
0	0	0	0	0	0	
0	1	1	56	0.956	283	Carregar
1	2	2	0	0.956	70	
2	3	3	38	0.956	140	
2	4	4	152	0.956	506	-
1	5	5	74	0.956	494	Peconfigurer
5	6	6	675	0.956	580	Reconingurar
6	7	7	76	0.956	164	Coir
7	8	8	260	0.956	143	Sair
8	9	9	720	0.956	700	
7	10	10	28	0.956	90	
9	11	11	1147	0.956	211	
5	12	12	290	0.956	206	
	1	() <u> </u>			1	

Figura 5.27 – Reconfiguração da rede do alimentador A.

Capítulo 6

Manobras de Paralelismo no Sistema de Distribuição

Este capítulo apresenta a quarta etapa do desenvolvimento do GPARD que consiste na validação da ferramenta computacional GPARD e dos modelos teóricos do sistema Guarujá implementados no SimPowerSystems e no PSCAD através dos resultados das medições realizadas em campo das manobras de paralelismo entre os alimentadores GUT40 e GUT47, realizadas no sistema de distribuição Guarujá.

6.1 Medições em Campo de Manobras de Paralelismo no Sistema de Distribuição

A concessionária de energia elétrica realizou manobras de paralelismo no sistema Guarujá entre os alimentadores GUT40 e GUT47. Na ocasião foram realizadas medições na chave de manobra que interliga os dois alimentadores. Estas medições confirmaram a viabilidade das manobras de paralelismo entre os alimentadores GUT40 e GUT47 e serviram para validar as implementações do sistema Guarujá no SimPowerSystems e no PSCAD. Serviram também para validar a metodologia utilizada no desenvolvimento do GPARD considerando valores de medição e não somente valores de simulação.

A Figura 6.1 apresenta o diagrama do sistema Guarujá onde as medições foram realizadas nas seguintes condições: fechamento do paralelismo entre os alimentadores GUT40 e GUT47, alimentados respectivamente pelos transformadores TR-1 - 25/33,33 MVA - 138-13,8 kV e TR-2 - 15/18,75 MVA – 138-13,8 kV da subestação Guarujá (SE), através da chave 2 (1732), manobrada pelo Centro de Operação da Distribuição em Campinas/SP. A chave 1 foi manobrada por um operador na subestação Guarujá.



Figura 6.1 – Diagrama simplificado da manobra de paralelismo.

A seguinte sequência de manobras foi realizada para os registros das medições:

- a) Fechamento da chave 2 com as barras de 13,8 kV fechadas através da chave 1 na SE;
- b) Abertura da chave 2 com as barras de 13,8 kV fechadas através da chave 1 na SE;
- c) Fechamento da chave 2 com as barras de 13,8 kV separadas na SE;
- d) Abertura da chave 2 com as barras de 13,8 kV separadas na SE.

Para as medições das tensões foram necessárias algumas alterações no esquema, pois existiam transformadores de potenciais (TP's), ligados em V, somente no lado da chegada do alimentador GUT40. No lado da chegada do alimentador GUT47 foi necessário recorrer a um transformador trifásico de distribuição, com ligação Dy1⁷, Figura 6.2.



Figura 6.2 – TP do lado de chegada do alimentador GUT40 na chave de manobra.

⁷ O deslocamento angular, nos transformadores trifásicos ligados em triângulo-estrela é de 30°, com as fases de baixa tensão atrasadas em relação às correspondentes da alta tensão. A representação fasorial destas tensões associa-se a índices horários sendo a ligação Dy1 correspondente a 1 hora (CAPARO 2005).

As medições foram registradas pelo Registrador Digital de Perturbação – RDP oscilógrafo de alta precisão da *Yokogawa DL789E*⁸, portátil de 16 canais isolados, projetado com arquitetura de 8 módulos encaixáveis com possibilidade de serem trocados, largura de banda de 3 MHz, taxa de amostragem 10 MS/s, parametrizado e operado por especialistas no assunto, Figura 6.3.



Figura 6.3 – Ligações do osciloscópio para o registro das medições das tensões.

⁸ Fonte: <u>http://www.yokogawa.com/ymi/useful/YMI120-E_010.pdf</u> acessado em: 02/11/2012.

As tensões registradas correspondem às de linha (C-B), medidas conforme o esquema de ligações mostrado na Figura 6.4.



Figura 6.4 – Esquema de ligação para o registro das medições das tensões.

6.1.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os arquivos dos registros foram fornecidos em formato *.txt*. Por isso foi necessário construir os gráficos no MATLAB e encontrar os instantes que registram a transição do fechamento e da abertura da chave de manobra. Para melhor visualização das tensões na faixa de transição foram considerados somente os picos positivos tanto nos gráficos das medições quanto nos gráficos das simulações, conforme mostrado na Figura 6.5.



Figura 6.5 – Gráficos dos registros das medições no MATLAB, o retângulo demarca os instantes de transição da chave de manobra.

Comparação dos resultados das medições no campo com os resultados das simulações, correspondentes às tensões de linha (C-B) de acordo com as medições realizadas.



Figura 6.6 – Fechamento da chave 2 com a chave 1 fechada.



Figura 6.7 – Abertura da chave 2 com a chave 1 fechada.





Figura 6.8 – Fechamento da chave 2 com a chave 1 aberta.





Figura 6.9 – Abertura da chave 2 com a chave 1 aberta.

6.1.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIÇÕES

- Oscilações na região do valor de pico da tensão do lado do alimentador GUT47: Este aspecto pode ser explicado pelo fato de a tensão do lado do alimentador GUT47 ser proveniente de transformador de distribuição e não de um TP, como é o caso do lado do alimentador GUT40, sendo o TP o equipamento apropriado para a medição, o que não se pode afirmar para o transformador de força comum.
- 2. Diferenças nas tensões nos dois lados da chave após o seu fechamento: Pode-se afirmar que as tensões primárias em ambos os lados da chave serão iguais após o seu fechamento. Assim, para explicar o segundo aspecto deve-se considerar que as relações de transformação do TP e do transformador de força são diferentes, o que pode reproduzir os valores secundários diferentes.

