

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

LEONARDO AUGUSTO GHESSI

**ANÁLISE AUTOMATIZADA DAS TENSÕES TRIFÁSICAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO NO CONTEXTO DA QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA**

São Carlos
2012

Leonardo Augusto Ghessi

**ANÁLISE AUTOMATIZADA DAS TENSÕES TRIFÁSICAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO NO CONTEXTO DA QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistema de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

- | | |
|-------|---|
| G418a | <p>Ghessi, Leonardo Augusto</p> <p>Análise automatizada das tensões trifásicas em sistemas de distribuição no contexto da qualidade da energia elétrica / Leonardo Augusto Ghessi; orientador Mário Oleskovicz. São Carlos, 2012</p> <p>Monografia (Graduação em Energia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.</p> <p>1. Sistema elétrico de potência. 2. Qualidade da energia elétrica. 3. Sistema de distribuição. 4. Sistema de transmissão. 5. Variação de tensão de curta duração. 6. Variação de tensão de longa duração. I. Título.</p> |
|-------|---|

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Leonardo Augusto Ghessi

Título: “Análise Automatizada das Tensões Trifásicas em Sistemas de Distribuição no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 27/11/2012,

com NOTA 5,5 (cinco, cinco), pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Mário Oleskovicz (Orientador)
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes
SEL/EESC/USP

M.Sc. Thais Reggina Kempner
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica – EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Resumo

GHESSI, L. A. **Análise Automatizada das Tensões Trifásicas em Sistemas de Distribuição no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica**. 2012. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Este documento diz respeito ao trabalho de conclusão de curso que tem como principal objetivo a realização de uma completa análise no contexto da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) de alguns Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Para este estudo serão utilizados dois sistemas de distribuição (SD) previamente modelados em projetos de iniciação científica, utilizando o *software* ATP (*Alternative Transients Program*), via a interface gráfica do *software* ATPDraw. Nestes cenários, serão simulados diversos distúrbios nas redes de distribuição, tais como os caracterizados pelas Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) e Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD). As oscilografias resultantes serão transportadas para o *software* Matlab[®], onde estas serão processadas de forma automatizada, fornecendo ao usuário final os dados compilados em tabelas, que propiciarão fácil visualização e armazenamento. Esta compilação dos dados será útil para o entendimento do comportamento dos SEP no momento em que uma falta acontece e quando é eliminada do sistema. Serão considerados todos os tipos de faltas passíveis de ocorrência em um SEP, analisando-se a influência de alguns parâmetros, como, por exemplo, o ângulo de inserção de uma falta, sobre os níveis de tensão de pós falta. Para completar o estudo sobre as situações de faltas *versus* os níveis de tensão propagados foi compilado um amplo banco de dados, com o objetivo de realizar estudos sobre o comportamento dos SD frente aos distúrbios que comumente atingem uma rede elétrica. Através deste banco de dados, pretende-se observar a propagação dos distúrbios sobre os SEP. Para finalizar serão apontadas possíveis soluções para amenizar as VTCD observadas.

Palavras chave: Sistema Elétrico de Potência, Qualidade da Energia Elétrica, Sistema de Distribuição, Sistema de Transmissão, Variação de Tensão de Curta Duração, Variação de Tensão de Longa Duração.

Abstract

GHESSI, L. A. **Automated Analysis of Three-Phase Voltage in Distribution System in the Context of Power Quality**. 2012. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

This document reflects the course conclusion project that had as main objective to conduct an analysis in the context of electrical power quality (EPQ) of some electrical power systems (EPS). This study will use two distribution system previously modeled in undergraduate research projects conducted by the student using the software ATP (Alternative Transients Program) through graphic interface of software ATPDraw. In this context, it will be simulated various disturbances in the distribution network, such as those characterized by short-duration voltage variations (SDVV) and long-duration voltage variations (LDVV). The resulting oscillographic records will be transported to the Matlab[®] software, where they are automatically processed, providing the end user the data compiled in tables, which will provide easy viewing and storage. This data compilation is useful for understanding the behavior of EPS in face of the occurrence and clearance of the fault on the system. All types of faults that can occur in an EPS were identified and studied concerning the influence of the insertion angle of the fault on post fault voltage levels. To complete the fault versus voltage levels analyses, it was compiled a huge database, to study the behavior of the EPS in front of disturbances that commonly affect the power grid. Thereby it was intended to observe the propagation of the disturbances on the EPS. Finally, possible solutions to mitigate the short-duration voltage variations were pointed out.

Keywords: Electrical Power Quality (EPQ), Electrical Power System (EPS), Distribution System (DS), Transmission System (TS), Short-Duration Voltage Variations and Long-Duration Voltage Variations.

Lista de Figuras

Figura 1. Metodologia Adotada.....	8
Figura 2. Menu principal da interface gráfica: opção “ATP”.....	10
Figura 3. Opções de configuração do ATP.....	11
Figura 4. Menu principal para a escolha dos elementos de um SEP qualquer.....	12
Figura 5. Opções de escolhas para as linhas/cabos de transmissão.....	12
Figura 6. Opções para as cargas lineares.....	13
Figura 7. Sistema de transmissão modelado.....	14
Figura 8. Parâmetros da linha de transmissão via a interface do ATPDraw.....	16
Figura 9. Janela da interface do ATPDraw para transformadores saturáveis.....	17
Figura 10. Cartão RLC trifásico empregado.....	18
Figura 11. Atributos usados para modelar uma fonte ideal.....	19
Figura 12. Medidores (registradores) de tensão aplicados sobre o sistema modelado.....	19
Figura 13. Sistema de transmissão modelado via a interface do ATPDraw.....	20
Figura 14. Comparação entre os valores desejados com os obtidos via ATPDraw.....	21
Figura 15. Erro absoluto em módulo da tensão em cada barramento.....	21
Figura 16. Sistema de distribuição modelado.....	22
Figura 17. Linha de distribuição modelada via a interface do ATPDraw.....	28
Figura 18. Cartão do transformador da subestação modelado.....	29
Figura 19. Carga conectada em delta no barramento 671 do SD modelado.....	30
Figura 20. Fonte modelada no SD em análise.....	31
Figura 21. Modelo da chave observada no SD em análise.....	32
Figura 22. Medidor de tensão implementado no SD simulado.....	32
Figura 23. SD simulado via a interface gráfica ATPDraw.....	33
Figura 24. Tensões trifásicas no barramento 650.....	34
Figura 25. Tensões no barramento 680 do SD simulado.....	35
Figura 26. Comparação entre os valores de tensão para a fase A.....	36
Figura 27. Comparação entre os valores de tensão para a fase B.....	36
Figura 28. Comparação entre os valores de tensão para a fase C.....	37
Figura 29. Sistema de 37 barras.....	38
Figura 30. Sistema de 37 barras modelado via o <i>software</i> ATPDraw.....	40
Figura 31. Tensões na fase A de todos os barramentos, com referência ao barramento 701.....	41
Figura 32. Tensões na fase B de todos os barramentos, com referência ao barramento 701.....	42
Figura 33. Tensões na fase C de todos os barramentos, com referência ao barramento 701.....	42
Figura 34. Segmentação da forma de onda faltosa em 5 parcelas.....	46
Figura 35. Fluxograma do Método Proposto.....	48

Figura 36. Fase A da forma de onda de tensão analisada.....	55
Figura 37. Afudamento Trifásico.	56
Figura 38. Subtensão Trifásica.....	57
Figura 39. Afundamento Monofásico.	57
Figura 40. Falta fase terra monofásica.	62
Figura 41. Falta trifásica com envolvimento da terra.	63
Figura 42. Falta fase-fase.....	64
Figura 43. Falta Fase-Fase Terra.....	65

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características das linhas de distribuição consideradas.....	23
Tabela 2. Impedâncias mútuas das linhas de distribuição.	23
Tabela 3. Segmentos das linhas de distribuição que unem dois barramentos.....	24
Tabela 4. Dados dos transformadores abaixadores simulados.....	25
Tabela 5. Valores de potência dos bancos de capacitores.	25
Tabela 6. Características das cargas do SD.	26
Tabela 7. Características da carga distribuída.....	26
Tabela 8. Dados do regulador de tensão.	27
Tabela 9. Relação de barramentos, com referência à barra 701.	43
Tabela 10. Tabela de Saída para um Afundamento Trifásico	58
Tabela 11. Tabela de Saída para uma Subtensão Trifásica	58
Tabela 12. Tabela de Saída para um Afundamento Monofásico.....	58
Tabela 13. Tensão de pós-falta para ângulos de inserção diferentes, na falta fase terra aplicada... 63	
Tabela 14. Tensão de pós-falta para ângulos de inserção diferentes na falta Fase-Fase.....	65
Tabela 15. Tensão na barra 632 para falta fase terra monofásica, com resistência de falta de 3 ohms.	68
Tabela 16. Tensão na barra 675 para falta fase terra monofásica, com resistência de falta de 3 ohms.	68
Tabela 17. Tensão na barra 632 para uma falta fase terra monofásica com resistência de falta próxima a zero (curto-circuito franco).....	70
Tabela 18. Tensão na barra 675 para uma falta fase terra monofásica com a resistência de falta próxima a zero (curto-circuito franco).....	70
Tabela 19. Falta trifásica.....	71
Tabela 20. Níveis de tensão dos barramentos para uma falta trifásica.	72
Tabela 21. Falta Fase-Fase para uma resistência de falta de 3 ohms.....	73
Tabela 22. Falta fase-fase para uma resistência de falta aproximadamente nula.....	74
Tabela 23. Falta fase-fase terra com resistência de falta de 3 ohms.	75
Tabela 24. Falta fase-fase terra com resistência de falta praticamente franca.	76
Tabela 25. Níveis de tensão dos barramentos para uma falta fase-fase terra.....	76

Lista de Siglas e Abreviaturas

QEE	Qualidade da energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SD	Sistema de Distribuição
ST	Sistema de Transmissão
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variações de Tensão de Longa Duração
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
DySC	<i>Dynamic Sag Correctors</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

Sumário

Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas e Abreviaturas	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos da Pesquisa	4
1.2. Estrutura do Documento	4
2. Conceitos e Metodologia Adotada.....	5
2.1 Conceitos sobre QEE	5
2.2. Metodologia Adotada	7
3. Os Sistemas Elétricos de Potência em Análise	9
3.1. Introdução ao ATP e à interface Gráfica do <i>ATPDraw</i>	9
3.2. O Sistema de Transmissão	13
3.2.1. A modelagem do ST.....	15
3.2.2 Resultados das Simulações para o ST.....	20
3.3. O Sistema de Distribuição de 13 Barras.....	22
3.3.1 A modelagem do SD de 13 Barras	27
3.3.2 Resultados das Simulações para o SD de 13 Barras	33
3.4. O Sistema de Distribuição de 37 Barras.....	37
3.4.1 A modelagem do SD de 37 Barras	39
3.4.2 Resultados das Simulações para o SD de 37 Barras	40
4. Processamento dos Dados Simulados.....	45
4.1. Definição do Problema.....	45
4.2. Implementação do Método.....	47
4.3. Resultado do Método	55
5. Caracterização das Situações de Faltas	61
5.1. Falta Fase Terra Monofásica	61
5.2. Falta Trifásica.....	63
5.3. Falta Fase-Fase.....	64
5.4. Falta Fase-Fase Terra	65
6. Níveis de Tensão Pós Falta	67
6.1. Resultados para as Faltas Fase Terra Monofásicas Aplicadas.....	67
6.2. Resultados para as Faltas Trifásicas Aplicadas	71

6.3. Resultados para as Faltas Fase-Fase Aplicadas.	73
6.4. Resultados para as Faltas Fase-Fase Terra Aplicadas	74
7. Análise e Apresentação das Possíveis Soluções para as VTCD e VTLD	79
7.1. Métodos pesquisados	79
7.1.1. Alterando as especificações dos equipamentos	79
7.1.2. Alterações na Planta do Consumidor.....	80
7.1.3 Solução pela Concessionária: Modificações na Rede Elétrica	80
7.1.4 Outras Soluções a Partir do Conceito de Redes Inteligentes.....	81
8. Conclusões	83
9. Referências Bibliográficas	85

1. Introdução

O acesso à energia elétrica proporciona uma melhora na qualidade de vida da população, pois no instante em que se constrói um sistema de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica, a população que recebe esta energia, imediatamente passa a possuir mais conforto doméstico e melhores possibilidades de emprego e produção. Portanto, no momento que os benefícios da energia elétrica tornam-se essenciais no dia a dia das pessoas, é natural a preocupação com a qualidade desse produto.

Ao analisar inicialmente a Qualidade da Energia Elétrica, a preocupação reside no sentido da continuidade do serviço, já que fica evidente que qualquer interrupção no fornecimento implicará em diversos tipos de transtornos. Não tão evidente, no entanto, é a questão da QEE, mesmo que não ocorram interrupções. Isso normalmente só é percebido através das falhas de funcionamento (operação) em alguns equipamentos [1].

Algumas décadas atrás, as pessoas viviam em uma situação diferente da atual no Brasil, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica. Antes, consideravam-se três tipos de consumidores: o consumidor residencial, o de comércio ou serviços e o consumidor industrial. Naquela época o consumidor residencial, por exemplo, possuía uma carga plenamente resistiva, salvo raras exceções. Numa residência típica daquela época, as grandes cargas eram os chuveiros elétricos a resistência, e os ferros de passar roupas à resistência elétrica. Apesar da existência nas residências de uma carga indutiva resistiva, como o motor do refrigerador, a demanda por energia elétrica era consumida por uma carga considerada resistiva.

Atualmente, a população vive em uma realidade bastante diferente. As residências além das cargas resistivas que consomem muita energia como o chuveiro e o ferro à resistência, possuem também, cargas comandadas eletronicamente, como fornos de micro-ondas, computadores e periféricos, diversos aparelhos de TV e de áudio, entre vários outros eletrodomésticos. Com isso se tornou comum à existência de cargas eletrônicas, lado a lado com as cargas elétricas. Um claro exemplo do emprego da eletrônica em uma área anteriormente dominada por cargas resistivas são as lâmpadas fluorescentes econômicas, que atualmente estão substituindo as lâmpadas incandescentes tradicionais [1].

As cargas comandadas eletronicamente têm como característica, a não linearidade, ou seja, não requerem a corrente elétrica constantemente, mas solicitam apenas picos de energia em determinados momentos. Com isto, as cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda da tensão e da corrente que são entregues ao consumidor. Estas distorções acarretam diversos tipos de problemas ou distúrbios, os quais afetam os consumidores com cargas mais sensíveis às variações no fornecimento da energia.

É importante ressaltar que estas mesmas cargas eletroeletrônicas, além de deformarem as formas de onda da rede elétrica, sofrem diretamente com a má qualidade desta energia. Não é

difícil observar em instalações com um grande número de computadores ligados nos mesmos circuitos, alguns desses computadores com problemas de funcionamento/operação, aparentemente sem maiores explicações [1].

Neste contexto, para melhor analisar e entender os fenômenos associados à QEE, as simulações computacionais desempenham um papel fundamental. Por exemplo, depois de modelado um sistema elétrico com todas as suas principais cargas e características é possível realizar diversas simulações, construindo um amplo banco de dados, e desta maneira buscar o entendimento de como este sistema se comporta frente aos diversos tipos de distúrbios que frequentemente ocorrem em um sistema elétrico qualquer. Pode-se visualizar também, quais barramentos são mais susceptíveis a sofrerem distúrbios e desta maneira, sendo necessário, proteger uma carga crítica localizada nesta barra.

Cabe adiantar que para que as modelagens dos sistemas elétricos de potência (SEP), propostos neste trabalho, estivessem o mais próximo do real, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica. Este estudo englobou a caracterização de um SEP através de estudos de linhas de distribuição, transformadores e cargas. Também foram estudadas as principais características dos *softwares* ATP (*Alternative Transients Program*), da interface gráfica ATPDraw e Matlab®, amplamente usados neste trabalho. Estudou-se também, alguns dos distúrbios que afetam diretamente a QEE, em específico os afundamentos de tensão, caracterizando os principais efeitos, causas e como reduzir as consequências deste distúrbio na rede de energia elétrica. A partir de estudos, também foi verificado como criar um banco de dados de afundamentos de tensão através de um sistema elétrico modelado computacionalmente.

Vale frisar que o registro e a análise de um distúrbio em um SEP, através das oscilografias, são de muita valia nos dias atuais. Os medidores de energia espalhados pelos SEP registram as ocorrências dos eventos em SEP e, tais registros das formas de ondas são usualmente denominados de oscilografias. Em função do grande número de oscilografias disponibilizadas, tem-se a necessidade de uma análise automatizada das mesmas, propiciando um conhecimento por completo das ocorrências em um SEP.

Neste sentido, como primeiro passo para a caracterização de um distúrbio é necessário encontrar o momento exato da ocorrência de uma falta (curto-circuito). Portanto, nada melhor que utilizar um método de detecção de falta para isso. É necessário saber também, a duração dos transitórios de pré e pós falta, suas amplitudes e distorções harmônicas.

O principal foco da análise é caracterizar o fenômeno principal da falta, através de sua amplitude, tempo de duração e componentes de frequência, podendo assim classificar, se for o caso, esse distúrbio como uma VTCD (variação de tensão de curta duração), VTLD (variação de tensão de longa duração), entre outros. Vale ressaltar também, a importância da classificação do tipo de falta que ocorreu no SEP, para se levantar dados estatísticos de qual falta ocorre com maior frequência. Posteriormente, o desenvolvimento e/ou o aprimoramento dos métodos para

proteger o SEP contra estes tipos de faltas pode ser motivo de estudo.

Em um sistema elétrico, a proteção deve atuar quando da ocorrência de defeitos que venham a prejudicar o desempenho, a estabilidade ou a segurança deste sistema. Uma falta no sistema pode ser detectada de várias maneiras e, geralmente, está associada à mudança dos sinais de corrente ou de tensão [2].

Em muitos casos, um defeito é associado ao aumento da corrente/tensão em uma ou mais fases. Em um dos princípios mais utilizados, dois ciclos das amostras das quantidades de corrente são armazenados na memória do processador. Quando uma nova amostra surge, ela é comparada com a amostra correspondente a um ciclo anterior. Se ocorrer uma mudança significativa (0,06 p.u. ou mais) entre a nova amostra e a correspondente de um ciclo anterior, em qualquer das três correntes de linha, a falta será detectada. Normalmente executa-se uma confirmação deste resultado para quatro amostras consecutivas através de um contador [2].

Cabe adiantar que o método implementado neste trabalho se baseou nos padrões citados acima, porém este utilizará apenas as oscilografias de tensão, pois este trabalho focou nas análises direcionadas à QEE.

O módulo de classificação da falta é incorporado ao algoritmo para permitir uma rápida identificação das fases faltosas e, com isso, encontrar as fases mais susceptíveis aos defeitos. Além disto, este módulo foi incorporado ao algoritmo com o intuito de integrar o histórico de ocorrências de faltas em uma determinada subestação [2]. O método utilizará as formas de onda de tensão nos terminais da linha de transmissão, aplicando-se a Transformada Discreta de Fourier (TDF), a fim de se obter uma medida dos seus fasores em regime permanente. Como será ilustrado posteriormente, o algoritmo é independente do tipo de falta e insensível às variações da impedância da fonte ou da resistência de falta. Além disso, existe a necessidade de se determinar se a falta envolve ou não a terra. Na prática, o monitoramento da magnitude da corrente de sequência zero permite essa identificação, uma vez que esta magnitude cresce para faltas envolvendo a terra [2].

Deve-se utilizar uma razão entre as correntes de fase antes e depois da ocorrência da falta, esta razão depende da configuração do sistema. Na prática, é necessário também aplicar um pequeno limiar para as medidas, devido à existência de linhas não balanceadas, transdutores, erros na filtragem, etc. [2].

As transformadas de Fourier são utilizadas em uma variedade de áreas que vão desde os sistemas de comunicação à óptica [2]. A aplicação imediata de interesse na QEE é a descrição do conteúdo de frequência de um sinal. Essas técnicas se fundamentam na teoria de transformadas ortogonais. Admite-se que a forma de onda medida consiste de um componente fundamental, acrescida de uma infinita soma de certos harmônicos. Desta maneira, um par ortogonal de funções base senoidais, é correlacionado com dados amostrais para extrair os componentes da função base da forma de onda da entrada [2].

1.1. Objetivos da Pesquisa

A pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento dos sistemas de distribuição frente a distúrbios que frequentemente ocorrem nestes sistemas, tais como as VTCD e VTLD. Analisando como a Qualidade da Energia Elétrica dos sistemas de distribuição varia no momento de uma falha e como esta é afetada ao longo destes sistemas.

Apresenta também o desenvolvimento de um método computacional automatizado para análise destes distúrbios, método este que facilita o estudo dos sistemas de distribuição no âmbito da Qualidade da Energia Elétrica.

Por fim, como objetivo, indicará métodos que diminuem ou mesmo extinguem os efeitos danosos das VTCD e VTLD sobre os sistemas de distribuição.

1.2. Estrutura do Documento

Basicamente este documento está dividido nos seguintes tópicos: Na seção 2 serão apresentados os conceitos e metodologia adotada neste trabalho. Na seção 3, será realizada uma análise das características e parâmetros dos SEP a serem modelados, mostrando em detalhes os passos utilizados para a modelagem propriamente dita dos sistemas em questão. Ainda nesta seção, serão apresentados os resultados de tensão obtidos dos sistemas modelados comparando com os dados fornecidos em [3] e [4].

Na seção 4, será mostrado o desenvolvimento e os resultados obtidos pelo *software* de aquisição e tratamento de oscilografias. Na seção 5, serão caracterizados os tipos de faltas que comumente ocorrem em um SEP. Na seção 6, serão apresentados os diversos bancos de dados obtidos para as diferentes condições de faltas simuladas, bem como serão apresentados comentários desses níveis de tensão.

Na seção 7, serão expostas algumas soluções para mitigação, ou mesmo para extinção, dos efeitos danosos das VTCD e VTLD. Por fim, as conclusões observadas serão expostas na seção 8. Vale ressaltar que as referências bibliográficas serão expostas na seção 9.

2. Conceitos e Metodologia Adotada

Para que o trabalho, como um todo, seja totalmente entendido, é necessário possuir certos conhecimentos sobre QEE, tais conceitos estão apresentados a seguir. Nesta mesma linha de pensamento, foi apresentada a metodologia adotada pelo trabalho, a fim de esclarecer qualquer dúvida, do por que de alguns passos utilizados.

2.1 Conceitos sobre QEE

Dentre todos os distúrbios que ocorrem na rede elétrica, as variações de tensão de curta duração (VTCD) são os distúrbios que ocorrem com mais frequência em um sistema elétrico, além de ser de difícil monitoramento. As VTCD são definidas como distúrbios na tensão da rede ocasionados por um período de tempo menor que 1 minuto. Podem ser designadas como instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 segundos) ou temporárias (3 segundos a 1 minuto). Variações de tensões de curta duração são normalmente causadas por condições de faltas ou pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partidas [5].

Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, o curto-circuito pode causar um decréscimo da tensão (afundamento) ou um aumento da tensão (elevação), ou ainda, a completa perda da tensão (interrupção) [5].

Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão fornecida decai para um valor inferior a 0,1 p.u. por um período de tempo menor que 1 minuto. Elas podem ser resultantes de faltas no sistema de energia, falhas nos equipamentos e funcionamento inadequado de sistemas de controle.

Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar um afundamento, decréscimo temporário de 10-90% no valor eficaz da tensão do sistema, podendo aparecer por um período de meio ciclo até 1 minuto. Afundamentos de tensão são usualmente associados às faltas no sistema (curto-circuito ocorrido nas redes elétricas), mas podem também ser causados pela energização de grandes cargas ou a partida de grandes motores e pela corrente de magnetização de um transformador [5].

A elevação de tensão pode ser caracterizada por um aumento da tensão eficaz do sistema (aumento este entre 10-80% da tensão, na frequência da rede, com duração de meio ciclo a 1 minuto). Ocorre frequentemente nas fases sãs de um circuito trifásico, quando ocorre um curto-circuito em uma única fase [5].

As VTLD são caracterizadas por uma variação no valor eficaz de tensão em um período de tempo superior a 1 minuto. As VTLD são divididas em três grupos: sobretensão, subtensão e

interrupção sustentada [5].

Podemos designar uma sobretensão como sendo um aumento no valor eficaz da tensão, maior do que 110% (valores típicos entre 1,1 e 1,2 p.u.) na mesma frequência do sistema. Geralmente elas resultam do desligamento de grandes cargas ou energização de um banco de capacitores.

Já a subtensão apresenta características opostas, ocorrendo um decréscimo no valor eficaz da tensão para menos de 90% na frequência do sistema. Elas são decorrentes, principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Outros fatores consideráveis são: a conexão de cargas à rede elétrica e o desligamento de bancos de capacitores.

Uma interrupção sustentada ocorre quando o fornecimento de tensão permanece em zero por um período de tempo que excede 1 minuto. Estas interrupções são geralmente permanentes e requerem intervenção humana para reparar e retornar o sistema à operação normal no fornecimento de energia. Elas podem ocorrer de forma inesperada ou de forma planejada. A maioria delas ocorre inesperadamente e as principais causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, entre outras. Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção na rede [5].

No ambiente industrial competitivo de hoje são requeridos o aumento da produtividade e o corte de custos associados à produção e/ou ao processo industrial. Contudo, vários distúrbios elétricos intrínsecos ou inerentes ao sistema podem causar perdas econômicas, sendo estes os responsáveis por paradas indesejáveis na produção, além de causar uma diminuição da vida útil dos equipamentos. Solucionar os problemas associados à QEE é desejo de todos, em especial daqueles diretamente afetados por tais situações.

De imediato, para minimizar as perdas causadas por uma parada indesejável na linha de produção de uma indústria, a solução seria o investimento em dispositivos capazes de proteger os processos industriais contra as paradas involuntárias, ou em investimentos em pesquisas na área da caracterização dos distúrbios e ou de como solucioná-los, ou mesmo na redução dos seus efeitos sobre a rede, tornando o sistema elétrico mais robusto.

Os maiores prejuízos das VTCD e VTLD estão relacionados com paradas em processo que demanda continuidade, processo que se por acaso venha a parar, resultará em um considerável prejuízo financeiro. Daí a importância de um estudo para não deixar que um processo pare. Então o melhor caminho seria a diminuição dos efeitos das VTCD e VTLD, mais precisamente dos afundamentos/interrupções de tensão que são os mais frequentes em um sistema elétrico de potência e também os maiores responsáveis por paradas inesperadas de processos.

Nesse contexto, os afundamentos e interrupções são caracterizados por sua amplitude, duração desses eventos e a frequência com que ocorrem. A amplitude do afundamento de tensão é

uma das características mais discutidas sobre o fenômeno. Seu valor é de extrema importância para se determinar qual o efeito imediato de um afundamento no sistema, apesar de não ser suficiente para definir as consequências que este poderá sofrer após a redução da tensão percebida pela barra monitorada [6].

Diversos parâmetros influenciam a variação da amplitude. No que diz respeito aos afundamentos originados por faltas ocorridas no sistema, tais parâmetros estão intimamente relacionados aos cálculos de curto-circuito. O valor e a circulação das correntes de curto e, conseqüentemente, os valores de tensão observados nos pontos da rede, se estabelecem de acordo com as características do sistema elétrico (configuração, impedância dos componentes, tipo de ligação dos transformadores, etc.) e da falta (tipo, localização e impedância) [6].

A duração combinado com a amplitude é o que pode fazer um processo elétrico qualquer parar. Exemplo, mesmo com uma amplitude de afundamento perto da nominal, mas com uma duração alta o processo pode parar [6].

2.2. Metodologia Adotada

A metodologia adotada neste trabalho começa pela escolha de um SD a ser estudado. Posteriormente, este SD é modelado através do *software* ATP, utilizando a interface gráfica do *ATPDraw*. Empregando o ATP são simulados diversos distúrbios que se encaixam no grupo das VTCD e VTLD.

Nesta parte do trabalho, foram desenvolvidas duas frentes de trabalho. Uma estudando a propagação dos níveis de tensão pós falta ao longo do sistema, para a qual foi levantado um amplo banco de dados sobre diversas faltas que podem ocorrer neste SD. A outra frente de trabalho está relacionada com o estudo de uma oscilografia de tensão de um barramento do SD, no momento em que ocorre uma determinada falta. Para tal foi desenvolvido um método automatizado no *software* Matlab[®].

Depois de compreendido como a QEE é afetada na ocorrência de VTCD e VTLD, pode-se estudar métodos que diminuem ou mesmo extinguem os efeitos danosos destes distúrbios sobre o SD em análise.

Para melhor entendimento da metodologia adotada foi criado um fluxograma das ações descritas acima. Este fluxograma está apresentado na Figura 1.

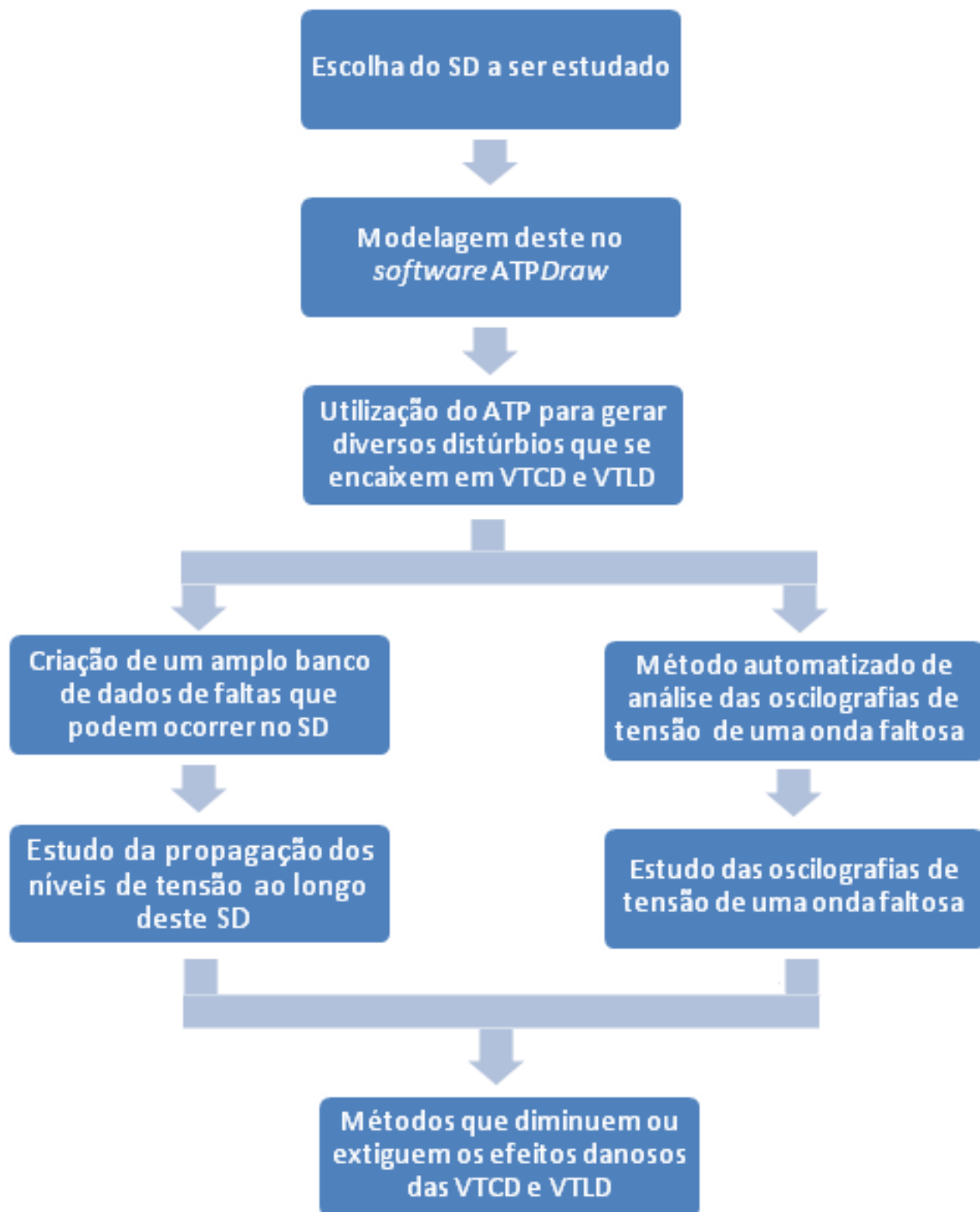


Figura 1. Metodologia Adotada

3. Os Sistemas Elétricos de Potência em Análise

Para familiarização e entendimento dos aspectos da modelagem via *software* ATP, pela interface gráfica do *software* ATPDraw, foram estudados três sistemas: um de transmissão e dois de distribuição. Vale ressaltar que alguns sistemas, como o de transmissão, não foram utilizados para estudo da QEE. Eles foram modelados com o intuito de validar o método de modelagem utilizado, através do *software* ATPDraw. As principais características dos sistemas serão apresentadas a seguir.

Para que as modelagens dos sistemas elétricos fossem realizadas adequadamente, fez-se um levantamento das principais características dos *softwares* ATP [7] [8] e da interface gráfica ATPDraw [9]. Estas características serão expostas no primeiro item desta seção.

A primeira modelagem realizada via a interface ATPDraw foi de um sistema de transmissão. Depois de familiarizado com a interface de simulação do *software*, foram extraídas as informações necessárias para as modelagens dos SD. As modelagens destes sistemas serão mostradas no decorrer desta seção. Vale ressaltar que as modelagens destes sistemas foram auxiliadas de literaturas correlatas às necessidades desta pesquisa [10 - 11].

Nesta seção, também serão expostos os resultados obtidos para o Sistema de Transmissão (ST) modelado, comparando-os com os resultados obtidos através de métodos convencionais de fluxo de carga. Também serão mostrados e discutidos os resultados e características dos SD de 13 e 37 barramentos modelados.

3.1. Introdução ao ATP e à interface Gráfica do ATPDraw

O ATP é um programa universal de simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos ou de natureza eletromecânica. Através deste programa, redes complexas e sistemas de controle podem ser simulados. Além do cálculo de transitórios, o ATP tem uma extensa capacidade de modelagem e recursos adicionais importantes [4].

A construção das redes elétricas dispondo do ATP é realizada através de códigos escritos. Já no *software* ATPDraw, as redes são construídas através de uma interface gráfica. Isso facilita a modelagem de sistemas elétricos com vários barramentos. Seu uso é ideal para gerar uma visão global dos valores de tensões e corrente em cada barramento.

Alguns apontamentos das principais ferramentas da interface gráfica do ATPDraw, utilizadas neste trabalho, serão rapidamente explicadas.

Primeiramente, cabe comentar da opção “ATP” localizada na barra do menu principal da interface gráfica, conforme mostrado na Figura 2. Dentro desta opção, os itens mais importantes e utilizados são: *Settings*; *run ATP*, *run Plot* e *Sub-process*.

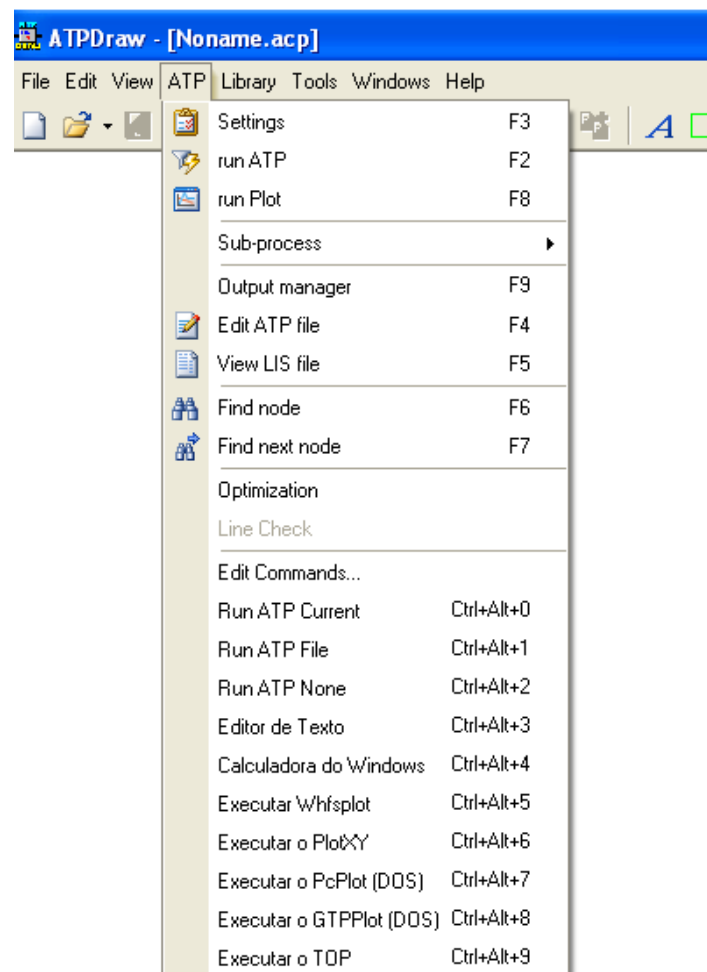


Figura 2. Menu principal da interface gráfica: opção “ATP”.