6.1.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MANOBRAS DE PARALELISMO

Sobre as manobras de paralelismo, a princípio, a terceira e a quarta manobras eram consideradas pelos operadores do sistema como as mais críticas para o sistema Guarujá, porque seriam realizadas com a chave 1 aberta sem que as tensões nos alimentadores GUT40 e GUT47 estivessem equalizadas, como aconteceu na primeira e segunda manobras. A preocupação era que estas manobras de paralelismo originassem um desequilíbrio no sistema a ponto de fazer atuar alguma proteção do sistema, o que não se verificou na ocasião. As tensões tanto no fechamento como na abertura do paralelismo, com as barras de 13,8 kV da subestação Guarujá fechadas ou abertas, não apresentaram variações muito diferentes. Tanto nas medições como nas simulações não foram notadas alterações transitórias relevantes nas tensões nos momentos do fechamento ou da abertura da chave de manobra.

As manobras e os registros das medições foram encerradas às 11:55 h, período considerado como carga média (PRODIST 2005), que serviu de comprovação para a concessionária que estas manobras de paralelismo podem ser realizadas nos alimentadores GUT40 e GUT47, com segurança tanto para o sistema quanto para os consumidores para este período de carga, podendo estas manobras serem incorporadas nos Procedimento da Operação destes alimentadores proporcionando flexibilidade operacional. A próxima etapa seria efetuar manobras de paralelismo nestes alimentadores para o período de carga pesada.

Capítulo 7

Conclusões

A ferramenta computacional desenvolvida GPARD apresenta uma interface gráfica amigável podendo ser utilizado por qualquer usuário, principalmente pelos operadores do sistema na realização de manobras de paralelismo durante a operação ou em estudos prévios. O GPARD realiza as simulações de manobras de paralelismo de alimentadores usando as informações dos bancos de dados da concessionária sem a necessidade da implementação gráfica do sistema do estudado, agilizando assim a sua utilização, sem perda de tempo para tratamento das informações ou a necessidade de conhecimento de informática. O GPARD também pode ser utilizado no treinamento de novos operadores do sistema.

As simulações das manobras de paralelismo realizadas com o GPARD apresentam resultados compatíveis com as encontradas com programas tradicionais de simulação de sistema elétricos.

As medições realizadas em campo serviram para comprovar que os modelos teóricos do sistema Guarujá implementados no SimPowerSsytems e PSCAD reproduzem corretamente os resultados obtidos em campo, que os resultados das simulações realizadas com o GPARD também reproduzem corretamente os resultados encontrados nas medições, validando assim toda a modelagem matemática desenvolvida para o GPARD.

Para a concessionária as medições em campo serviram para comprovar que as manobras de paralelismo dos alimentadores GUT40 e GUT47 são viáveis para o período de carga média para a qual foram realizadas as manobras de paralelismo podendo ser incorporado aos procedimentos da operação destes alimentadores.

Entretanto manobras de paralelismo entre alimentadores radiais de distribuição não podem ser generalizadas, cada caso deve ser estudado individualmente, cada sistema possui características operacionais próprias que variam de acordo com o período de carga em que são realizadas as manobras de paralelismo. Neste contexto o GPARD é uma ferramenta computacional que contribui na operação de sistemas de distribuição porque possibilita aos operadores do sistema realizar estudos prévios ou durante a operação do comportamento do sistema em diferentes períodos de carga resultando em flexibilidade operacional. Com base na análise gráfica de resultados de simulação e de medições remotas, os operadores do sistema podem decidir pela realização ou não de manobras de paralelismo entre os alimentadores analisados, com segurança tanto para o sistema quanto os consumidores.

Dentre as possibilidades de utilização do GPARD estão: o treinamento de novos operadores do sistema, a análise do comportamento do sistema para diferentes configurações dos alimentadores pela troca de transformadores, adição de trechos, troca de condutores, retirada ou colocação de bancos de capacitores, a análise do comportamento do sistema para diferentes condições operacionais, pela mudança nos níveis de tensão e ângulo das subestações.

Para a melhora da operação do GPARD sugere-se realizar futuramente as seguintes ações:

- a) Integrar o GPARD ao programa de gerenciamento de dados da concessionária, o que deve ser feito com acompanhamento dos profissionais responsáveis por este setor;
- b) Continuar o aperfeiçoamento do GPARD que deve ser utilizado por diferentes usuários, em especial os operadores do sistema, cujas informações são valiosas para encontrar falhas que muitas vezes só são detectadas pela utilização;

- c) Realizar estudos com diferentes sistemas de distribuição, que possuem cargas não lineares, geração distribuída que deverão ser modeladas no GPARD e validadas posteriormente em medições em campo;
- d) Realizar manobras de paralelismo em alimentadores pertencentes a diferentes subestações.

Num ambiente moderno de sistemas de distribuição de energia inteligentes (smart grid) um aplicativo como este poderá ser de grande utilidade. Considerando-se que todos os dados, obtidos por medições enviados através de sistemas de telemetria, podem estar disponíveis no sistema de computação da concessionária de energia elétrica é possível com eles realizações e ações rápidas para decisão sobre colocação de transformadores em operação em paralelo.

Publicações

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F.; *et alli,* "Estudo dos Impactos de Transitórios de Tensão e Corrente Resultantes da Manobra de Paralelismo de Transformadores". In: SISPOT Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência, FEEC/UNICAMP, São Paulo 2006.

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F.; *et alli,* "Study of the Impacts on Voltages and Currents Transients Resultant of the Parallellism Between Substation Transformers". In: VII INDUSCOM Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Recife 2006.

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F.; *et alli,* "Estudo dos Impactos de Transitórios de Tensão e Corrente Resultantes da Manobra de Paralelismo de Transformadores". In: XVII SENDI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte 2006.

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F.; *et alli, "*Studies of Electrical Distribution Radial Feeders Parallelism". In: 9^o COBEP Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Blumenau 2007.

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F., "Estudo de Paralelismo de Alimentadores Radias de Distribuição com o PSCAD". Revista SBA: Controle e Automação 2012 (em avaliação).

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F., "Gerenciador de Paralelismo de Alimentadores Radias de Distribuição - GPARD". In: XXII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília 2013. (em avaliação).

Referências

ALMEIDA, R. M. A., "Sistema SCADA e Aplicação". Monografia – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza 2009.

ARAUJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A., "Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia". Ed. UFMG, 2005.

BERMAN, A.; MARKUSHEVICH, N., "Analysis of Three-Phase Parallel Distribution Feeders Fed from Different Substations", IEEE PES 2010 Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, LA, USA 2010.

BERNARDON, D.P. ; VEIGA, F. D., "Modelagem e Aplicação do Programa ATP para Estudos de Paralelismo nas Redes de Distribuição Atendidas por Subestações de Diferentes Fontes". In: XVII SENDI -. Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte 2006.

BLINKDAGGER; "MATLAB GUI (Graphical User Interface) Tutorial for Beginners".

http://blinkdagger.com/matlab/matlab-gui-graphical-user-interface-tutorial-for-beginners/.

BORGES, C. L., "Técnicas Aplicadas a Cadastro de Redes de Concessionárias de Energia Elétrica, para o Desenvolvimento de *Softwares*, para Estudos em Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado – Instituto de Sistemas Elétricos e Energia – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais 2005.

CAPARO, J. L. C., "Modelagem de Transformadores de Distribuição para Aplicação em Algoritmos de Fluxo de Potência Trifásicos". Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita", Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, São Paulo 2005.

CHEN, T. H.; HUANG, W. T.; *et alli,* "Feasibility Study of Upgrading Primary Feeders from Radial and Open-Loop to Normally Closed-Loop Arrangement", IEEE Transaction Power Systems, August 2004.

COSTA, A. C., "Uma Panorâmica Sobre Sistemas SCADA". Technical Report, RT/14-95, INESC, Lisboa, Portugal, June 1995. <u>http://www.di.fc.ul.pt/~casim/papers/rt14-95/rt14-95.pdf.</u>

CRISPINO, F. ; JARDINI, J. A. ; MAGRINI, L. C. ; SCHMIDT, H. P., "Automação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica". Revista C & I. Controle & Instrumentação, Vol. 51, p. 1622, Outubro, São Paulo 2000.

D'AJUZ, A., "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento", FURNAS, Niterói, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

DUARTE, A. N., "Tratamento de Eventos em Redes Elétricas: Uma Ferramenta". Dissertação de Mestrado – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Janeiro 2003.

HIGHAM, D. J., "Matlab Guide", Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.

HUANG, W.T.; CHEN, T.H., "Assessment of Upgrading Existing Primary Feeders from Radial to Normally Closed Loop Arrangement", Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE/PES, Vol. 3, pp. 2123-2128, 2002.

JAUCH, E.T., "Advanced Transformer Paralleling", Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES 2001.

JAUCH, E.T., "Circulating Current Paralleling Failures— Conditions & Consequences", Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE 2008.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J., "Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica". 1 ed, Editora Edgrad Blücher Ltda, São Paulo 2005.

KNIGHT, A., "Basics of MATLAB and Beyond". Chapman & Hall/CRC, CRC Press LLC, N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2000.

LEE, C.H.; HUANG, C. M., "Analysis of Load Transfer on Radial Distribution Systems With Tie Lines", European Transactions on Electrical Power Euro. Trans. Electr. Power 2007;

LOPES, H. C.; CAPINOS, C. U., "Análise Comparativa das Perdas em Alimentadores Operando nas Topologias Radial e Anel". VIII CBQEE 2009 – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Blumenau, Santa Catarina 2009.

MATHWORKS, "SimPowerSystems for Use with Simulink". User's Guide Version 3, Copyright TransÉnergie Technologies Inc., under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks, Inc., 1998-2003.

<u>http://www.mathworks.com/help/releases/R13sp2/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf.</u> MANITOBA, "Introduction to PSCAD/EMTDC V3". Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2001.

MATSUMOTO, E. Y., "MATLAB 6.5 Fundamentos de Programação", Ed. Érica, São Paulo 2002.
MENEZES, R. S.; OLIVEIRA, N. I.; *et alli*, "Sistema Inteligentes para Processamento de Alarmes". VIII SIMPASE – Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, Rio de Janeiro 2009.

PONCE, A. T.; BRITO, B.; SANTOS, E.; *et alli, "*Operação em Tempo Integral de Alimentadores de Distribuição em Anel Fechado". CLADE 2008 – Congresso Latino Americano de Distribuição Elétrica, Mar Del Prata, Argentina, Setembro 2008.

PRODIST, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional", Módulo 2, ANEEL 2005.

SANTOS, M. R.; "Paralelismo de Alimentadores Através de Secccionadoras de Vis-À-Vis na Rede Aérea Primária de Distribuição". Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo 2008.

SATO, F., "Cálculos de Equivalentes Externos Para Análise de Curtos Circuitos", CPFL, Campinas, Março de 1981.

SIQUEIRA, A. F.; JUNIOR, M. M., "Construindo Interfaces Gráficas com o MATLAB". Universidade Estadual Paulista 2010.

http://www4.fct.unesp.br/simposios/SMAT/2010/documentos/Apostila MC 11.pdf.

SOARES, A. B. J.; FILHO, E. R.; SATO, F.; FILHO,P. J.; PERSON, M. C.; CAMARGO, D. B., "Study of the Impacts on Voltages and Currents Transients Resultant of the Parallelism Between Substation". In: INDUSCOM 2005 – VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Recife, Pernambuco 2006.

THOMSON, M., "Automatic Voltage Control Relays and Embedded Generation Part 1 and 2". Power Engineering Journal, pp. 71-99, April 2000

VIEIRA, D., R., "Criando uma Interface Gráfica para obter Distâncias entre Pontos em uma Figura" 2009. <u>http://alunoca.io.usp.br/~drvieira/matlab/gui-ptos/.</u>
Bibliográfia

ABETTI, P. A., "Transformer Models for the Determination of Transient Voltages", AIEE Transactions, pp. 468-480, 1953.