No item *settings* (configurações) estão apresentadas as opções para a configuração da simulação, como a taxa de amostragem e o tempo máximo de simulação. Neste item, também existe a opção de escolher se os valores da capacitância e da indutância serão apresentados em *micro Siemens* ou *micro Faraday* e *Ohms* ou *mili Henry*, respectivamente. Caso a análise seja no domínio da frequência e atribuída à variável *Copt* o valor unitário (*Copt: 1*), os valores de capacitância serão expressos em *micro Siemens*. Se *Xopt* receber “1”, a indutância será expressa em *Ohms*. Caso fosse escolhido o domínio do tempo e *Copt* recebesse o valor 0, a capacitância seria expressa em *micro Faraday*. Se *Xopt* fosse “0” a indutância seria expressa em *mili Henry*. A Figura 3 mostra as opções mencionadas.

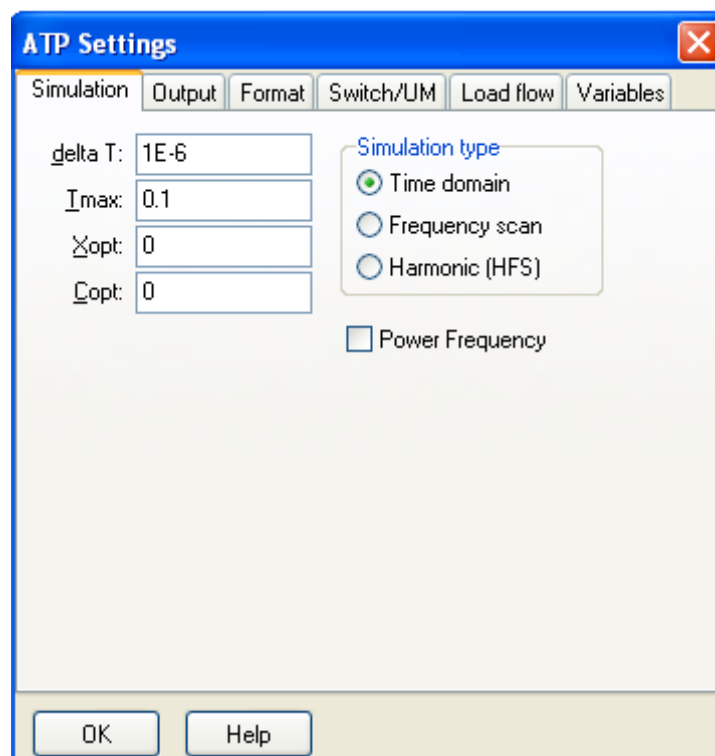


Figura 3. Opções de configuração do ATP.

Ainda no menu principal “ATP” da Figura 2, pode-se rodar (executar) diretamente o sistema modelado gerando o cartão de saída com as tensões e/ou correntes requeridas. Para visualizar o gráfico gerado pelas tensões e/ou correntes do cartão de saída, basta ir para opção *run Plot*. Na opção *Sub-process*, o usuário pode escolher em criar um arquivo de texto equivalente ao usado no *software ATP* (sem a interface gráfica) e executá-lo, gerando assim, um arquivo de saída igual ao do *software ATP*.

Para a modelagem dos componentes de um SEP existe um menu principal. Este menu está caracterizado na Figura 4. As opções das linhas de transmissão estão na Figura 5. As das cargas e bancos de capacitores monofásico, bifásico e trifásico estão na Figura 6. As demais escolhas seguem o mesmo caminho, bastando seguir as instruções do menu da Figura 4.

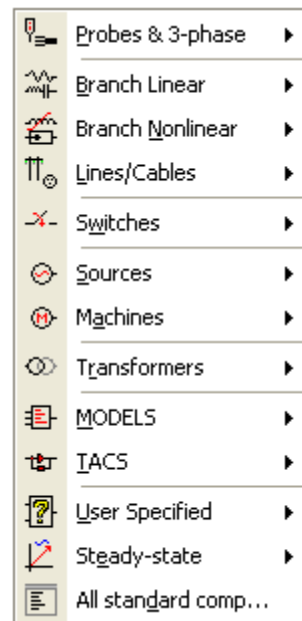


Figura 4. Menu principal para a escolha dos elementos de um SEP qualquer.

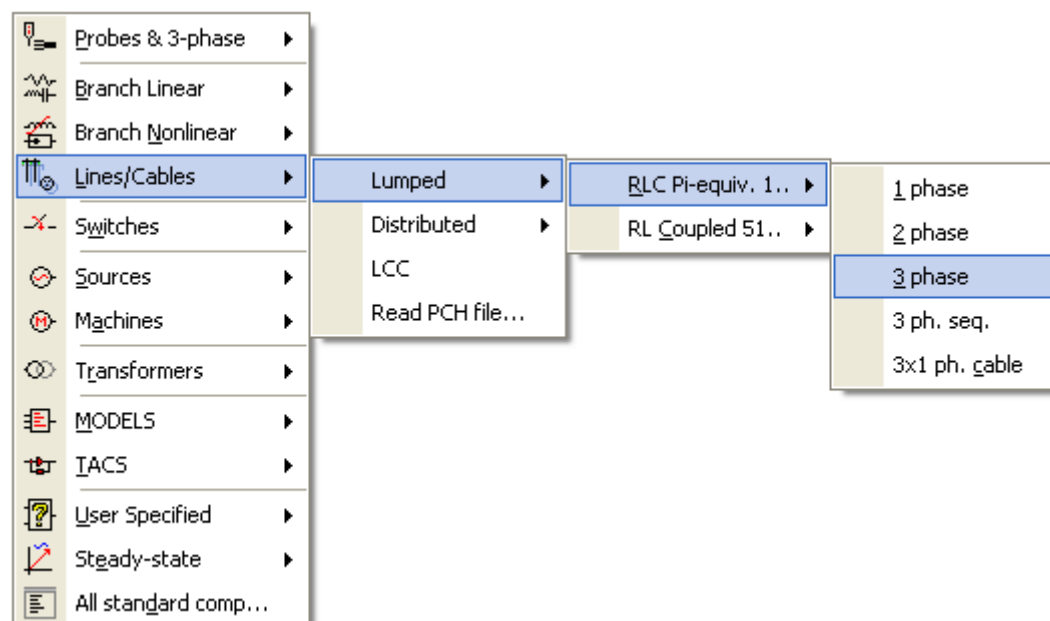


Figura 5. Opções de escolhas para as linhas/cabos de transmissão.

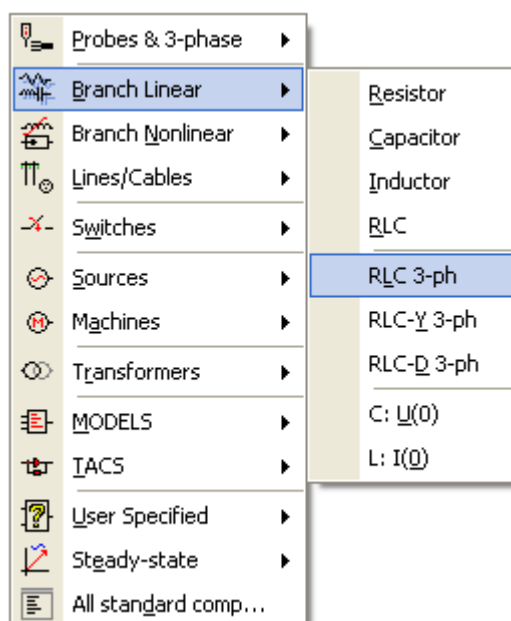


Figura 6. Opções para as cargas lineares.

Estes foram os principais comandos usados na modelagem dos sistemas. Para aprofundar o estudo sobre o funcionamento e as principais características do *software* em questão, basta um estudo em seu manual ou em apostilas relacionadas. Vale ressaltar que o *software* ATPDraw é de fácil uso, aplicação e entendimento, sendo autoexplicativo, com ícones explicativos e de ajuda para todos os cartões.

3.2. O Sistema de Transmissão

O ST modelado foi extraído de [3]. A partir desta referência, foram obtidos os valores e as características dos parâmetros de carga, da linha de transmissão, do gerador e do compensador síncrono. A configuração espacial deste sistema está ilustrada na Figura 7. Vale ressaltar que quase todos os parâmetros foram fornecidos em p.u. (por unidade), sempre com as bases de transformação especificadas.

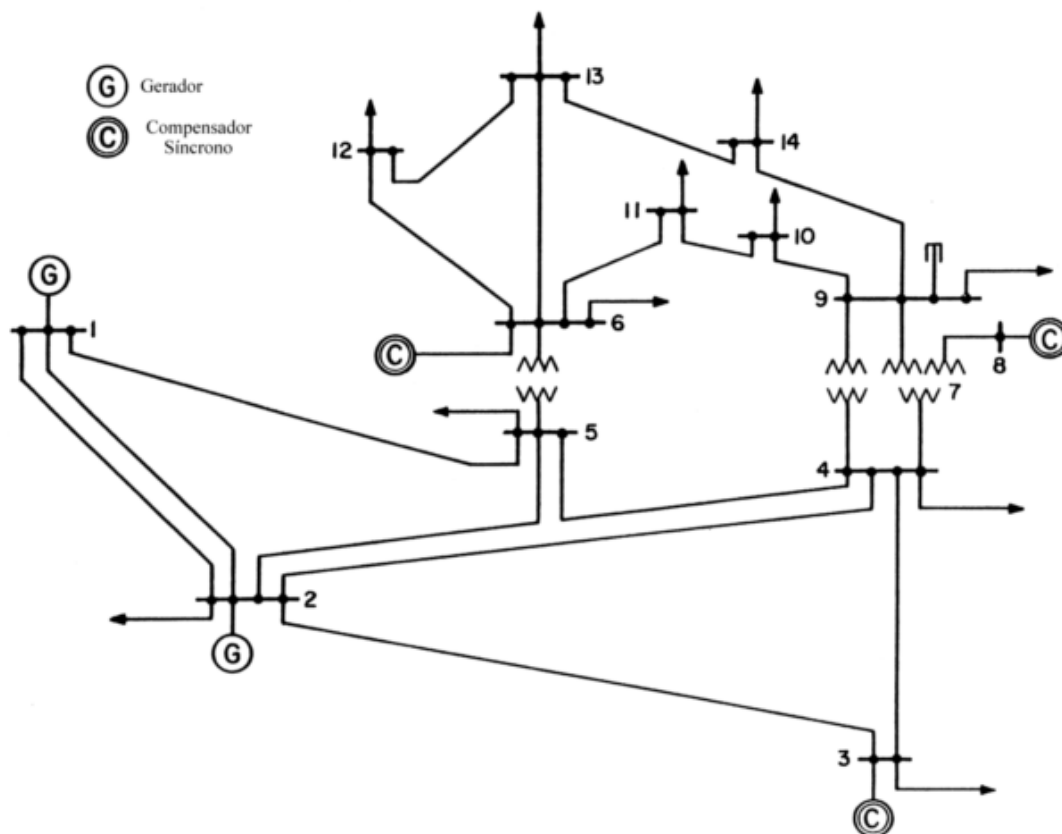


Figura 7. Sistema de transmissão modelado.

Os valores dos parâmetros dos equipamentos utilizados na construção do ST, como as linhas de transmissão, transformadores, geradores e compensadores síncronos não serão apresentados neste trabalho, mas estes podem ser facilmente obtidos em [3], tomando como base um sistema de transmissão de 14 barras.

Para facilitar a modelagem, todas as linhas de transmissão foram consideradas como linhas médias. Deste modo, foi usado o modelo PI (π) equivalente. Os geradores foram modelados como uma fonte ideal com uma indutância em série. Os transformadores utilizados são todos elevadores. Estes fazem com que a tensão se mantenha constante ao longo do ST, mesmo nos barramentos localizados mais distante dos geradores. Estes transformadores foram modelados utilizando a relação de transformação do primário para o secundário mais uma indutância equivalente.

Os compensadores síncronos são utilizados na rede elétrica principalmente para o controle de reativo, por isso estes foram simulados como um banco de capacitores trifásicos. Para as cargas, foi fornecida apenas a potência consumida por cada uma delas. Estas potências foram convertidas para uma impedância equivalente, com valores de resistência, indutância e capacitância. Nota-se que esta conversão foi necessária, visto que a interface do ATPDraw não

trabalha diretamente com potências de carga.

As equações usadas para converter a potência para impedância foram as seguintes [10]:

$$S = V \cdot I^* \quad (1)$$

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2)$$

$$S = \frac{V \cdot V^*}{Z^*} \quad (3)$$

$$Z = \frac{|V|^2}{S^*} \quad (4)$$

Primeiramente usou-se da equação da potência aparente (1) associada à Lei fundamental de Ohm (2), obtendo-se a equação (3). Por fim, através de alguns ajustes, obteve-se a equação final utilizada para transformar potência em impedância (4). Nota-se que as tensões, impedâncias e potências aparentes que devem ser usadas são as de fase.

3.2.1. A modelagem do ST

A modelagem e simulações do ST foram realizadas no domínio da frequência, com frequência associada de 60 Hz. A taxa de amostragem e tempo máximo de simulação usadas, foi a padrão do *software ATPDraw*, 1 *micro* segundo e 0,1 segundo respectivamente. Os valores das resistências e indutâncias estão inseridos em *Ohms*, e os valores das capacitâncias estão expressos em *micro Siemens*.

Os parâmetros das linhas foram dados como uma linha PI equivalente. Estes valores foram introduzidos no *software ATPDraw*. Na Figura 8 são mostrados os valores das resistências, indutâncias e capacitâncias *shunt* da linha que ligam o barramento 1 com o barramento 5 do ST modelado. Nota-se por estes valores que não existem os efeitos mútuos entre as fases do sistema.

Component: LINEPI_3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R11	Ohm/m	0.05811
R21	Ohm/m	0
R22	Ohm/m	0.05811
R31	Ohm/m	0
R32	Ohm/m	0
R33	Ohm/m	0.05811
L11	Ohm/m	0.17632
L21	Ohm/m	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	4
OUT1	ABC	2

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines
Length 1 [m]

☐ Hide
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 8. Parâmetros da linha de transmissão via a interface do ATPDraw.

Os valores da indutância equivalente dos transformadores também foram introduzidos na modelagem juntamente com sua relação de transformação. A Figura 9 exemplifica a janela do ATPDraw para um transformador saturável elevador de tensão que liga o barramento 5 como o barramento 6.

Component: SATTRAFO

Attributes		Characteristic	
	Prim.	Sec.	
U [V]	0.932	1	
R [ohm]	0	0	
L [mH,ohm]	0.25202	0.25202	

Coupling:

Phase shift:

I(0)= Rm= ☐ 3-leg core
☐ RMS
☐ 3-winding

F(0)=

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	5
Secondary	ABC	6
Starpoint	ABC	X0017

Order: Label:

Comment:

Output: ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 9. Janela da interface do ATPDraw para transformadores saturáveis.

Na modelagem de cargas, bancos de capacitores, reatâncias, resistências e do compensador síncrono (que em um sistema de potência tem a mesma função de um banco de capacitores), foram usados cartões RLC trifásicos, empregando a mesma relação de transformação de potência para impedância da equação (4). O cartão RLC trifásico pode ser visualizado na Figura 10. Este mostra uma carga conectada no barramento 3.

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	11.66
L_1	Ohm	6.58
C_1	μ S	0
R_2	Ohms	11.66
L_2	Ohm	6.58
C_2	μ S	0
R_3	Ohms	11.66
L_3	Ohm	6.58

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	
OUT1	ABC	5

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 10. Cartão RLC trifásico empregado.

Os geradores foram modelados como uma fonte ideal em serie com uma indutância. Tal consideração foi adotada para que os geradores apresentassem modelos com características próximas às reais. O cartão da fonte ideal pode ser visualizado na Figura 11. Para finalizar, foram conectados medidores de tensões em todos os barramentos. Estes são usados para registrar as tensões nos barramentos em específico. O cartão na interface do ATPDraw destes medidores pode ser preenchido como mostra a Figura 12.

Component: ACSOURCE

Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	1.078	AC	ABC	X0009
Frequency	Hz	60			
PhaseAngleA	degrees	-14.94			
StartA	sec	-1			
StopA	sec	100			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☐ Peak L-G ☒ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 11. Atributos usados para modelar uma fonte ideal.

Open Probe

#Phases: 3

Monitor: ☒ A-1 ☒ B-2 ☒ C-3 ☐ D-4 ☐ E-5

Steady-state: ☐ Voltage

OK Help

Figura 12. Medidores (registradores) de tensão aplicados sobre o sistema modelado.

Vale ressaltar que todos os valores inseridos nos cartões estão em p.u. Por fim, depois de conectado todos os ramos, o ST modelado no ATPDraw está exposto graficamente na Figura 13. Nota-se que algumas considerações tiveram que ser feitas pelo autor deste trabalho, como a impedância característica dos geradores ou mesmo da própria modelagem dos geradores síncronos. Os geradores síncronos foram modelados como uma fonte ideal de valor igual à tensão de referência da barra que estes estão conectados. Para suas impedâncias características foram atribuídos valores pequenos que poderiam ser desprezados.

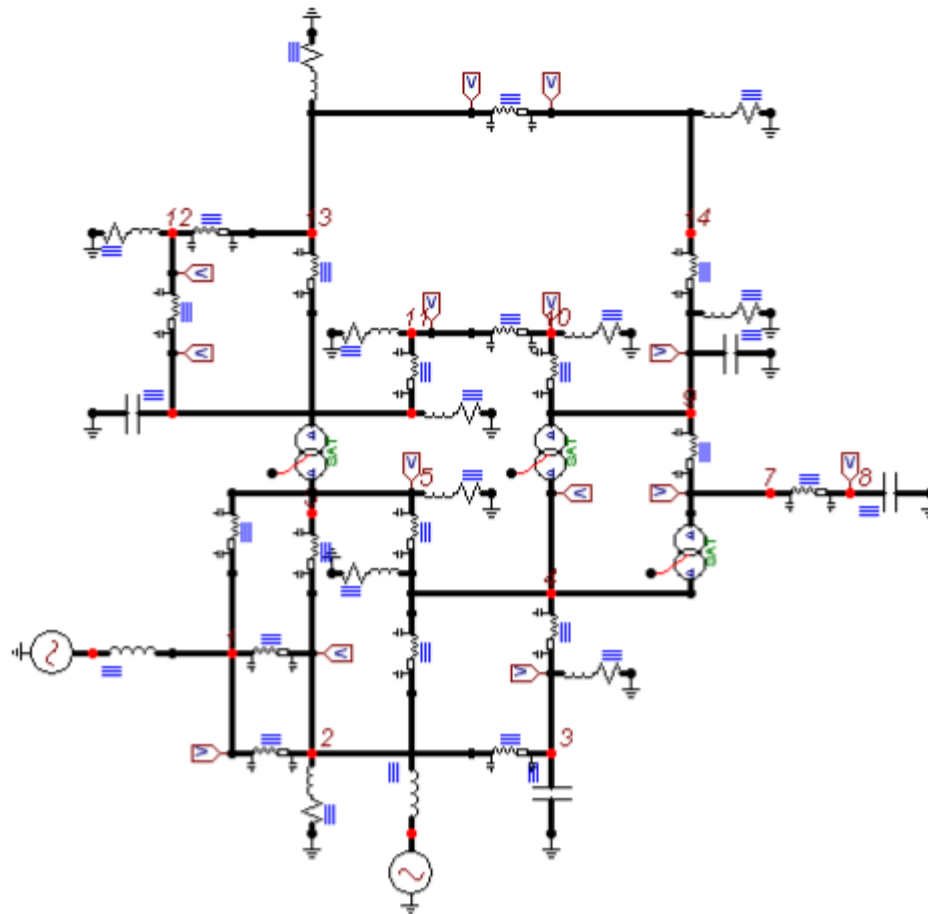


Figura 13. Sistema de transmissão modelado via a interface do ATPDraw.

Por fim, foram realizadas as simulações para obtenção das tensões em todos os barramentos. Os resultados serão mostrados na seção de resultados.

3.2.2 Resultados das Simulações para o ST

O ST modelado além de apresentar resultados próximos, também apresentou característica de elevação e decaimento de tensão similar quando comparado com os resultados obtidos através do fluxo de carga convencional. Vale ressaltar que estes valores de fluxo de carga foram retirados de [3], juntamente com as características do ST.

Tal afirmação é ilustrada pela Figura 14, que expressa o módulo das tensões em cada barramento do ST, os resultados fornecidos são os valores encontrados em [3]. Já os valores do método proposto são os resultados fornecidos pelas simulações realizadas através do ATP. Para facilitar a visualização do erro de tensão em cada barramento, foi levantado o gráfico da Figura 15, que mostra o erro absoluto de cada barramento. Nota-se que estes erros não ultrapassaram 2,5%.

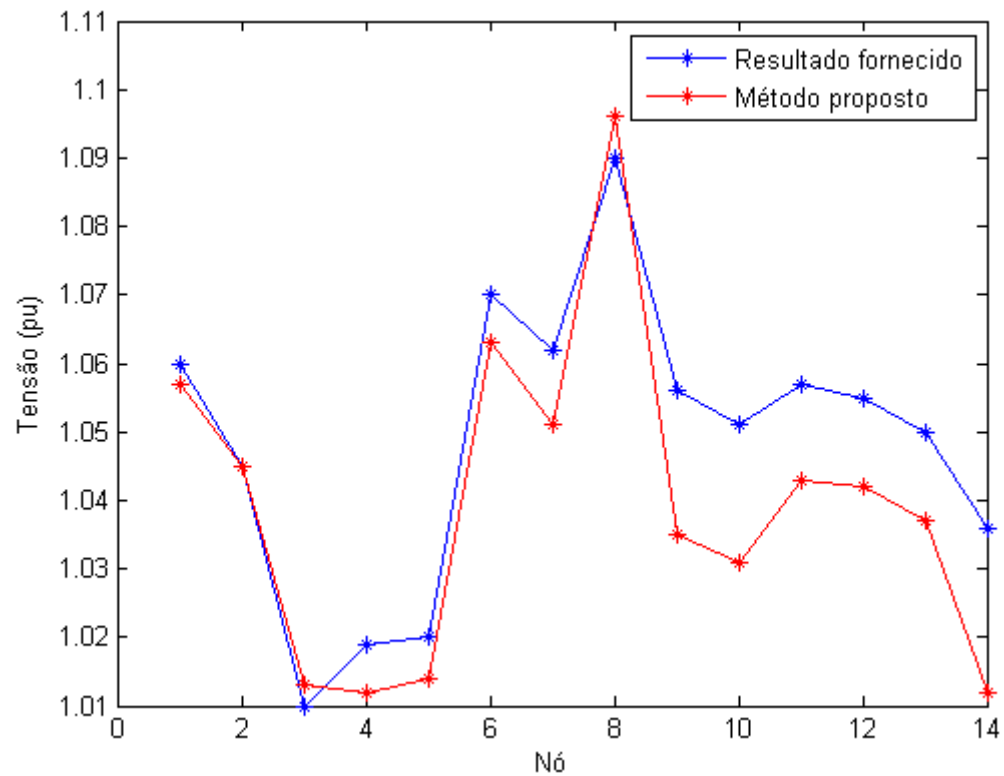


Figura 14. Comparação entre os valores desejados com os obtidos via ATPDraw.

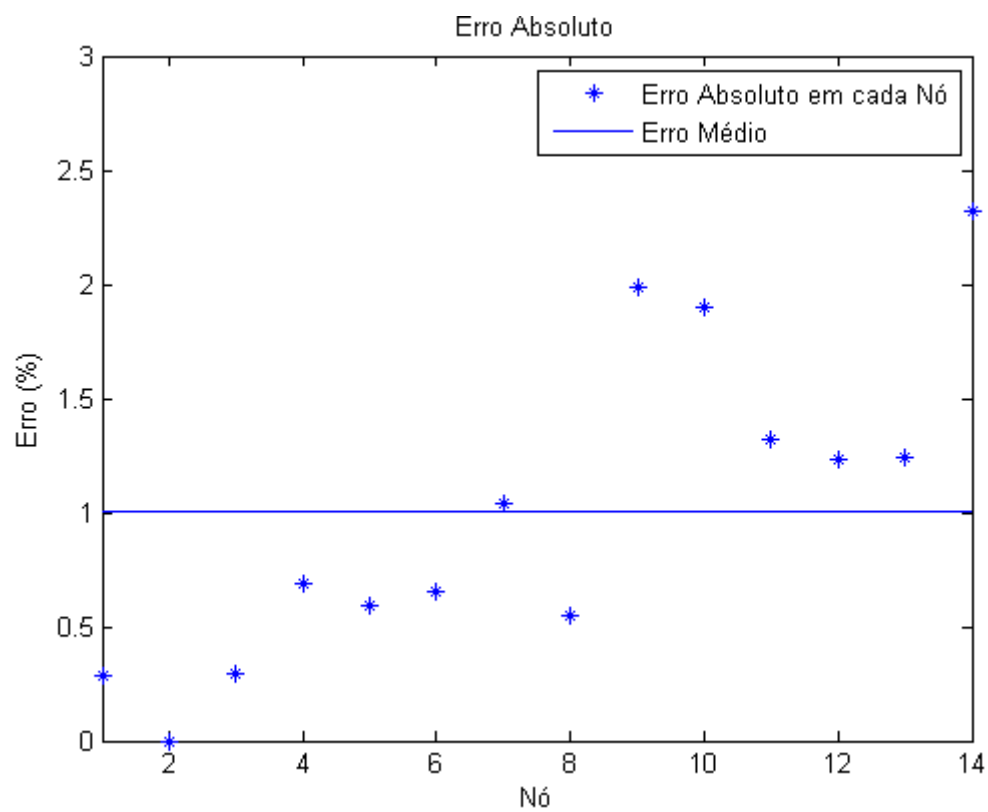


Figura 15. Erro absoluto em módulo da tensão em cada barramento.

Vale ressaltar que a pequena discrepância entre os resultados do método proposto e do método de fluxo de carga convencional, pode ser explicada pelo fato de que os processos de conversão, como o da equação (4) e as demais considerações usadas neste trabalho nem sempre são precisos. Porém o erro alcançado é satisfatório para as diversas aplicações a serem futuramente realizadas e que serão oportunamente discutidas nesta pesquisa.

3.3. O Sistema de Distribuição de 13 Barras

Os padrões e as orientações para modelar o sistema de distribuição (SD), também foram extraídos de [4]. A conexão espacial deste sistema de distribuição está ilustrada na Figura 16. As características e os valores de todos os componentes empregados serão apresentados no que segue.

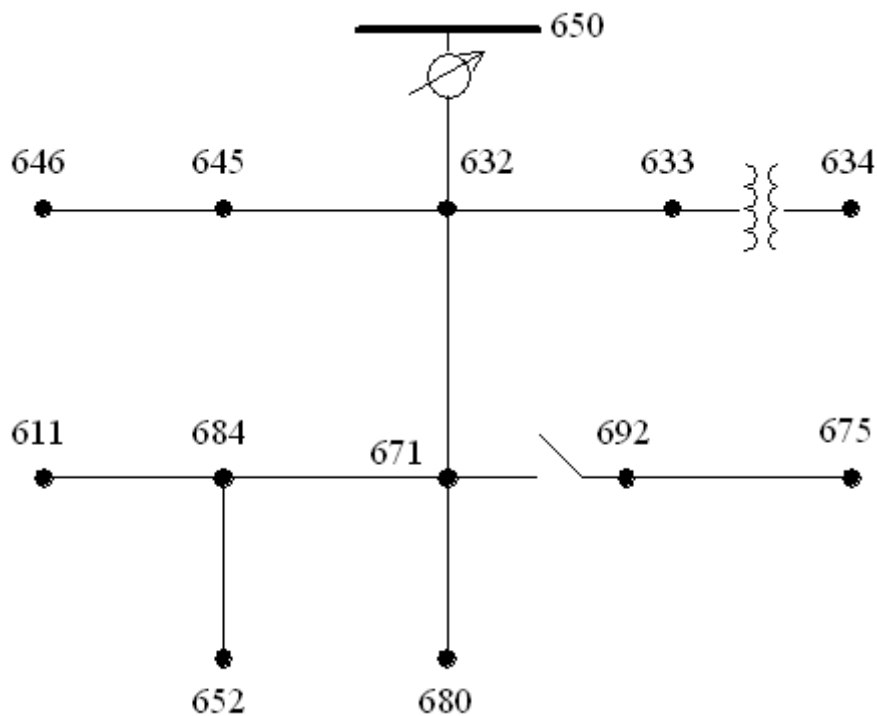


Figura 16. Sistema de distribuição modelado.

Linhas de distribuição

Este SD possui linhas com características diferentes entre si. As características das linhas estão contidas na Tabela 1. Já as suas impedâncias mútuas estão na Tabela 2. Na Tabela 3 estão retratados os tipos de linhas que interligam os barramentos, bem como os comprimentos associados. Vale ressaltar que a matriz de impedâncias mútuas é simétrica, por isso apenas a parte triangular superior foi fornecida. Cabe comentar que na prática (em campo), algumas vezes,

também ocorre à transposição das linhas de transmissão para diminuir o desequilíbrio de tensão e corrente [11].

Tabela 1. Características das linhas de distribuição consideradas.

Configuração das linhas aéreas				
Config.	Fases	Fase ACSR	Neutro ACSR	Espaços ID
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510
Configurações das linhas subterrâneas				
Config.	Fases	Cabos	Neutro	Espaços ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	Nenhum	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Tabela 2. Impedâncias mútuas das linhas de distribuição.

Configuração 601						
Z(R + jX) (em ohms por km)						
Z fase A	0,21535	0,6326	0,0970	0,3118	0,0982	0,2633
Z fase B			0,2098	0,6512	0,0954	0,2392
Z fase C					0,2122	0,6431
B em micro Siemens por km						
Z fase A	3,9154		-12,404		-0,7828	
Z fase B			3,7040		-0,4599	
Z fase C					3,5044	
Configuração 602						
Z(R + jX) (em ohms por km)						
Z fase A	0,46774	0,7342	0,0982	0,2633	0,0970	0,3118
Z fase B			0,4646	0,7448	0,0954	0,2392
Z fase C					0,4622	0,7528
B em micro Siemens por km						
Z fase A	3,5420		-0,6723		-1,0507	
Z fase B			3,2191		-0,4094	
Z fase C					3,3714	
Configuração 603						
Z(R + jX) (em ohms por km)						
Z fase A	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Z fase B			0,8262	0,8372	0,1284	0,2853
Z fase C					0,8227	0,8433
B em micro Siemens por km						
Z fase A	0,0000		0,0000		0,0000	
Z fase B			2,9271		-0,5593	
Z fase C					2,8998	
Configuração 604						
Z(R + jX) (em ohms por km)						
Z fase A	0,8227	0,8433	0,0000	0,0000	0,1284	0,2853

Z fase B			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Z fase C					0,8262	0,8372
B em <i>micro Siemens</i> por km						
Z fase A	2,8998		0,0000		-0,5593	
Z fase B			0,0000		0,0000	
Z fase C					2,9271	
Configuração 605						
Z(R + jX) (em <i>ohms</i> por km)						
Z fase A	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Z fase B			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Z fase C					0,8261	0,8375
B em <i>micro Siemens</i> por km						
Z fase A	0,0000		0,0000		0,0000	
Z fase B			0,0000		0,0000	
Z fase C					2,8088	
Configuração 606						
Z(R + jX) (em <i>ohms</i> por km)						
Z fase A	0,4961	0,2774	0,1984	0,0204	0,1771	-0,0089
Z fase B			0,4904	0,2511	0,1984	0,0204
Z fase C					0,4961	0,2774
B em <i>micro Siemens</i> por km						
Z fase A	60,2173		0,0000		0,0000	
Z fase B			60,2173		0,0000	
Z fase C					60,2173	
Configuração 607						
Z(R + jX) (em <i>ohms</i> por km)						
Z fase A	0,8344	0,3185	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Z fase B			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Z fase C					0,0000	0,0000
B em <i>micro Siemens</i> por km						
Z fase A	88,9912		0,0000		0,0000	
Z fase B			0,0000		0,0000	
Z fase C					0,0000	

Tabela 3. Segmentos das linhas de distribuição que unem dois barramentos.

Nó A	Nó B	Comp. (m)	Config.
632	645	152,4	603
632	633	152,4	602
633	634	0	XFM-1
645	646	91,44	603
650	632	609,6	601
684	652	243,84	607
632	671	609,6	601
671	684	91,44	604
671	680	304,8	601
671	692	0	Chave
684	611	91,44	605
692	675	152,4	606

Novamente, para simplificar a modelagem, as linhas foram consideradas como sendo de tamanho médio, por isso o modelo utilizado foi o PI (π) equivalente. Modelo este conveniente, pois os valores fornecidos em [4] possuem todos os dados que este necessita.

Transformadores

Este sistema contém dois transformadores abaixadores de tensão. Um deles é o transformador da subestação que está localizado acima do barramento 650, usado para transformar a tensão de transmissão (115 kV) em tensão de distribuição (4,16 kV). O outro é o transformador XFM-1 que está conectado entre os barramentos 603 e 604, usado para alimentar uma carga com tensão baixa (480 V). As características de ambos os transformadores estão representados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados dos transformadores abaixadores simulados.

Informações dos Transformadores					
	kVA	kV-alta	kV-baixa	R - %	X - %
Subestação	5000	115 - D	4,16 - Ter. Y	1	8
XFM-1	500	4,16 - Ter. Y	0,48 - Ter. Y	1,1	2

Os transformadores foram modelados usando a relação de transformação e as reatâncias equivalentes. Pode-se acrescentar que a tensão de transmissão foi modelada com uma fonte ideal chegando à subestação, mais uma indutância que representa o equivalente da rede de transmissão.

Capacitores shunt (em derivação)

Existem dois bancos de capacitores, um monofásico e um trifásico. Estes estão conectados nos barramentos 611 e 675, respectivamente. Suas potências reativas estão representadas na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de potência dos bancos de capacitores.

Capacitores shunt			
Nó	Fase A	Fase B	Fase C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611			100

Os capacitores *shunt* foram modelados como uma capacitância que consome o mesmo valor de potência da Tabela 5. Para isso foi usado a relação da equação (4). Pois como citado anteriormente, a interface do ATPDraw só trabalha especificando os valores das impedâncias.

Cargas

O sistema em análise possui diversas cargas conectadas em diferentes barramentos. Estas cargas também possuem diferenças no tipo de ligação, na potência demandada e no tipo de energia solicitada. Por exemplo, existem cargas conectadas em estrela (Y) e em delta (D), bem como cargas que possuem potência constante (PQ), corrente constante (I) ou ainda impedância constante (Z). Além do mais, entre os nós 632 e 671 existe uma carga distribuída na linha de distribuição. Todas as informações pertinentes e relacionadas às cargas do SD estão na Tabela 6. Já os dados da carga distribuída são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6. Características das cargas do SD.

Cargas							
Nó	modo da carga	Fase 1	Fase 1	Fase 2	Fase 2	Fase 3	Fase 3
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Tabela 7. Características da carga distribuída.

Carga Distribuída								
Node A	Node B	modo da carga	Fase 1	Fase 1	Fase 2	Fase 2	Fase 3	Fase 3
			kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

As cargas foram modeladas por modelos RLC, transformando as potências fornecidas em impedâncias equivalentes através da equação (4). Vale ressaltar que para facilitar à modelagem, todas as cargas foram modeladas como cargas com impedância constante.

Regulador de tensão

O SD também contém um regulador de tensão logo abaixo do barramento 650. As características desse regulador estão expressas na Tabela 8.

Tabela 8. Dados do regulador de tensão.