BAK-JENSEN, J.; BAK-JENSEN, B.; *et alli,* "Parametric Identification in Potential Transformer Modelling", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, n^o. 1, January 1992.

BARBOSA, D.; NETTO, U. C.; BRANCO, H. M. G. C.; COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M., "Impacto do Paralelismo na Proteção Diferencial de Transformadores de Potência". O Setor Elétrico, p. 68-73, Fevereiro 2010.

CIPOLI, A. J., "Engenharia de Distribuição," Rio de Janeiro, Ed.Qualitymark, 1993.

DEGENEFF, R. C.; NEUGEBAUER, W.; PANEK, J.; *et alli,* "Transformer Response to System Switching Voltages", IEEE PES Summer Meeting, Portland, July 26-31, Oregon 1981.

DOLINAR, D.; PIHLER, J.; GRCAR, B., "Dinamic Model of a Three-Phase Power Transformer", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, n^o. 4, October 1993.

DOMMEL, H. W., "EMTP Theory Book", Second Edition, Microtran Power Systems Analysis Corporation, Vancouver, BC, May 1992.

DURK, S.; LATEEF, S.; BAGHZOUZ, Y.,"Feeder Switch Currents During Load Transfer", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.

FUCHS R. D., "Transmissão de Energia Elétrica", 2ª ed., Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro 1977.

IOAN, D.; MUNTEANU, I., "Models for Capacitive Effects in Iron Core Transformers", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, nº. 4, July 2000.

JOHNSON, D. E.; JOHN, L. H.; JOHNSON, J. R., "Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos", 4 ed., Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro 2000.

JOHNSON, W. C., "Linhas de Transmissão e Circuitos", Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro 1980.

KOSOW, I. L., "Máquinas Elétricas e Transformadores". 8 ed., Ed. Globo, São Paulo 1989.

LEÓN, F., SEMLYEN, A., "Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, n^o. 1, January 1994.

McNUTT, W. W., BLALOCK, T. J., HINTON, R. A., "Response of Transformer Winding to Systems Transient Voltages", IEEE Transactions on Power Apparatus end Systems, Vol.PAS-93, pp. 457-466, March/April 1974

MOKHTARI, H., IRAVANI, M. R., DEWAN, S. B., "Transient Behavior of Load Transformer During Subcycle Bus Transfer", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, nº. 4, October 2003.

MOKHTARI, H., IRAVANI, M. R., "Impact of Difference of Feeder Impedance on the Performance of a Static Transfer Switch", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, n^o. 2, April 2004.

MORCHED, A., MARTI, L., OTTEVANGERS, J., "A High Frequency Transformer Model for the EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, n^o. 3, July 1993.

NAIDU, S. R., "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência", Ed. Grafset, Campina Grande 1985.

OZGONENEL, O., ONBILGIN, G., "Simulation of Power Transformers Using State Variables", IEEE Power Engineering Review, October 2002.

PALUEFF, K. K, "Effect of Transient Voltages on Power Transformers Design III", Winter Convention of the AIEE, New York, January 1931.

PALUEFF, K. K, HAGENGUTH, J.H., "Effect of Transient Voltages on Power Transformers Design IV", Winter Convention of the AIEE, New York, January 1932.

SEN, P. C., "Principles of Electrical Machines and Power Electronics". 2 ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc, USA 1997.

SHEN, K. Y.; GU, J. C., "Protection Coordination Analysis of Closed-Loop Distribution System", PowerCon 2002 - International Conference on Power System Technlogy, 2002.

STEVENSON JR, W. D., "Elementos de Análise de Sistemas de Potência", 2 ed., Ed. McGraw-Hill, São Paulo 1986.

TAVARES, M. C. D.; CAMPOS, P. G.; PRADO, P., "Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program". Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2003.

http://www.dsce.fee.unicamp.br/~cristina/pos%20graduacao/GUIA.ATP.pdf

VAKILIAN, M., DEGENEFF, R. C., "A Method for Modeling Nonlinear Core Characteristic of Transformers During Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, n^o. 4, October 1994.

ZANETTA Jr., L. C., "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência", São Paulo, EDUSP, 2003.

Apêndice A

Determinação de Parâmetros de Transformadores Trifásicos através dos Ensaios de Rotina dos Fabricantes

Para a determinação dos parâmetros de transformadores trifásicos os fabricantes executam ensaios de rotina de acordo com a Norma NBR-5380, dentre estes ensaios, os ensaios de perdas (em vazio e em carga), de corrente de excitação e de tensão de curto-circuito têm os seus resultados utilizados na determinação de parâmetros de transformadores.

A.1 Ensaio de Curto-Circuito

A Figura A.1 mostra o esquema de ligação para o ensaio em curto-circuito de transformador trifásico.



Figura A.1 – Ensaio de curto circuito em transformador trifásico.

Ligam-se em curto circuito os três terminais de baixa tensão e liga-se ao primário uma fonte trifásica de tensões simétricas, na frequência nominal do transformador. Ajusta-se o valor destas tensões até que circule a corrente nominal no lado em curto circuito.

A partir das leituras dos instrumentos e dos dados nominais do transformador determinam-se os parâmetros série em pu, conforme se segue:

$$v_{CC} = \frac{V_{CC}}{V_n} \tag{A.1}$$

$$P_{CC} = \frac{\left(P_1 + P_2\right)}{S_n} \tag{A.2}$$

 V_{cc} é a tensão de curto circuito, v_{cc} é a tensão de curto circuito em pu, V_n é a tensão nominal, P_1, P_2 são as potências ativas nos enrolamentos do transformador, P_{cc} são as perdas de curto circuito em pu e S_n é a potência aparente nominal do transformador.

$$i_{CC} = \frac{I_{CC}}{I_n} = 1,0$$
 (A.3)

 I_{cc} é a corrente de curto circuito, i_{cc} é a corrente de curto circuito em pu, e I_n é a corrente nominal.