Regulador de tensão			
Regulador ID:	1		
Segmento de Linha	650 - 632		
Localização	50		
Fases	A - B -C		
Conexão	3-Fase,LT		
Fases monitoradas	A-B-C		
Largura de banda	2.0 volts		
Relação de TP	20		
Relação TC do primário	700		
Configurações do compensador	Fase-A	Fase-B	Fase-C
R	3	3	3
X	9	9	9
Nível de tensão	122	122	122

Para facilitar a modelagem e análise dos resultados, o regulador foi modelado como um transformador elevador de tensão utilizando apenas as impedâncias equivalentes fornecidas na Tabela 8 e uma relação de transformação adequada.

3.3.1 A modelagem do SD de 13 Barras

As configurações de modelagem e simulação do SD de 13 barras foram realizadas de maneira idêntica ao do ST. Análise no domínio da frequência, com frequência associada de 60 Hz, taxa de amostragem de 1 *micro* segundo e tempo máximo de simulação de 0,1 segundo. Valores das resistências e indutâncias expressos em *Ohms*, e os valores das capacitâncias expressos em *micro Siemens*.

A modelagem dos parâmetros do SD, também foi realizada de maneira similar a do ST. Primeiramente foram adicionados os parâmetros das linhas de distribuição (modelo PI equivalente trifásica). Entretanto, para o SD, as impedâncias mútuas foram consideradas. Como exemplo, expõe-se na Figura 17, a linha que interliga o barramento 650 ao barramento 632.

Component: LINEPI_3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R11	Ohm/m	0.0002097
R21	Ohm/m	9.69E-5
R22	Ohm/m	0.0002153
R31	Ohm/m	9.54E-5
R32	Ohm/m	9.82E-5
R33	Ohm/m	0.0002121
L11	Ohm/m	0.0006511
L21	Ohm/m	0.0003117

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	Reg
OUT1	ABC	632

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment: Linha 601

Lines

Length 609.6 [m]

☐ Hide
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 17. Linha de distribuição modelada via a interface do ATPDraw.

Os transformadores abaixadores do SD também foram modelados através de suas relações de transformação e impedância equivalente. O cartão utilizado foi o de transformadores saturáveis. Para visualizar como estes foram modelados no ATPDraw, a Figura 18 mostra o cartão do transformador da subestação. Vale ressaltar que os parâmetros da resistência e da indutância do primário e secundário foram obtidos através da relação de transformação e das bases nominais fornecidos. Como o ATPDraw considera um transformador trifásico sendo composto por três transformadores monofásicos, fez-se necessário dividir por raiz de três os valores representativos do lado que tem conexão em estrela.

Component: SATTRAFO

Attributes Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	2401.8	115000
R [ohm]	0.0346	26.45
L [mH,ohm]	0.3115	211.6

Coupling: Y D

Phase shift: 30

I(0)= 0 Rm= 1000000

F(0)= 0

☐ 3-leg core ☒ RMS ☐ 3-winding

NODE	PHASE	NAME
Primary	BAC	650
Secondary	BAC	X0002
Starpoint	ABC	X0003
Prim-N	1	

Order: 0 Label:

Comment: Transformador da Subestação

Output: 0 - No

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 18. Cartão do transformador da subestação modelado.

A modelagem das cargas e dos bancos de capacitores foi realizada através do cartão RLC trifásico. Este contém a opção de qual conexão usar: delta ou estrela. Como na referência [4] consultada foram fornecidas apenas as potências que estas consomem, teve-se que usar a relação de transformação da equação (4). Para exemplificar este cartão para o SD, apresenta-se na Figura 19, a carga conectada no barramento 671. Nota-se que a carga distribuída foi modelada com uma carga concentrada RLC com dois terços da potência localizado a um quarto da linha e outra carga concentrada RLC com um terço da potência no final da linha que liga os barramentos 632 e 671. Este artifício se justifica, pois em um SEP, uma carga distribuída tem comportamento igual à de uma carga com dois terços da potência localizado a um quarto da linha e outra carga com um terço da potência no fim desta mesma linha [11].

Component: RLCD3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	33.2108
L_1	Ohm	18.9776
C_1	μ S	0
R_2	Ohms	37.565
L_2	Ohm	21.4657
C_2	μ S	0
R_3	Ohms	32.3973
L_3	Ohm	18.5127

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	671

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment: Carga 671 D-PQ

Output

0 - No

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 19. Carga conectada em delta no barramento 671 do SD modelado.

O SD modelado contém também um gerador de tensão, uma chave e os medidores (registradores) de tensão em todos os barramentos. O gerador foi modelado como uma fonte ideal mais uma indutância. A fonte e a indutância em série foram usadas para simular a tensão e o equivalente da rede oriunda de um sistema de transmissão qualquer. A chave isola ou conecta um ramo do SD, mas para início de simulação, esta será considerada como estando sempre fechada. Os medidores são usados para registrar e permitir a visualização das tensões em cada barramento. Os cartões da fonte ideal, da chave e dos medidores estão ilustrados nas Figuras 20, 21 e 22 respectivamente.

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	115000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	BAC	X0004

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment: Sequência negativa

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☐ Peak L-G ☐ RMS L-G ☒ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 20. Fonte modelada no SD em análise.

Component: SWIT_3XT

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
T-cl_1	s	-0.1
T-op_1	s	2
T-cl_2	s	-0.1
T-op_2	s	2
T-cl_3	s	-0.1
T-op_3	s	2
Imar	Amps	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	671
OUT1	ABC	692

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment: Chave

Output

0 - No

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 21. Modelo da chave observada no SD em análise.

Open Probe

#Phases: 3

Monitor:

- ☒ A-1
- ☒ B-2
- ☒ C-3
- ☐ D-4
- ☐ E-5

Steady-state

☐ Voltage

OK Help

Figura 22. Medidor de tensão implementado no SD simulado.

A modelagem do regulador foi parecida com a modelagem de um transformador, contudo, utilizando um transformador elevador de tensão. As impedâncias equivalentes necessárias para modelar o transformador foram extraídas da Tabela 8. A relação de quanto a tensão aumentará do primário para o secundário foi calculada de maneira que melhor mantivesse os índices de tensão ao longo do SD. Para finalizar foram modeladas as transposições das fases das linhas de distribuição. Esta modelagem foi realizada por cartões específicos no *ATPDraw*.

Depois de caracterizado todos os componentes do SD, estes foram devidamente conectados para melhor representar o sistema em análise. O resultado gráfico proveniente do ATPDraw dessa conexão pode ser vista na Figura 23. Os resultados das simulações neste SD serão expostos na seção de resultados. Nota-se que a modelagem deste SD levou em conta algumas considerações não fornecidas por [4], como o caso do regulador de tensão, das características das cargas e da impedância equivalente do sistema de transmissão que alimenta esse SD.

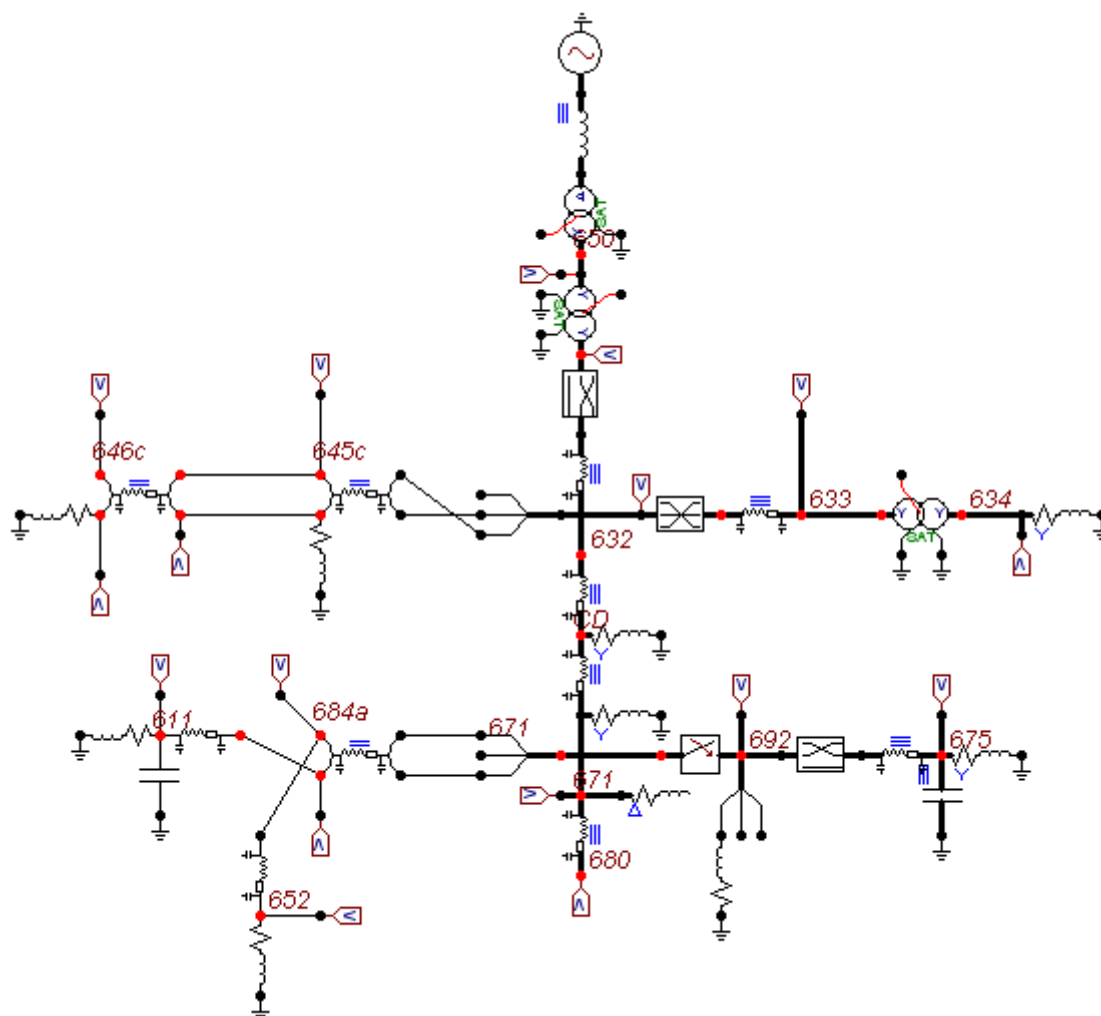


Figura 23. SD simulado via a interface gráfica ATPDraw.

3.3.2 Resultados das Simulações para o SD de 13 Barras

A análise das tensões obtidas em todos os barramentos do SD mostra a ocorrência de quedas de tensão normais ao longo da rede e um considerável, mas justificável, desequilíbrio das tensões entre as fases, visto que neste SD existe a conexão de cargas trifásicas desbalanceadas e monofásicas com potências diferentes entre as fases. A tensão no barramento 650, logo depois da

subestação, possui tensões um pouco desequilibradas e com valores bem próximos da nominal (tensão eficaz de linha de 4,16 kV). O gráfico da Figura 24 mostra a tensão no barramento 650 ao longo do tempo. Para facilitar a visualização, este valor foi normalizado pela tensão de fase do sistema.

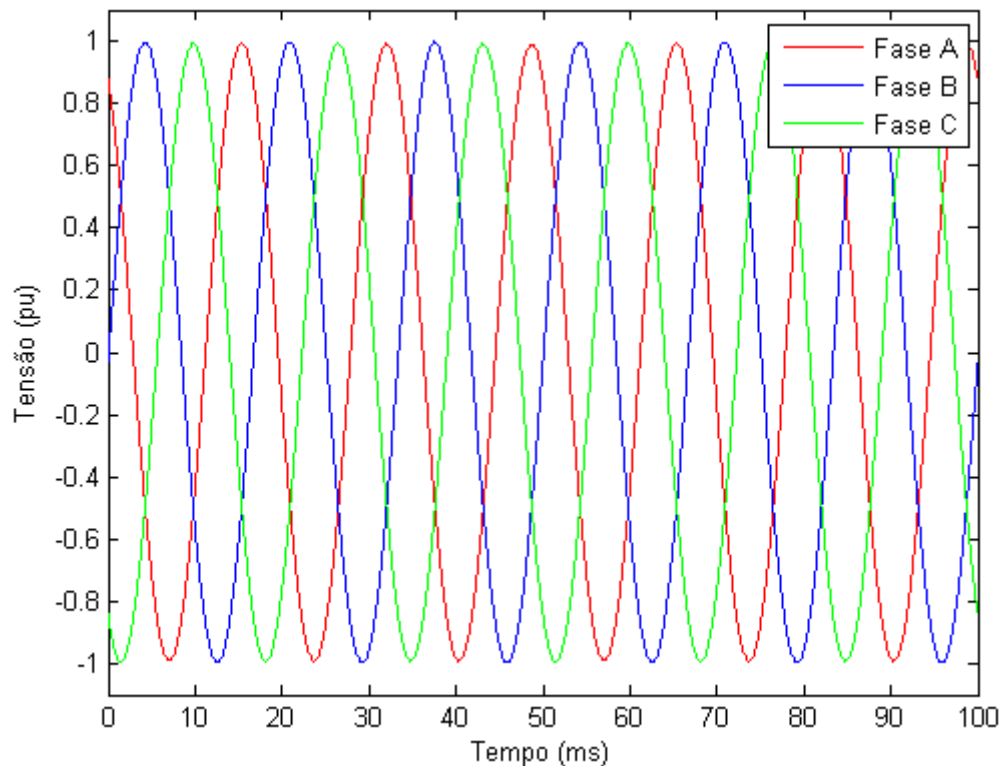


Figura 24. Tensões trifásicas no barramento 650.

A tensão trifásica no barramento 680 ao longo do tempo está ilustrada pela Figura 25. Esta também foi normalizada pela tensão de fase do sistema. Este gráfico foi exposto para exemplificar que nos barramentos mais distantes da subestação, ocorre um aumento nos índices de desequilíbrio de tensão. Este desequilíbrio pode ser calculado pelo desvio máximo dos valores médios das tensões ou correntes de linha trifásicas, dividindo pela média dos mesmos valores [5]. Deste modo, tem-se:

$$Desq.Tens.\% = \frac{\Delta V}{V_m} = \frac{1,767 - 1,704}{1,741} \cdot 100 = 3,62\%$$

Vale ressaltar que o efeito da queda de tensão foi amenizado com a introdução do regulador (autotransformador) abaixo do barramento 650.

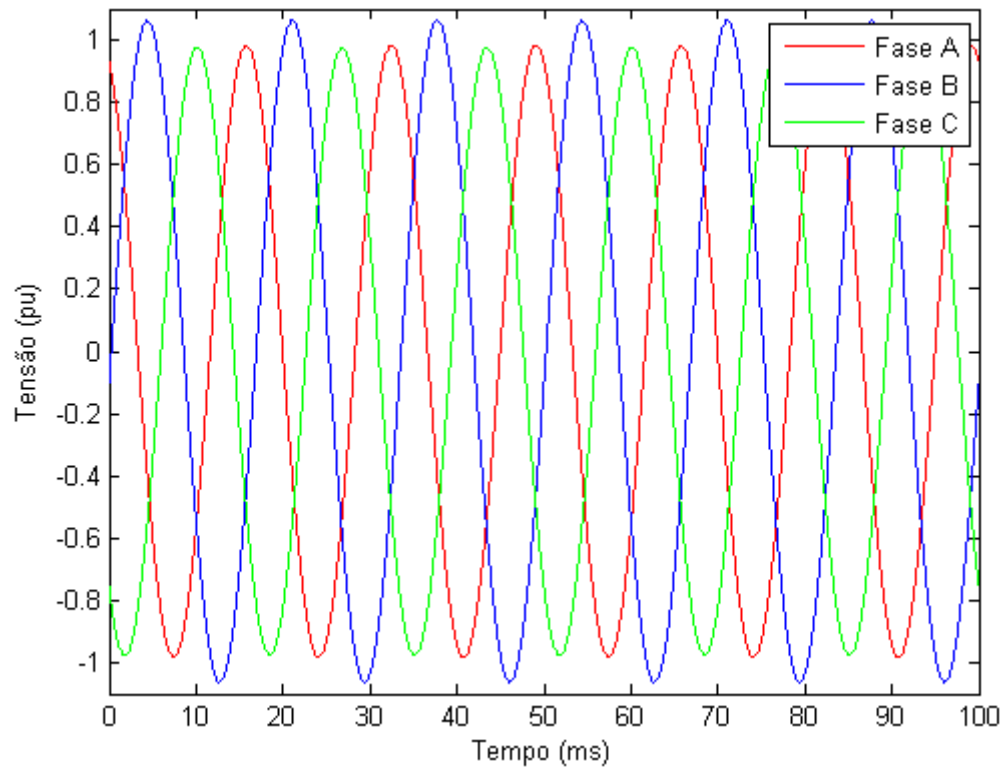


Figura 25. Tensões no barramento 680 do SD simulado.

Para comparar o método utilizado com os resultados obtidos através do método de fluxo de carga convencional, foram construídos três gráficos com as tensões de cada fase em todos os barramentos do SD. As comparações para as fases *A*, *B* e *C* do sistema são ilustradas pelas Figuras 26, 27 e 28, respectivamente.

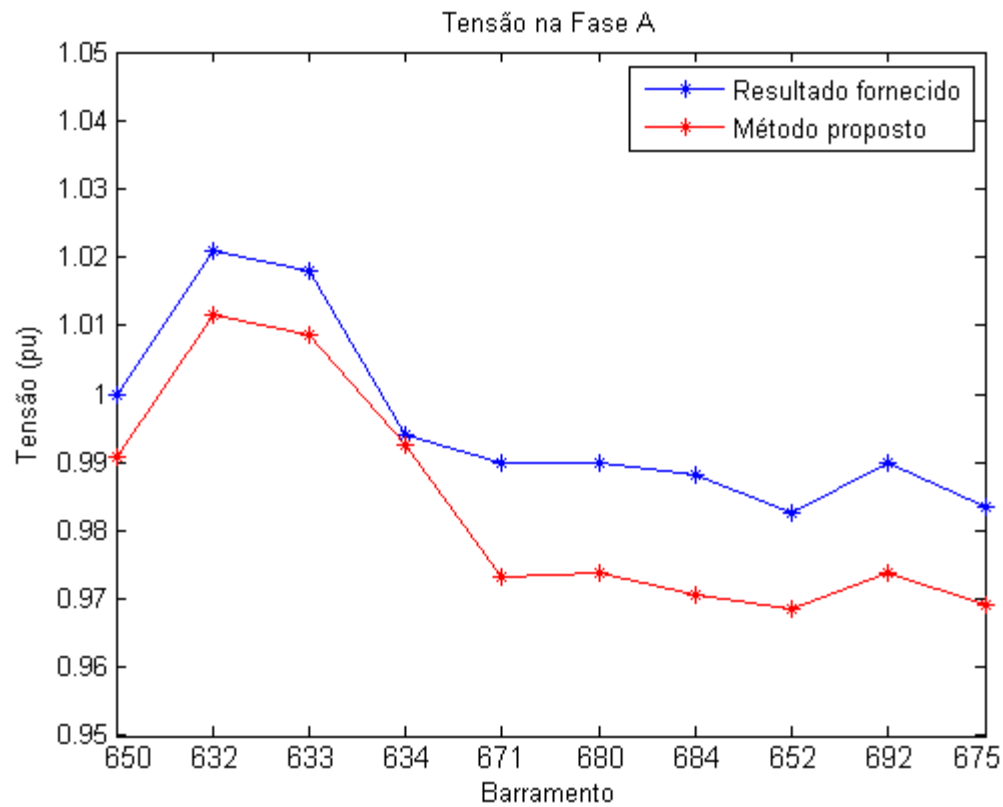


Figura 26. Comparação entre os valores de tensão para a fase A.

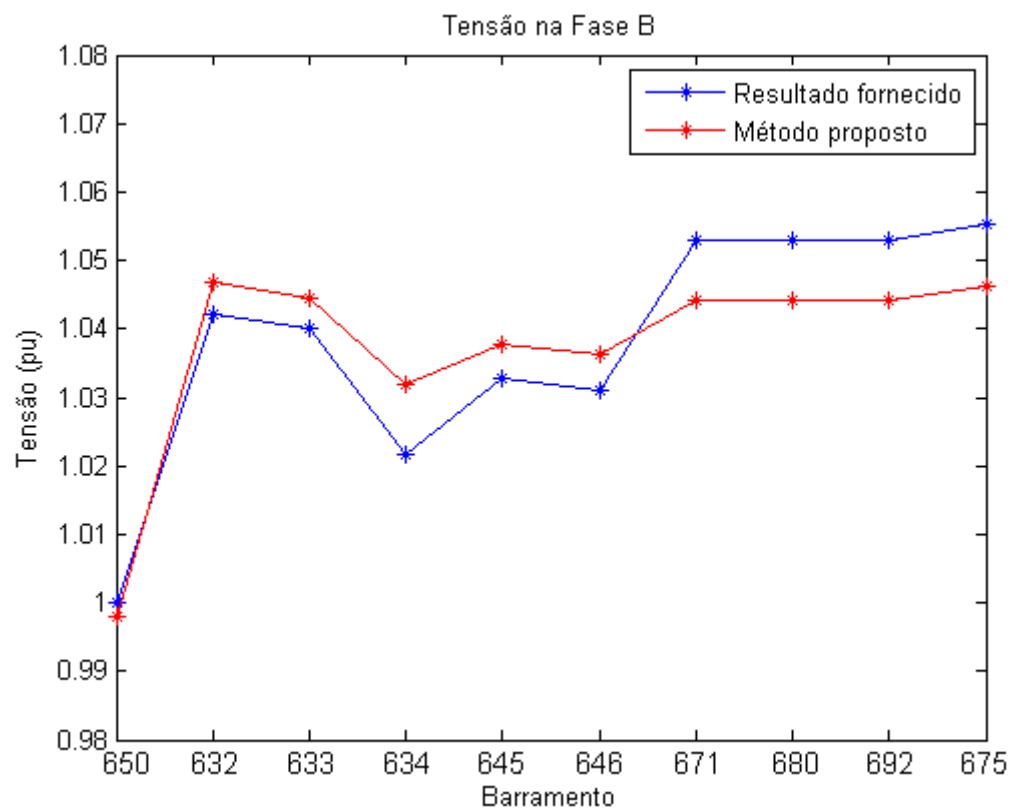


Figura 27. Comparação entre os valores de tensão para a fase B.

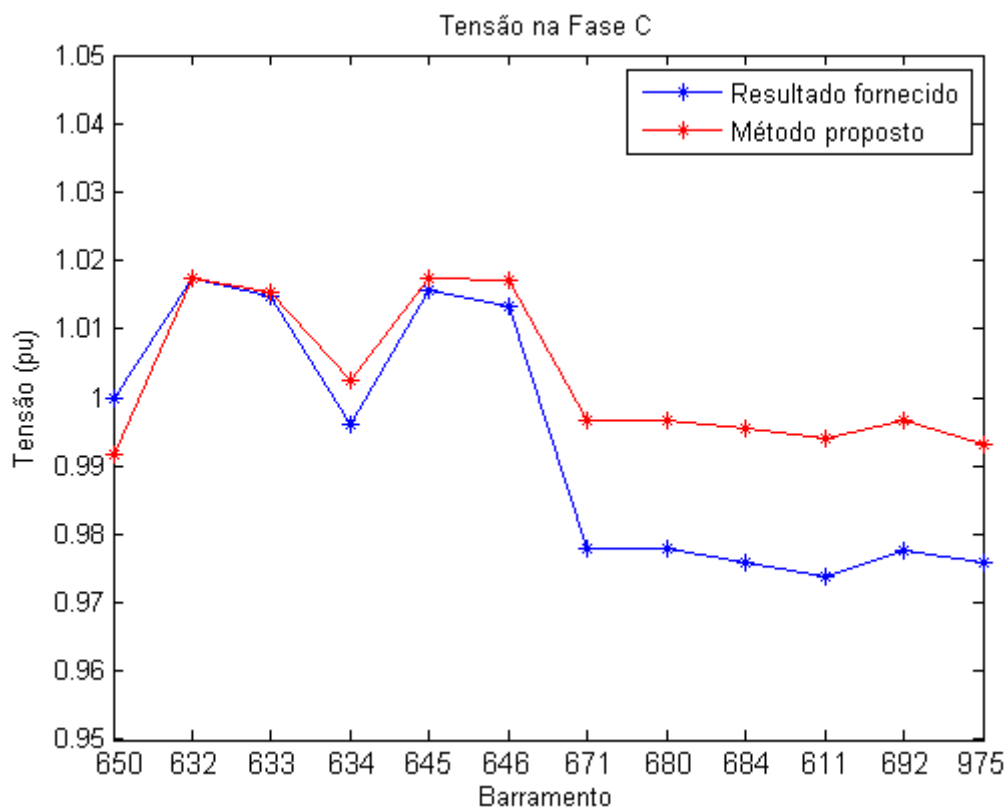


Figura 28. Comparação entre os valores de tensão para a fase C.

Comparando-se os valores das tensões de cada fase em todos os barramentos, nota-se que as tensões no método proposto variam ao longo da rede de maneira similar as variações de tensões no método do fluxo de carga convencional. No entanto, existem algumas barras que o erro absoluto chega a 2%. Tais situações se devem principalmente pela modelagem do regulador e das cargas que ainda apresentam imprecisões e que merecem um melhor refinamento.

3.4. O Sistema de Distribuição de 37 Barras

Os parâmetros e orientações para a modelagem do sistema de distribuição de 37 barras foram extraídos de documentos contidos em [4], sendo a sua configuração espacial exposta na Figura 29. As características dos componentes empregados serão apresentadas no que segue. Vale ressaltar que as tabelas com os valores destes componentes não serão detalhados neste projeto, mas estas especificações podem ser facilmente encontradas em [4].

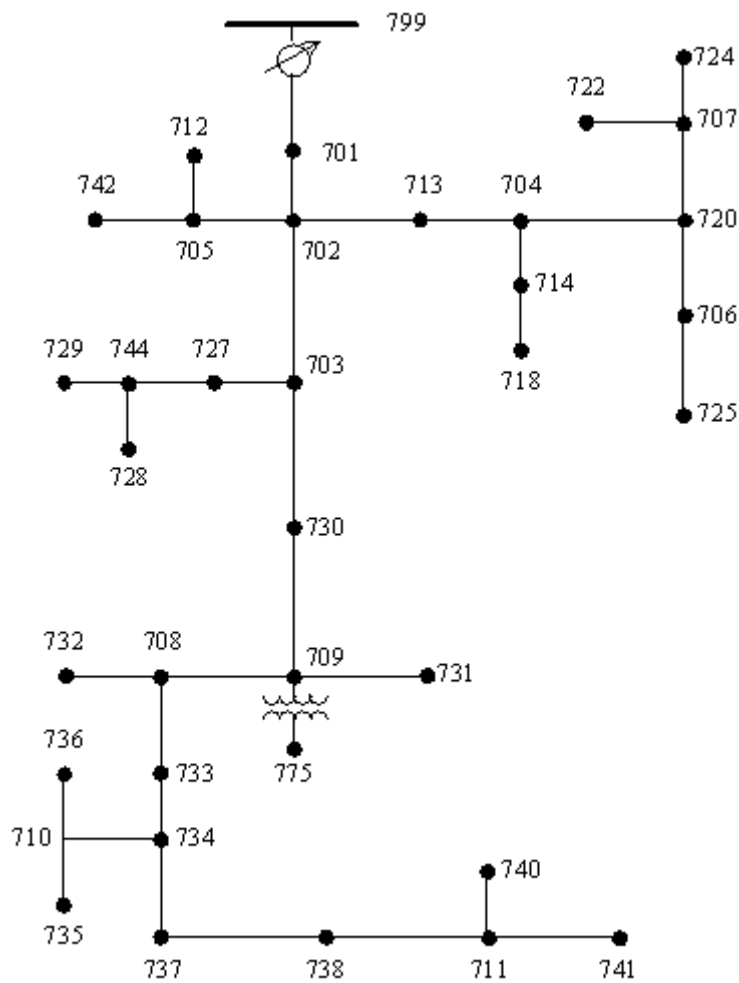


Figura 29. Sistema de 37 barras.

Linha de Distribuição

Existem quatro configurações diferentes de linhas de distribuição neste sistema, todas elas, linhas subterrâneas. As matrizes de impedâncias e admitâncias mútuas são simétricas, por isso apenas a parte da triangular superior foi fornecida.

Para facilitar a modelagem, as linhas de distribuição foram consideradas de comprimento médio, sendo escolhido o modelo PI (π) equivalente para representá-las. Modelo este conveniente, pois os valores fornecidos em [4] se encaixam neste modelo.

Transformadores

Este sistema contém dois transformadores abaixadores de tensão, um localizado acima do barramento 799, usado para transformar a tensão de transmissão (230 kV) em tensão de distribuição (4,8 kV). O outro transformador está localizado entre os barramentos 709 e 775 que tem por objetivo de diminuir a tensão de distribuição para uma tensão nominal menor (480 V) no

barramento 775.

A modelagem dos transformadores levou em conta as tensões de transformação e as impedâncias equivalentes. Cabe ressaltar que tensão de referência adotada, foi à tensão no barramento 799.

Cargas

Existem diversas cargas neste sistema, com características e potências diferentes entre si. Algumas cargas apresentam potências constantes (PQ), outras correntes constantes (I) e outras impedâncias constantes (Z). Todas as cargas estão conectadas em delta (D) e, com exceção de uma carga, todas são cargas desequilibradas.

Para facilitar a modelagem, todas as cargas foram consideradas cargas com impedância constante. Visto que a interface do *ATPDraw* trabalha apenas com valores de impedâncias, os valores das potências de cargas foram convertidos para impedâncias através da equação (4).

Regulador de tensão

Este sistema também contém um regulador de tensão, localizado logo abaixo do barramento 799, ele é usado para que em média todas as tensões permaneçam o mais próximo de 1 p.u. (por unidade).

O regulador foi modelado usando apenas a impedância fornecida em [4], juntamente com uma relação de transformação apropriada.

3.4.1 A modelagem do SD de 37 Barras

A modelagem do SD de 37 barras foi realizada de maneira idêntica a realizada para o SD de 13 barras, tanto em relação aos componentes do circuito, como das linhas de distribuição, transformador, cargas e regulador, como em relação às configurações do *software ATPDraw*. Este sistema de 37 barras foi simulado considerando os valores por unidade (p.u.). A potência base do sistema considerada foi a potência do transformador da subestação, sendo a tensão do lado de baixa do transformador da subestação, a tensão de base do sistema. Portanto, a impedância base do sistema será a tensão base do sistema ao quadrado dividido pela potência base do sistema.

A montagem dos parâmetros desse sistema foi realizada de maneira muito semelhante às anteriores. A configuração espacial do sistema de 37 barras no *software ATPDraw*, depois de modelado e conectados todos os componentes do sistema, pode ser visualizada na Figura 30. Depois de finalizada a modelagem, pôde-se realizar diversas simulações. Estes resultados serão expostos na seção de resultados que segue a este documento.

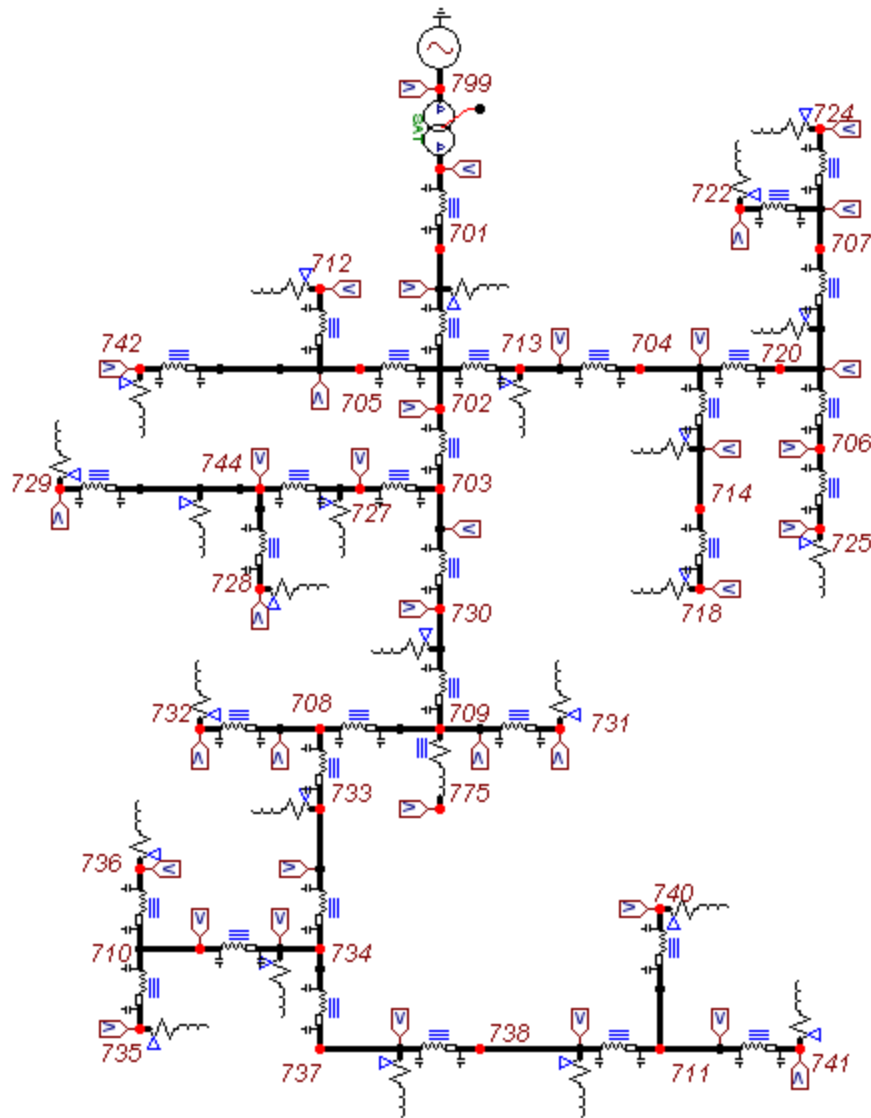


Figura 30. Sistema de 37 barras modelado via o software ATPDraw.

3.4.2 Resultados das Simulações para o SD de 37 Barras

As análises das tensões em cada barramento indicam que o sistema possui justificáveis quedas de tensões ao longo da rede e um pequeno desequilíbrio de tensão entre as fases. Para exemplificar, foi calculado o desequilíbrio de tensão referente ao barramento 701.

$$\text{Desq. Tens. \%} = \frac{\Delta V}{V_m} = \frac{1,691 - 1,679}{1,683} \cdot 100 = 0,71\%$$

Como pode ser visualizado, o desequilíbrio de tensão para este barramento é menor que o observado no SD de 13 barras, isso é justificado pelo fato de que o SD de 37 barras não possui tantas cargas desequilibradas como no caso do SD de 13 barras.

Contudo, como a modelagem do regulador usada não é precisa, adotou-se a tensão de

referência do sistema como sendo a tensão no barramento 701 e foram desconsiderados os barramentos 799 e o barramento do regulador (RG7). Esta ação minimiza o efeito do regulador nos demais barramentos e permite visualizar de forma mais precisa o resultado decorrente do método aplicado.

Como foi realizado anteriormente, têm-se os gráficos que comparam o método proposto com o método do fluxo de carga convencional. Os gráficos das Figuras 31, 32 e 33 representam as comparações dos métodos através da magnitude das tensões em todos os barramentos para as fases A, B e C respectivamente.