Assim,

$$z_{CC} = \frac{v_{CC}}{i_{CC}} \tag{A.4}$$

$$r_{CC} = \frac{P_{CC}}{i_{CC}^2} \tag{A.5}$$

 z_{cc} é a impedância de curto circuito em pu, e r_{cc} é a resistência de curto circuito em pu.

A reatância série do circuito equivalente monofásico é calculada por:

$$x_{d} = \sqrt{z_{CC}^{2} - r_{CC}^{2}}$$
(A.6)

 x_d é a reatância de dispersão em pu.

A.2 Ensaio a Vazio

A Figura A.2 mostra o esquema de ligação para o ensaio a vazio de transformadores trifásicos.



Figura A.2 – Ensaio a vazio em transformador trifásico.

Com os três terminais de alta tensão abertos liga-se uma fonte trifásica de tensões simétricas, na frequência nominal do transformador, nos terminais de baixa tensão. Ajusta-se o valor destas tensões até no valor nominal.

A partir das leituras dos instrumentos e dos dados nominais do transformador determinam-se os parâmetros *shunt* em *pu*, conforme se segue:

$$v_o = \frac{V_o}{V_n} \tag{A.7}$$

$$i_o = \frac{I_o}{I_n} \tag{A.8}$$

$$p_o = \frac{\left(P_1 + P_2\right)}{S_n} \tag{A.9}$$

$$\cos\left(\phi_{o}\right) = \frac{p_{o}}{v_{o}i_{o}} = \frac{p_{o}}{i_{o}} \tag{A.10}$$

 V_0 é a tensão a vazio, v_0 é a tensão a vazio em pu, I_0 é a corrente a vazio, i_0 é a corrente a vazio ou de excitação em pu, I_n é a corrente nominal, p_0 são as perdas a vazio em pu, e $\cos(\phi_0)$ é o fator de potência a vazio.

Considerando-se que os parâmetros *shunt*, que representam o modelo, se compõem de um circuito resistivo em paralelo com um circuito indutivo, a corrente de excitação i_0 terá duas componentes, i_{fe} e i_m em quadratura, obtidas a partir de:

$$i_{fe} = i_o \cos\left(\phi_o\right) \tag{A.11}$$

$$i_m = i_o sen(\phi_o) \tag{A.12}$$

 i_{fe} é a corrente na resistência de dispersão do transformador e i_m é a corrente na reatância de dispersão do transformador.

Desta forma os valores dos parâmetros shunt poderão ser calculados a partir de:

$$r_{fe} = \frac{v_o}{i_{fe}} \tag{A.13}$$

$$x_m = \frac{v_o}{i_m} \tag{A.14}$$

 r_{fe} é a resistência de dispersão do transformador e x_m é a reatância de magnetização do transformador.

Apêndice B

Método de Redução de Kron

B.1 Método de Redução de Kron

Em muitos casos é necessário reduzir uma rede de sistema de energia elétrica para uma rede de dimensão menor. A Figura B.1 mostra um sistema elétrico dividido em três subsistemas: interno (I), fronteira (F) e externo (E).

O subsistema interno (I) é totalmente preservado, enquanto que o subsistema externo é reduzido a uma rede equivalente, cujos ramos são ligados no subsistema fronteira (F).

Para a maioria dos casos a dimensão do subsistema externo (E) é bem maior do que o subsistema interno (I), o que significa que as simulações são feitas numa rede bastante reduzida.



Figura B.1 – Rede de sistema de energia elétrica.

Considerando os três subsistemas a matriz de admitância nodal é dada por:

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0\\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI}\\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \overline{V_E} \\ \overline{V_F} \\ \overline{V_I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{I_E} \\ \overline{I_F} \\ \overline{I_I} \end{bmatrix}$$
(B.1)

I^{*E*} vetor das correntes da rede externa, *I*^{*F*} vetor das correntes da fronteira, *I*^{*I*} vetor das correntes da rede interna, $\overline{V}_{\overline{E}}$ vetor das tensões da rede externa, $\overline{V}_{\overline{F}}$ vetor das tensões da fronteira, \overline{V}_{I} vetor das tensões da rede interna, *Y*^{*EE*} submatriz das admitâncias da rede externa, *Y*^{*EF*} submatriz das admitâncias da fronteira, *Y*^{*II*} submatriz das admitâncias da rede interna, *Y*^{*EF*} submatriz das admitâncias da rede externa, *Y*^{*EF*} submatriz das admitâncias da rede externa e fronteira, *Y*^{*FE*} submatriz das admitâncias da fronteira e rede externa, *Y*^{*FE*} submatriz das admitâncias da fronteira e rede admitâncias da rede externa e fronteira.

Na equação (B.1) serão eliminadas as variáveis do vetor $\overline{V_E}$, o que equivale a eliminar todos os nós do subsistema externo (E). Isolando $\overline{V_E}$ e substituindo nas demais equações:

$$\left(Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF}\right)\overline{V_F} + Y_{FI}\overline{V_I} = \overline{I_F} - \overline{I_E}Y_{FE}Y_{EE}^{-1}$$
(B.2)

$$Y_{IF}\overline{V_F} + Y_{II}\overline{V_I} = \overline{I_I}$$
(B.3)

que escrita na forma matricial será:

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EF}^{-1}Y_{EF} \end{pmatrix} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \overline{V_F} \\ \overline{V_I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{I_F} - \overline{I_E}Y_{FE}Y_{EE}^{-1} \\ \overline{I_I} \end{bmatrix}$$
(B.4)

sendo:

$$Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF} = Y_{FF}^{eq}$$
(B.5)

A submatriz Y_{FF}^{eq} é conhecida como r*edução de Kron* e nela estão refletidas todas as mudanças da rede, provenientes das eliminações dos nós externos.

Após o processo de substituição, as submatrizes Y_{FI} , Y_{IF} e Y_{II} permanecem inalteradas.

As ligações equivalentes são geradas operando-se com os elementos das submatrizes Y_{FF}^{eq} e Y_{FI} .