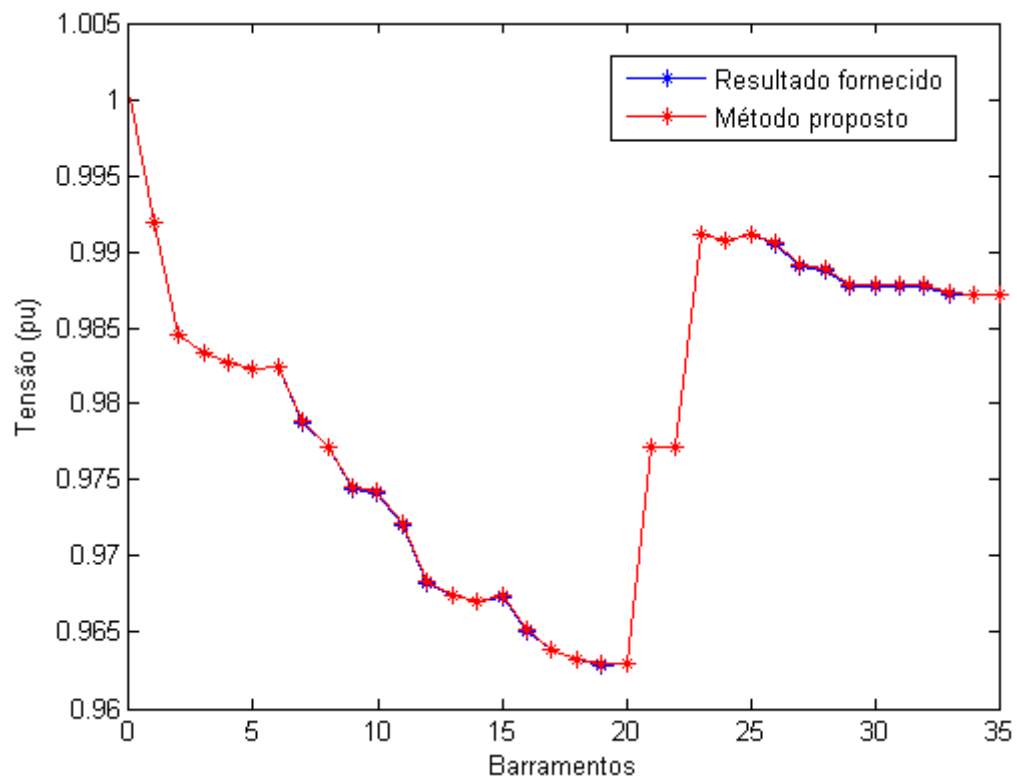


Figura 31. Tensões na fase A de todos os barramentos, com referência ao barramento 701.

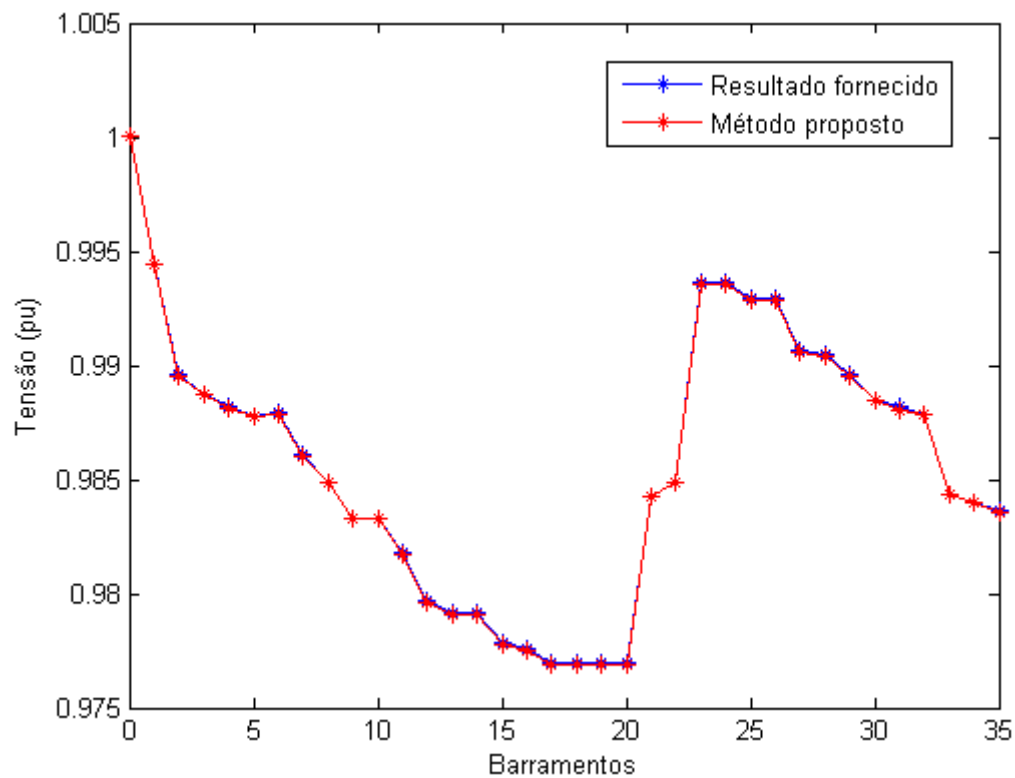


Figura 32. Tensões na fase B de todos os barramentos, com referência ao barramento 701.

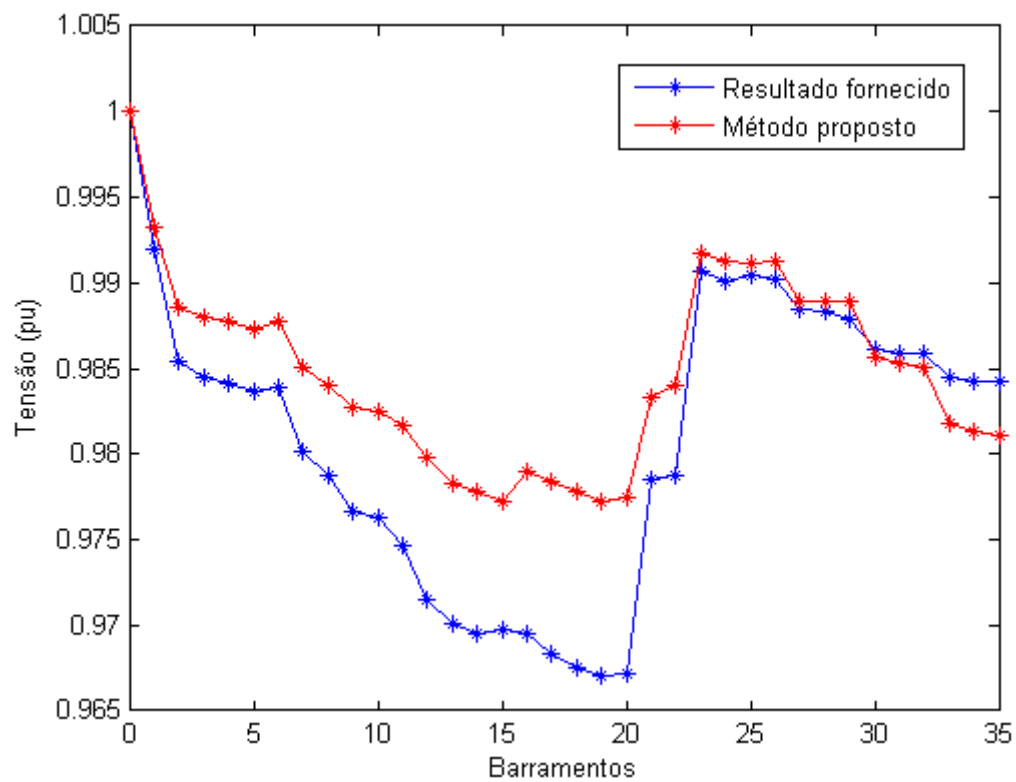


Figura 33. Tensões na fase C de todos os barramentos, com referência ao barramento 701.

Para facilitar a visualização dos gráficos, os barramentos foram colocados em ordem crescente de 0 a 35. A relação de qual barramento do gráfico representa o barramento real do sistema de 37 barras pode ser visualizado na Tabela 9. Através dos gráficos citados (Figuras 30 e 31), pode-se perceber que a magnitude das tensões das fases *A* e *B* são praticamente iguais quando comparados os resultados do método proposto com o resultado fornecido. No entanto, para a fase *C*, o erro entre o método proposto e o resultado fornecido apresentou certa discrepância, que na média ficou abaixo de 1%.

Tabela 9. Relação de barramentos, com referência à barra 701.

Gráfico	Sistema	Gráfico	Sistema	Gráfico	Sistema
0	701	12	734	24	712
1	702	13	710	25	742
2	703	14	735	26	713
3	727	15	736	27	704
4	744	16	737	28	714
5	728	17	738	29	718
6	729	18	711	30	720
7	730	19	740	31	706
8	709	20	741	32	725
9	708	21	731	33	707
10	732	22	775	34	722
11	733	23	705	35	724

4. Processamento dos Dados Simulados

Para automatizar as análises das VTCD e VTLD foi implementado um método para analisar as oscilografias das formas de onda de tensão simuladas e registradas sobre um SEP qualquer. Este método consiste em detectar o instante de ocorrência da falta (curto-circuito), a duração dos transitórios de pré e pós falta, bem como a duração do fenômeno principal no contexto da qualidade da energia elétrica (QEE). O método também tem por objetivo indicar e analisar os valores RMS (*Root Mean Square*) e distorção harmônica total de tensão em cada uma dessas parcelas. Por fim, o fenômeno principal deverá ser classificado dentro dos distúrbios de VTCD e VTLD. Como anteriormente apresentado no capítulo 3, todas as formas de onda de tensão foram obtidas via simulações computacionais dos sistemas de distribuição e transmissão modelados no projeto, através do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) dispondo da interfase gráfica do ATPDraw. O método foi totalmente implementado via o *software* Matlab[®], que também foi utilizado para construção de tabelas e gráficos.

4.1. Definição do Problema

A motivação para construção deste *software* de processamento dos dados é desenvolver um método automatizado para a análise e a caracterização por completa de uma situação de falta sobre um SEP, visando o monitoramento da QEE. Sabe-se que mediante a uma condição de falta transitória, geralmente, a oscilografia da forma de onda da tensão possui cinco parcelas que podem ser consideradas de forma independentes. São elas: Operação normal de pré falta, transitório de pré falta, fenômeno principal, transitório de pós falta e operação normal de pós falta. A Figura 34 exemplifica de maneira gráfica as parcelas citadas anteriormente.

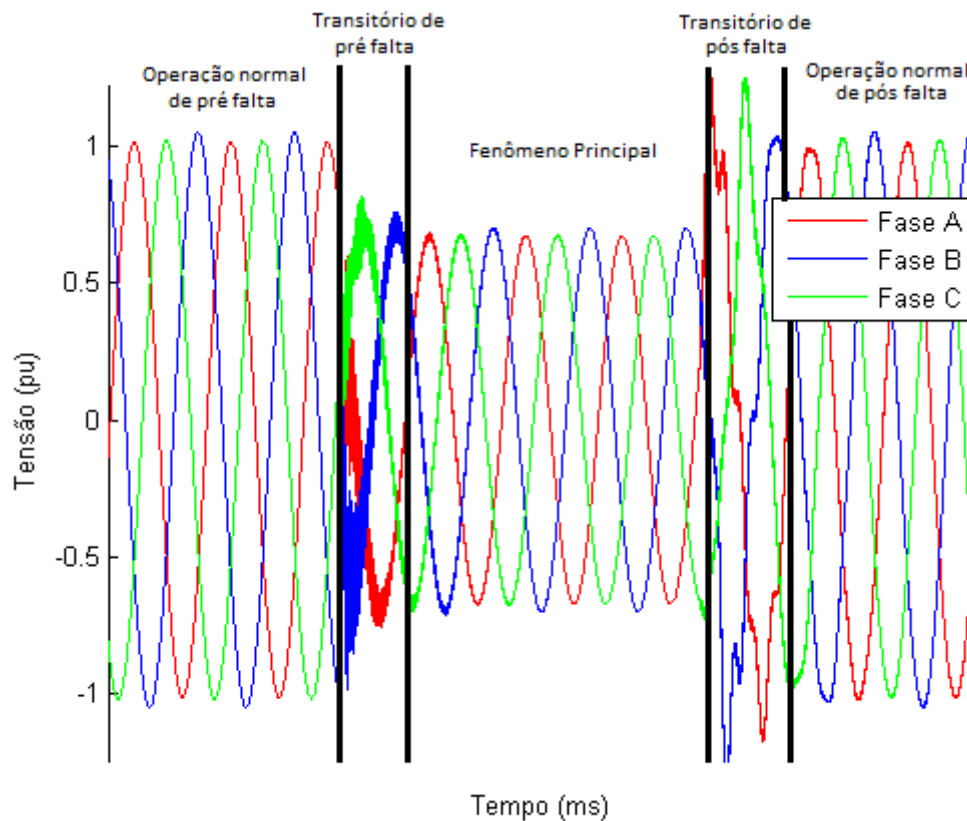


Figura 34. Segmentação da forma de onda faltosa em 5 parcelas.

Nota-se que para uma correta separação entre essas 5 parcelas, e futura análise e caracterização destas, é necessário encontrar os pontos críticos, que são o início e fim do transitório de pré falta e o início e fim do transitório de pós falta. Nesta pesquisa, a caracterização de cada parcela englobará a obtenção das amplitudes, duração e componentes harmônicas presentes.

Deste modo será possível determinar como a QEE é afetada para diversos tipos de faltas que possam ocorrer em um SEP. Além da capacidade de levantar amplos bancos de dados que mostram como a qualidade da energia é afetada com faltas em determinadas fases. Vale ressaltar que este método pode ser integrado por qualquer ferramenta de medição de energia elétrica ou mesmo *software* que simulem esses medidores ou gerem as formas de ondas de tensão, ou até mesmo as de corrente.

Como este projeto focará em análises direcionadas à QEE, a abordagem do problema não foi implementada de maneira “*online*”, ou seja, o *software* amostra um período da forma de onda de tensão e, posteriormente, este é processado via o *software* implementado neste trabalho. Contudo, para aplicações práticas, em campo, seria de grande importância desenvolver este método, fazendo com que este responda em tempo real, de forma “*online*”. Deste modo, o método implementado poderá ser também utilizado para dar suporte, ou complementar informações necessárias, por exemplo, para a proteção de sistemas de energia elétrica.

Vale ressaltar que o desenvolvimento do método proposto no Matlab[®], envolveu um estudo em seus “*Toolbox*”, e as dúvidas geradas ao longo do desenvolvimento e programação foram sanadas tendo como base a referência [13].

4.2. Implementação do Método

Para facilitar o desenvolvimento do *software* proposto (método de análise e caracterização de eventos com base em oscilografias de tensão) e também auxiliar o entendimento do mesmo, foi construído um fluxograma de ações que se divide basicamente em 8 etapas. O esquemático deste fluxograma pode ser visualizado na Figura 35, vale ressaltar que este fluxograma é um esquemático das três fases do sistema. A explicação detalhada de cada etapa será apresentada no que segue.

Para funcionamento correto do *software* proposto, o sinal de onda de tensão de entrada deve possuir pelo menos um ciclo de onda inicial e final sem falta e deve-se também, assegurar que existiu uma falta e a mesma foi extinta. Isento destas características o *software* proposto não responderá corretamente.

Comenta-se que em um primeiro momento, o *software* proposto foi desenvolvido para realização da análise de casos específicos, que seriam úteis para os estudos pertinentes ao projeto, tais como, estudar como as faltas influenciam as formas de onda de tensão de um barramento. Estes casos específicos são aqueles em que a falta entra e sai do sistema sem serem detectadas pela proteção. Sendo que o processamento dos dados cobre de forma correta toda gama de distúrbios que resultam em VTCD e VTLD.

Ressalta-se que caso seja necessário adaptar este *software* para outros tratamentos específicos, basta realizar pequenas modificações em certas rotinas de programação, rotinas estas que serão discutidas no decorrer desta seção.

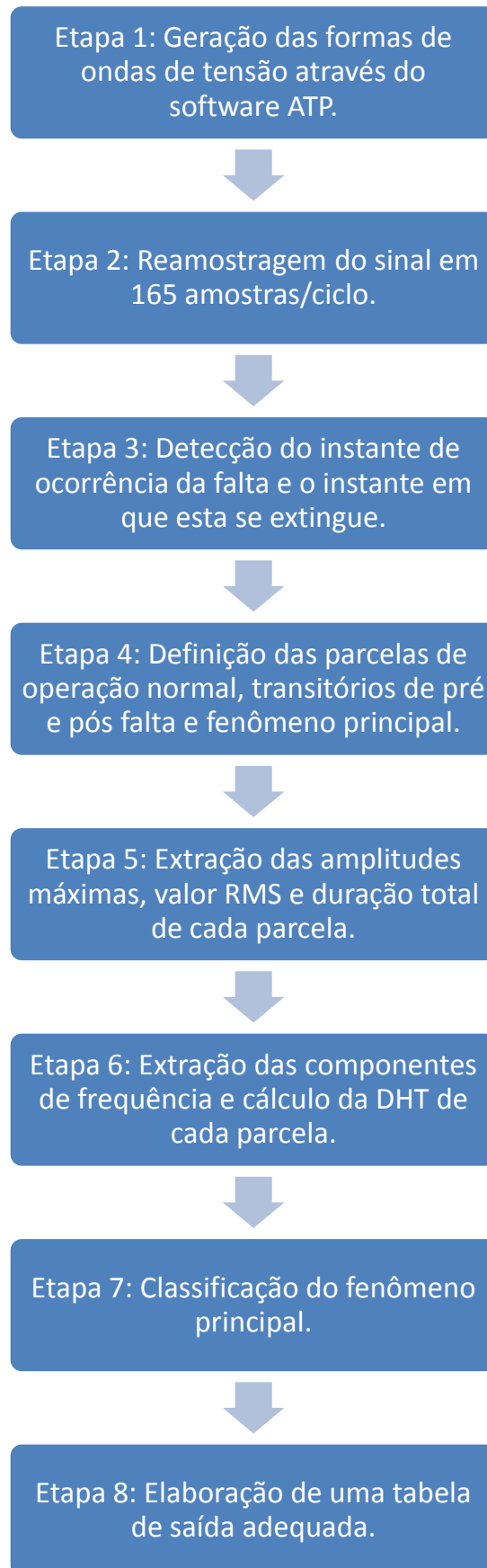


Figura 35. Fluxograma do Método Proposto.

Etapa 1:

Conforme já comentado, para geração da forma de onda de tensão, foi utilizado o *software* ATP [5] via a interface do *software* ATPDraw [14], onde foram geradas as formas de onda das tensões trifásicas do SEP em análise. Cabe colocar que o *software* ATP em questão amostra o sinal com uma taxa de 1 MHz, que pode ser aproximado para um sinal analógico. O sinal gerado no ATP via o ATPDraw foi transportado para o *software* Matlab®, onde os demais processos foram implementados.

Nota-se que a transferência dos dados do ATP para o *software* Matlab® foi realizada de maneira rápida e eficiente, realizada pela função “load”. Para utilizá-la basta colocar o nome do arquivo a ser carregado, arquivo este que deve estar localizado na mesma pasta do programa. Para exemplificar seu uso foi utilizada uma linha do programa, conforme pode ser visto abaixo em *itálico*.

```
load FTtrif_e6.txt
```

Vale ressaltar que se deve adequar este sinal para sua aplicação, ou seja, caso o sinal vindo do ATP não esteja normalizado em p.u. é aconselhável que o programa normalize. Ou seja, dividir o valor da tensão real medida, pela tensão base do sistema.