Lembrando do algoritmo de formação da matriz nodal de admitância Y_{barras} em que o elemento *i,i*, da diagonal, é a somatória de todas as admitâncias ligadas à barra *i* e que o elemento *i*, *j*, fora da diagonal, é o negativo da admitância *i*-*j*, as admitâncias equivalentes *shunt* e série são obtidas respectivamente pelas equações:

$$Y_{0-i}^{eq} = Y_{(i,i)} + \sum_{j=k} Y_{(i,j)}$$
(B.6)

$$y_{i-j}^{eq} = -Y_{(i,j)} - y_{(i-j)}$$
(B.7)

 $y_{(i-j)}$, a admitância série da linha *i-j*, se esta ligação for considerada como elemento integrante da área retida.

Portanto, o sistema reduzido é mostrado na Figura B.2.



Figura B.2 – Ligações equivalentes obtidas pela redução de Kron.

B.1.1 SISTEMA EXEMPLO

O sistema exemplo, mostrado na Figura B.3, consiste de uma rede de 6 barras em que os nós 1, 2 e 3 constituem o subsistema externo, as barras 4 e 5 são as fronteiras e a barra 6 interna, os ramos são resistivos e os seus valores são dados em ohms.



Figura B.3 – Diagrama de resistências do sistema exemplo.

A Figura B.4 mostra a mesma rede, com os valores dos parâmetros convertidos em condutância. A partir desses dados são formados os elementos da matriz condutância, mostrado na equação (B.8):



Figura B.4 – Diagrama de condutâncias do sistema-exemplo.

A equação (B.8) representa a matriz $G_{Barra,}$ formada pelas submatrizes apresentadas nas Equações (B.9) a (B.12):

$$G_{Barra} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 2,33333 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1,33333 \end{bmatrix}$$
(B.8)

$$G_{EE} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 \\ -1 & 2,33333 & -1 \\ 0 & -1 & 3 \end{bmatrix}$$
(B.9)

$$G_{EF} = \begin{bmatrix} -1 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(B.10)

$$G_{FE} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(B.11)

$$G_{FF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1,33333 \end{bmatrix}$$
(B.12)

 G_{Barra} matriz nodal de condutância, G_{EE} matriz condutância da rede externa, G_{EF} matriz condutância da rede externa e fronteira, G_{FE} matriz condutância da fronteira e rede externa, G_{FF} matriz condutância da fronteira.

A redução de Kron é então obtida pela equação (B.13):

$$G_{FF}^{eq} = \left(G_{FF} - G_{FE}G_{EE}^{-1}G_{EF}\right)$$
(B.13)

G^{FQ} matriz redução de Kron.

Que em valores numéricos será:

$$G_{FF}^{eq} = \begin{bmatrix} 0,60 & -0,06666 \\ -0,06666 & 0,93333 \end{bmatrix}$$
(B.14)

A partir dos valores da matriz G_{FF}^{eq} obtém-se:

$$r_{4-5}^{eq} = -(1/-0,06666) = 15\Omega \tag{B.15}$$

$$r_{0-4}^{eq} = 1/(0,60-0,06666) = 1,875\Omega$$
(B.16)

$$r_{0-5}^{eq} = 1/(0,93333 - 0,06666) = 1,15385\Omega$$
(B.17)

Assim, a Figura B.5 mostra o sistema equivalente.



Figura B.5 – Diagrama de resistência equivalente do sistema exemplo.

Anexo

1 Relatório de ensaios do transformador de 25 MVA

2 Relatório de ensaios do transformador de 15 MVA

And the second	WEG TRANSFORM	DORES LTDA.		
	ENSAIO DE ROTINA I	DE TRANSFORMAD	QR	
LIENTE : R.SERIE : 16710	0 SEQ.ENSAIO :	0	DT.ENSAIC	02/10/2000
OTENCIA : 25000.0 TEM : 3004.5890 T. CALCULO:	ORDEM FABRIC.:	MS000	NR. FASES:	3
NICERS NOMINATS				RESUMO
TENS.PRIM. : 13800 TENS.SECUND. : 13800 FIPO LIGACAO : ESTREL REQUENCIA : 60HZ RORMAS 9440/87 5356/9	144900V Ifas V/7967V Ifas A/ESTRELA DESL POLA 3 E 5380/93	8 : 99.6 8 : 1045.9 .ANG: 0° RID.: SUBTRATI	1A 10 2A P0 P1 VA P1 83	0: 0.11% 0: 19905.60W &: 75641.33W 0: 95546.93W 4: 10.71%
ESISTENCIA ELETRICA	DOS ENROLAMENTOS		TEMP.AMBIENT	\$: 29.00°C
POSICAO BORNES 144900 H1-H0 0. 144900 H2-H0 0. 144900 H3-H0 0.	R R/FASE 8602000Ω 0.86020 8597600Ω 0.85976 8625600Ω 0.86256	BORNES 00Ω X0-X1 00Ω X0-X2 00Ω X0-X3	R 0.0077900Ω 0.0077490Ω 0.0077980Ω	R/EASE 0.0077900Ω 0.0077490Ω 0.0077980Ω
RILACAO DE TRANSFORMA	ICAO			
POSICAO TENSAO REL.M	NOM. FASE 1 VAR (<pre>%) FASE 2 23 10.4630 -</pre>	VAR(%) FAS	E 3 VAR.(%) 550 -0.3333
PERDAS A VAZIO		TENSAO : 3	3800¥	
PBRDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT.CORRECAO VL.1 4.0 0	ACAO MEDIDO IO .3000 1.2000A	TENSAO : 3 PERDAS A VAZIO FAT.CORR. VL.1 880.0 22	3800V MEDIDO PO 6200 19	905.60W
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT, CORRECAO VL. 4.0 0 PERDAS EM CARGA TEMI	ACAO MEDIDO IO .3000 1.2000A PERATURA: 19.00	TENSAO : PERDAS A VAZIO FAT. CORE. VL. 880.0 22 TENSAO : 14	3800V MEDIDO PO 6200 19 14900V	905.60₩
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT, CORRECAO VL. 4.0 0 PERDAS EM CARGA TEMI FAT. CORRECAO VL. 220.0 70	ACAO MEDIDO I0 .3000 1.2000A PERATURA:19.00 MEDIDO V2 .5700 15525.40V	TENSAO : PBRDAS A VAZIO FAT.CORR. VL.1 880.0 22 TENSAO : 14 FAT.CORR. VL.1 8800. 7	3800V MEDIDO PO 6200 19 14900V MEDIDO PZ 5900 66	905.60W 792.00W
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT.CORRECAO VL.1 4.0 0 PERDAS EM CARGA TEMI FAT.CORRECAO VL.1 220.0 70 P.OHMICAS A 75°C	ACAO MEDIDO I0 .3000 1.2000A PERATURA:19.00 MEDIDO V2 .5700 15525.40V PERDAS ADICI	TENSAO : 3 PERDAS A VAZIO FAT.CORE.VL.1 880.0 22 TENSAO : 14 FAT.CORR.VL.1 8800. 7 ONAIS A 75°C	3800V MEDIDO PO .6200 19 14900V MEDIDO PZ .5900 66 EX:	905.60W 792.00W 10.71%
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT, CORRECAO VL.1 4.0 0 PERDAS EN CARGA TEMI FAT.CORRECAO VL.1 220.0 70 P.OHMICAS A 75°C P.OHMICAS AT : 3009 P.OHMICAS BTI: 2998 P.OHMICAS TOT: 6008	ACAO MEDIDO IO .3000 1.2000A PERATURA:19.00 MEDIDO V2 .5700 15525.40V PERDAS ADICI 8.55W 6.49W 5.04W	TENSAO : 3 PERDAS A VAZIO FAT.CORR.VL.M 880.0 22 TENSAO : 14 PAT.CORR.VL.M 8800. 7 ONAIS A 75°C 15556	3800V MEDIDO PO 6200 19 14900V MEDIDO PZ 5900 66 EX: ER: 28W	905.60W 792.00W 10.71% 0.30%
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT.CORRECAO VL.1 4.0 0 PERDAS EN CARGA TEMI FAT.CORRECAO VL.1 220.0 70 P.OHMICAS A 75°C P.OHMICAS AT : 3009 P.OHMICAS BTI: 2998 P.OHMICAS TOT: 6008 RESIST.ISOLAMENTO	ACAO MEDIDO IO .3000 1.2000A PERATURA: 19.00 MEDIDO VZ .5700 15525.40V PERDAS ADICI 8.55W 6.49W 5.04W TENSAO INDUZI	TENSAO : 3 PBRDAS A VAZIO FAT.CORR.VL.1 880.0 22 TENSAO : 14 PAT.CORR.VL.1 8800. 7 ONAIS A 75°C 15556	3800V MEDIDO PO 6200 19 14900V MEDIDO PZ 5900 66 EX: ER: 28W TENSAO APLIC	905.60W 792.00W 10.71% 0.30%
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCITI FAT.CORRECAO VL.1 4.0 0 PERDAS EM CARGA TEMI FAT.CORRECAO VL.1 220.0 70 P.OHMICAS A 75°C P.OHMICAS AT : 3009 P.OHMICAS AT : 3009 P.OHMICAS AT : 3009 P.OHMICAS TOT: 6008 RESIST.ISOLAMENTO AT-BT : 1000 AT-BTM : 1200 BT-ATM : 500	ACAO MEDIDO IO .3000 1.2000A PERATURA: 19.00 MEDIDO VZ .570D 15525.40V PERDAS ADICI 8.55W 5.49W 5.04W TENSAO INDUZI 0MQ FREQUENCIA: 0MQ TEMPO : 0MQ NOMINAL : APLICADA :	TENSAO : PERDAS A VAZIO FAT.CORR. VL.1 880.0 22 TENSAO : 14 PAT.CORR. VL.1 8800. 7 CONAIS A 75°C 15556 DA 240HZ 308 13800V 27600V	ABOOV ABDIDO PO 6200 19 44900V ABDIDO PZ 5900 66 EX: ER: 28W TENSAO APLIC FREQUENCIA: TEMPO : AT-BIM : BT-AIM ;	905.60W 792.00W 10.71% 0.30% ADA 60S 230KW 34KV
PERDAS A VAZIO CORRENTE DE EXCIT FAT.CORRECAO VL.1 4.0 0 PERDAS EN CARGA TEMI FAT.CORRECAO VL.1 220.0 70 P.OHMICAS A 75°C P.OHMICAS A 75°C P.OHMICAS AT : 3009 P.OHMICAS BTI: 2998 P.OHMICAS BTI: 2998 P.OHMICAS TOT: 6008 RESIST.ISOLAMENTO AT-BT : 1000 AT-BTM : 1200 BT-ATM : 500	ACAO MEDIDO I0 .3000 1.2000A PERATURA:19.00 MEDIDO V2 .5700 15525.40V PERDAS ADICI 8.55W 6.49W 5.04W TENSAO INDUZI 0MΩ FREQUENCIA: 0MΩ TEMPO : 0MΩ NOMINAL : APLICADA :	TENSAO : PERDAS A VAZIO FAT. CORE. VL.1 880.0 22 TENSAO : 14 PAT. CORR. VL.1 8800. 7 ISS56 DA 240HZ 13800V 27500V	38000V ABDIDO PO .6200 19 14900V GEDIDO PZ .5900 66 EX: ER: 28W TENSAO APLIC PREQUENCIA: TEMPO : AT-BTM : BT-ATM ;	905.60W 792.00W 10.71% 0.30% ADA 60HZ 60S 230KW 34KV

Figura AI.1 - Relatório de ensaios do transformador de 25 MVA.

CLIENTE : E NR.SERIE : POTENCIA : ITEM : 3 FL.CALCULO:	LEKTRO 51684 S 15000.0KVA 005:6981 0	EQ.ENSAIO RDEM FABRIC.	: 0 ; MS000	DT.EN	SAIO:16/05/2002 SES: 3
VALORES NOMIN	AIS				RESUMO
TENS.PRIM. TENS.SECUND. TIPO LIGACAO PREQUENCIA NORMAS, 5440/8	: 14490 : 1380 : ESTRELA/EST : 60HZ : 5356/93 E 5	OV Ifa OV Ifa RELA DES POL 380/93	se : 5 se : 62 L.ANG: 0° ARID.: SUBTR	9.77A 7.55A ATIVA	IO: 0.64% PO: 23625.92% PE: 72379.21% PT: 96005.13% EZ: 8.62%
RESISTENCIA I	LETRICA DOS E	INROLAMENTOS		TEMP . AMBI	IENTE: 28.00°C
POSICAO BOR 144900 H1-H 144900 H2-H 144900 H3-H	TES R 10 2.28640 10 2.27980 10 2.86200	R/FAS 2.2864 0002 3.4197 0002 2.8620	E BORNES 000Ω X0-X1 000Ω X0-X2 000Ω X0-X3	R 0.022850 0.022760 0.022870	R/FASE 00Ω 0.02285000 00Ω 0.02276000 00Ω 0.02287000
RELACAO DE TI	RANSFORMACAO				
POSICAO TEN	SAO REL.NOM.	FASE 1 VAR	(%) FASE 2	VAR(%)	FASE 3 VAR. (%) 10.4900 -0.0952
PEPDAS A VAZ	10		TENSAO :	13800V	
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT.CORRE 4.0	IO DE EXCITAÇÃO CÃO VL.MEDID 1.0170	0 10 4.0680A	TENSAO : PERDAS A V. FAT.CORR. 544.0	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300	P0 23625.92W
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT. CORRE 4.0 PERDAS EM CA	IO DE EXCITACAO CAO VI.MEDID 1.0170 RGA TEMPERAT	0 10 4.0580A URA:28.00	TENSAO : PERDAS A V FAT.CORR. 544.0 TENSAO :	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300 144900V	P0 23625.92W
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT.CORRE 4.0 PERDAS EM CA FAT.CORRE 136.0	IO DE EXCITACAO CAO VL.MEDID 1.0170 RGA TEMPERAT CAO VL.MEDID 91.8200	0 10 4.0680A URA:28.00 0 VZ 12487.52V	TENSAO : PERDAS A VI FAT.CORR. 544.0 TENSAO : FAT.CORR. 2720.	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300 144900V VL.MEDIDO 23.7000	P0 23525.92W PZ 64464.00W
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT.CORRE 4.0 PERDAS EM CA FAT.CORRE 136.0 P.OHMICAS A	IO DE EXCITACAO CAO VL.MEDID 1.0170 RGA TEMPERAT CAO VL.MEDID 91.8200 75°C	0 10 4.0680A URA:28.00 0 VZ 12487.52V PERDAS ADIO	TENSAO : PERDAS A V FAT.CORR. 544.0 TENSAO : FAT.CORR. 2720. CIONAIS A 7	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300 144900V VL.MEDIDO 23.7000 5°C EX:	P0 23625.92W PZ 64464.00W 8.61%
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT. CORRE 4.0 PERDAS EM CA PAT. CORRE 136.0 P. OHMICAS A P. OHMICAS AT P. OHMICAS BT P. OHMICAS TO	IO DE EXCITACAO CAO VI.MEDID 1.0170 RGA TEMPERAT CAO VL.MEDID 91.8200 75°C 1.31285.23W VI. 31797.88W VI. 63083.11W	0 10 4.0680A URA:28.00 0 VZ 12487.52V PERDAS ADI	TENSAO : PERDAS A V FAT.CORR. 544.0 TENSAO : FAT.CORR. 2720. CIONAIS A 7 9	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300 144900V VL.MEDIDO 23.7000 5°C EX: ER: 296.10W	P0 23625.92W PZ 64464.00W 8.61% 0.48%
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT.CORRE 4.0 PERDAS EM CA FAT.CORRE 136.0 P.OHMICAS A P.OHMICAS A P.OHMICAS BT P.OHMICAS TO RESIST.ISOLJ	IO DE EXCITACAO CAO VL.MEDID 1.0170 RGA TEMPERAT CAO VL.MEDID 91.8200 75°C 1.31265.23W V1: 31797.88W V1: 63083.11W IMENTO	0 10 4.0680A URA:28.00 0 VZ 12487.52V PERDAS ADIO	TENSAO : PERDAS A VA FAT.CORR. 544.0 TENSAO : FAT.CORR. 2720. CIONAIS A 7 9 ZIDA	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300 144900V VL.MEDIDO 23.7000 5°C EX: ER: 296.10W TENSAO A	P0 23625.92W PZ 64464.00W 8.61% 0.48%
PERDAS A VAZ CORRENTE FAT.CORRE 4.0 PERDAS EM CA FAT.CORRE 136.0 P.OHMICAS A P.OHMICAS A P.OHMICAS AT P.OHMICAS BT P.OHMICAS TO RESIST.ISOLJ AT-BT : AT-BT : BT-ATM :	10 DE EXCITACAO CAO VL.MEDID 1.0170 RGA TEMPERAT CAO VL.MEDID 91.8200 75°C 1.31285.23W V1: 31797.88W V1: 63083.11W IMENTO 23500MΩ 12000MΩ 7490MΩ	0 10 4.0680A URA:28.00 0 VZ 12487.52V PERDAS ADIO TENSAO INDU FREQUENCIA: TEMPO : NOMINAL : APLICADA :	TENSAO : PERDAS A V/ FAT.CORR. 544.0 TENSAO : FAT.CORR. 2720. CIONAIS A 7 9 ZIDA 240H 30S 13800V 27600V	13800V AZIO VL.MEDIDO 43.4300 144900V VL.MEDIDO 23.7000 5°C EX: ER: 296.10W TENSAO A FREQUENC TEMPO AT-BTM BT-ATM	P0 23625.92W PZ 64464.00W 8.61% 0.48% VPLICADA CIA: 60P : 60S : 0P : 34P

Figura AI 2 – Relatório de ensaios do transformador de 25 MVA.