Etapa 2:

Primeiramente, no Matlab® foi realizada a reamostragem do sinal para uma taxa de amostragem de 165 amostras por ciclo, tomando como base uma janela de dados de 1 ciclo. Vale ressaltar que estes valores foram escolhidos intuitivamente, de tal forma que facilitasse a programação do método em questão, e este fosse o mais confiável possível. Esta reamostragem foi realizada através de um “for” como pode ser visto abaixo em *itálico*.

Vale ressaltar que esta taxa de amostragem foi escolhida para facilitar o desenvolvimento do *software*. Observou-se que 256 amostras/ciclo poderiam sobrecarregar o processamento e que 128 amostras/ciclo talvez não fossem o suficiente. Então foi escolhido 165 amostras/ciclo, valor este entre dois valores usualmente aplicados, e que por isso foi considerado adequado.

```
for i=1:tam_apt
    aux=aux+1;
    if (aux>=101)
        aux2=aux2+1;
        y1(aux2)=y1_atp(i);
        y2(aux2)=y2_atp(i);
        y3(aux2)=y3_atp(i);
        x(aux2)=x_atp(i);
    aux=0;
    end
end
```

Este código funciona da seguinte maneira, o “for” será realizado até completar toda a extensão do sinal vindo do ATP, representado pela variável “tam”. O valor 101 representa a conversão entre a amostra de 1 MHz vindo do ATP para a taxa de 165 amostra/ciclo ou 9,9 kHz, utilizada no *software*. As variáveis y1, y2 e y3 representam as formas de onda reamostradas, enquanto que y1_atp, y2_atp e y3_atp representam as formas de onda vinda do ATP. As variáveis aux e aux2 são utilizadas para auxiliar na lógica.

Etapa 3:

Posteriormente, foram detectados os instantes em que a falta começa (início do evento), e o instante em que esta se extingue (final do evento), além dos instantes em que acaba o transitório de pré falta e o que começa o transitório de pós falta. Para encontrar estes instantes foram utilizadas duas função, como pode ser visualizadas abaixo.

```
for ind = 166:(tam(1)-165)
    if (abs(y1(ind) - y1(ind-165)) >= erro)
        if (abs(y1(ind) - y1(ind+165)) >= erro)
            k=k+1;
            pontflh_y1(k)=ind;
        end
    end
end

for aux = 1:(ta_y1(1)-1)
    if(pontflh_y1(aux+1) - pontflh_y1(aux) >= 50)
        corr_ini_y1 = 1;
        corr_fin_y1 = aux;
        corr_ini_y12 = aux + 1;
        corr_fin_y12 = ta_y1(1);
        break
    end
end
```

O primeiro “for” é para encontrar os pontos que não são compatíveis nem com a forma de onda anterior nem com a posterior (transição). Utilizou-se para tal, uma variável de erro estabelecida por critérios práticos. A cada vez que esse erro era ultrapassado, o instante foi guardado em uma variável. O segundo “for” é construído para detectar o primeiro e o último instante das transições de pré e pós falta. Foi utilizado uma constante apropriada e os instantes de transição anteriormente calculados.

Posteriormente, criou-se um método para extrair os pontos que não são considerados como faltas (“outlines”), para isso se utilizou de um contador que é incrementado quando este é diferente do ciclo anterior e posterior, sendo decrementado quando é igual a um dos dois. Este contador estoura em 5 (atribuído empiricamente) e então é considerado o ponto real da falta, conforme pode ser visualizado na linha de código abaixo.

```

for aux = corr_ini_y1:corr_fin_y1-1
    count = 0;
if abs(pontflh_y1(aux+1) - pontflh_y1(aux)) <= 1
    count=count+1;
else
    count=count-1;
end
if count >= 5
    corr_ini_y1=aux-5;
break
end
end

```

Vale ressaltar que estes códigos foram replicados para as 3 fases dos sinais das tensões processadas (fases A, B e C), realizando as alterações de variáveis necessárias.

Etapa 4:

Como mencionado anteriormente, através destes pontos é possível dividir uma situação faltosa, em 5 parcelas distintas. Delimitando e caracterizando a sequência de descontinuidades da forma de onda da tensão que ocorrem em um SEP quando um defeito entra e sai do mesmo. As parcelas são: Operação normal de pré falta; Transitório de pré falta; Fenômeno principal ou regime permanente de falta; Transitório de pós falta; e Operação normal de pós falta. Esta divisão foi realizada para que a caracterização de cada parcela fosse realizada de forma mais rápida e eficiente. O código responsável por esta divisão está representado abaixo.

```

parc1_y1=[1:1:pontflh_y1(corr_ini_y1)];
parc2_y1=[pontflh_y1(1+corr_ini_y1):1:pontflh_y1(corr_fin_y1)];
parc3_y1=[pontflh_y1(corr_fin_y1):1:pontflh_y1(corr_ini_y12)];
parc4_y1=[pontflh_y1(corr_ini_y12):1:pontflh_y1(corr_fin_y12)];
parc5_y1=[pontflh_y1(corr_fin_y12):1:tam(1)];

x_parc1_y1=x(parc1_y1);
parc1_y1=y1(parc1_y1);
x_parc2_y1=x(parc2_y1);
parc2_y1=y1(parc2_y1);
x_parc3_y1=x(parc3_y1);
parc3_y1=y1(parc3_y1);
x_parc4_y1=x(parc4_y1);
parc4_y1=y1(parc4_y1);
x_parc5_y1=x(parc5_y1);
parc5_y1=y1(parc5_y1);

```

Foram utilizados os pontos em que se inicia e finaliza o transitório de pré falta e de pós falta, encontrados anteriormente, para dividir (segmentar) a forma da onda. Ou seja, do início da forma de onda analisada até o ponto inicial do transitório de pré-falta é uma parcela (operação normal de pré falta), do ponto inicial até o final do transitório de pré-falta é a segunda parcela (transitório de pré falta), do ponto final do transitório de pré falta até o ponto inicial do transitório de pós-falta é a terceira parcela (fenômeno principal), do ponto inicial e final do transitório de

pós-falta é uma quarta parcela (transitório de pós falta) e do ponto final do transitório de pós falta até o final da forma de onda analisada é uma quinta parcela (operação normal de pós falta). Novamente esse código foi replicado para as demais fases do sistema.

Nota-se que caso haja um transitório de pré e/ou de pós falta bem atenuados, praticamente inexistente, o *software* operará corretamente. Uma vez que este considera que os transitórios são porções da forma de onda que não são compatíveis nem com o ciclo anterior, nem com o posterior. Tal consideração resultará, na tabela de saída, um tempo de duração praticamente nulo e tensão de pico similar às tensões de pico da parcela de pós ou pré falta.

Etapa 5:

Seguiu-se com a extração das amplitudes máximas das parcelas de transição, dos valores RMS das parcelas estáveis e com a extração do tempo de duração de cada uma, exceto da parcela de operação normal de pré e pós falta. As amplitudes máximas dos transitórios são de grande importância para se observar a influência das VTCD sobre os mesmos.

Porém esta análise não fica tão precisa, uma vez que os transitórios possuem altas frequências e a amostragem utilizada não é grande o suficiente para caracterizar de forma precisa estes sinais. No entanto, da forma que estas parcelas foram apresentadas, é possível se ter uma ideia clara de como as parcelas de transitório de pré e pós falta normalmente se comportam nos SEP, propiciando uma análise consideravelmente satisfatória das mesmas. O código utilizado para extração destes dados está mostrado abaixo.

```
%primeiro caso
ampli_pri_y1=max(abs(parcl_y1))/sqrt(2);
%segundo caso
ampli_sec_y1=max(abs(parcl2_y1));
comp_xparc2=size(x_parc2_y1);
dur2_y1=comp_xparc2(2)*16.6666/(165); %ms
%terceiro caso
ampli_ter_y1=max(abs(parcl3_y1))/sqrt(2);
comp_xparc3=size(x_parc3_y1);
dur3_y1=comp_xparc3(2)*16.6666/(165);
%Quarto caso
ampli_qua_y1=max(abs(parcl4_y1));
comp_xparc4=size(x_parc4_y1);
dur4_y1=comp_xparc4(2)*16.6666/(165);
%Quinto caso
ampli_qui_y1=max(abs(parcl5_y1))/sqrt(2);
```

O ponto de máximo de cada parcela foi extraído pela função “max”. A duração foi extraída relacionando o comprimento de cada parcela junto com uma constante que converte esse comprimento em duração, expressa em milissegundos. Novamente, apenas foi representado o código relacionado à fase A do sistema. Porém, este código foi replicado para as demais fases.

Etapa 6:

Como principal ferramenta de processamento dos sinais, foi aplicada a Transformada Discreta de Fourier (TDF) em cada parcela anteriormente definida, a fim de extrair as componentes harmônicas de cada uma, sendo possível então, calcular a DHT (Distorção Harmônica Total) de tensão. Vale ressaltar que para as VTCD e VTLD (fenômenos principais), e a operação normal, os sinais em análise podem ser considerados aproximadamente como uma senoidal perfeita, pois, por definição, os mesmos apresentam a predominância da frequência fundamental. Deste modo, para o cálculo do valor RMS foi utilizado apenas o valor da amplitude máxima dividido por raiz de dois. Para o cálculo do valor RMS foi usado o segundo valor de amplitude máxima.

Vale ressaltar que o resultado da TDF no Matlab®, apresentou um espalhamento em torno das harmônicas com frequências múltiplas da fundamental. Isto ocorreu devido ao fato de que no método utilizado, a frequência de amostragem do sinal é diferente do comprimento da onda analisada. Estes espalhamentos foram desprezados e para o cálculo da DHT foram utilizadas apenas as componentes harmônicas. Empiricamente, percebeu-se que é válido agir desse modo, uma vez que diferenças entre frequência e comprimento do sinal apenas alteram a presença ou não desse espalhamento, sendo que os valores das harmônicas permanecem os mesmos. Abaixo está expresso o código realizado para cálculo da TDF.

```
Ts=1.010100606e-4;
Fs=1/Ts;
La=size(x_parcl_y3');
L=La(1);
%Cálculo da TDF
NFFT = 2^nextpow2(L);
Y = fft(parcl_y3,Fs)/L;
f = Fs/2* linspace(0,1,Fs/2+1);
```

Nota-se que este código foi baseado no *toolbox* exemplo do próprio *software* Matlab®. Vale ressaltar que a DHT foi calculada utilizando a fórmula (9), sendo o código implementado para este cálculo representado abaixo.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{10} y_n}}{y_1} \quad (5)$$

```
for n = 1:10
    yn(n) = 2*abs(Y(n*f1h+1));
end
sy2_10 = 0;
for s = 2:10
    sy2_10 = sy2_10 + yn(s)^2;
end
DHTV1_y2 = sqrt(sy2_10)/yn(1);
```

Etapas 7:

Através das características da duração e valor RMS do fenômeno principal, este foi classificado entre as classes de VTCD ou VTLD. O código que classifica o fenômeno está exposto abaixo.

```
if dur3_y1 <= 60000
if ampli_ter_y1 <= 0.1
('Interrupção na fase A')
elseif ampli_ter_y1 > 0.1 && ampli_ter_y1 < 0.9
('Afundamento de tensão na fase A')
elseif ampli_ter_y1 > 1.1
('Elevação de tensão na fase A')
end
else
if ampli_ter_y1 <= 0.1
('Interrupção Sustentada na fase A')
elseif ampli_ter_y1 > 0.1 && ampli_ter_y1 < 0.9
('Subtensão na fase A')
elseif ampli_ter_y1 > 1.1
('Sobretensão na fase A')
end
end
```

A classificação foi realizada por fase e entre as subclasses das VTCD (interrupção, afundamento e elevação de tensão) e VTLD (interrupção sustentada, subtensão e sobretensão). Por exemplo, caso o fenômeno principal dure mais que 1 minuto e tenha valor RMS menor que 0,1 p.u. essa fase será classificada como uma Interrupção Sustentada. Caso o fenômeno possua por fase, duração menor que 1 minuto e tenha valor RMS maior que 1,1 p.u. esta é classificada como uma elevação de tensão. E assim por diante, conforme características das VTCD e VTLD, apresentadas anteriormente.

Etapas 8:

Por fim, os valores calculados anteriormente foram colocados em uma tabela de saída como os dados necessários. Sendo disposta de tal forma que ajudasse a visualização do usuário final.

```
tab_saida =
[ampli_pri_y1 ampli_pri_y2 ampli_pri_y3 0 0 0 DHV1_y1 DHV1_y2 DHV1_y3;
 ampli_sec_y1 ampli_sec_y2 ampli_sec_y3 dur2_y1 dur2_y2 dur2_y3 DHV2_y1
 DHV2_y2 DHV2_y3;
 ampli_ter_y1 ampli_ter_y2 ampli_ter_y3 dur3_y1 dur3_y2 dur3_y3 DHV3_y1
 DHV3_y2 DHV3_y3;
 ampli_qua_y1 ampli_qua_y2 ampli_qua_y3 dur4_y1 dur4_y2 dur4_y3 DHV4_y1
 DHV4_y2 DHV4_y3;
 ampli_qui_y1 ampli_qui_y2 ampli_qui_y3 0 0 0 DHV5_y1 DHV5_y2 DHV5_y3;]
```

As características de cada parcela foram colocadas em uma linha dessa tabela. Nas colunas foram dispostos os valores de amplitude e RMS, durações, e DHT das três fases.

4.3. Resultado do Método

Para validação do método proposto, foram realizados diversos testes para confirmar o correto funcionamento deste. Estes testes foram realizados de modo que todos os fenômenos relacionados às VTCD e VTLD fossem testados. Conforme será apresentado, o método apresentou os resultados esperados. Estes foram disponibilizados de forma conveniente propiciando uma melhor visualização ou transportados para outros *softwares* que permitam um trabalho gráfico sobre os mesmos.

A Figura 36 mostra como o método dividiu as parcelas na ocorrência de um curto-circuito transitório envolvendo a Fase A de um SEP. Nota-se que para cada parcela foram atribuídas cores diferentes. Vale ressaltar também, que a caracterização completa da falta pelo método proposto é realizada para cada fase do SEP.

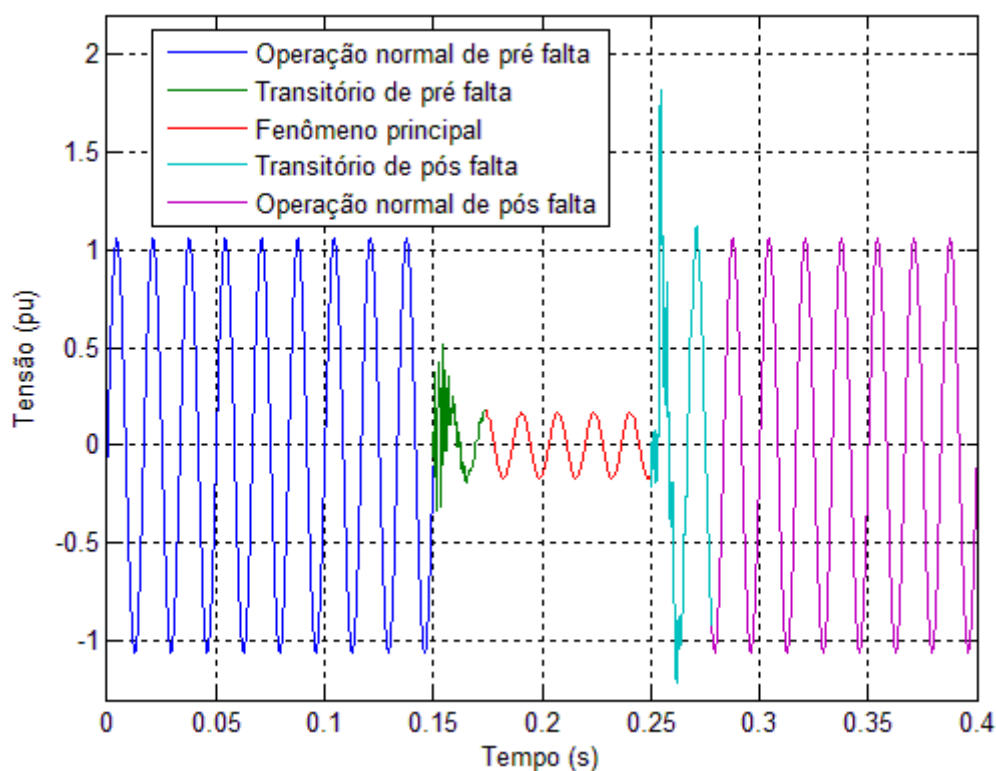


Figura 36. Fase A da forma de onda de tensão analisada.

Para cada parcela da forma de onda da tensão foram extraídas as componentes harmônicas através do TDF. Como comentado anteriormente, foram desprezados os espalhamentos em torno das componentes harmônicas, uma vez que estas não entram no cálculo da DHT. Esta é calculada apenas com as informações das componentes harmônicas múltiplas da fundamental.

Vale ressaltar que as TDF não chegaram a ser adaptadas, ou seja, não houve distinção entre sinais de transitórios de 0,5 ou 1,5 ciclos. Para cálculo da TDF no Matlab® foi apenas fornecido o

período de amostragem do sinal e a forma de onda propriamente dita, conforme [13].

Nas Tabelas 10, 11 e 12 podem ser observadas as tabelas de saída do método implementado para um afundamento trifásico, subtensão trifásica e afundamento monofásico, respectivamente. Apenas estas são suficientes para caracterizar uma situação de falta que entrou no sistema e depois foi extinto. Nota-se que as Figuras 37, 38 e 39 representam as formas de onda da tensão de entrada do método, estas dão origem as Tabelas 10, 11 e 12, respectivamente.

Nota-se que ao representar graficamente uma VTLD por completo, perde-se sensibilidade de visualização das formas de onda, visto que para tal situação, o tempo de permanência do distúrbio é maior do que 1 minuto, e as formas de onda ficarão compactadas no espaço de visualização. Deste modo, dividiu-se a Figura 40 em duas partes, fazendo com que todas as parcelas (operação normal de pré falta, transitório de pré falta, fenômeno principal, transitório de pós falta e operação normal de pós falta) ficassem claramente visíveis.

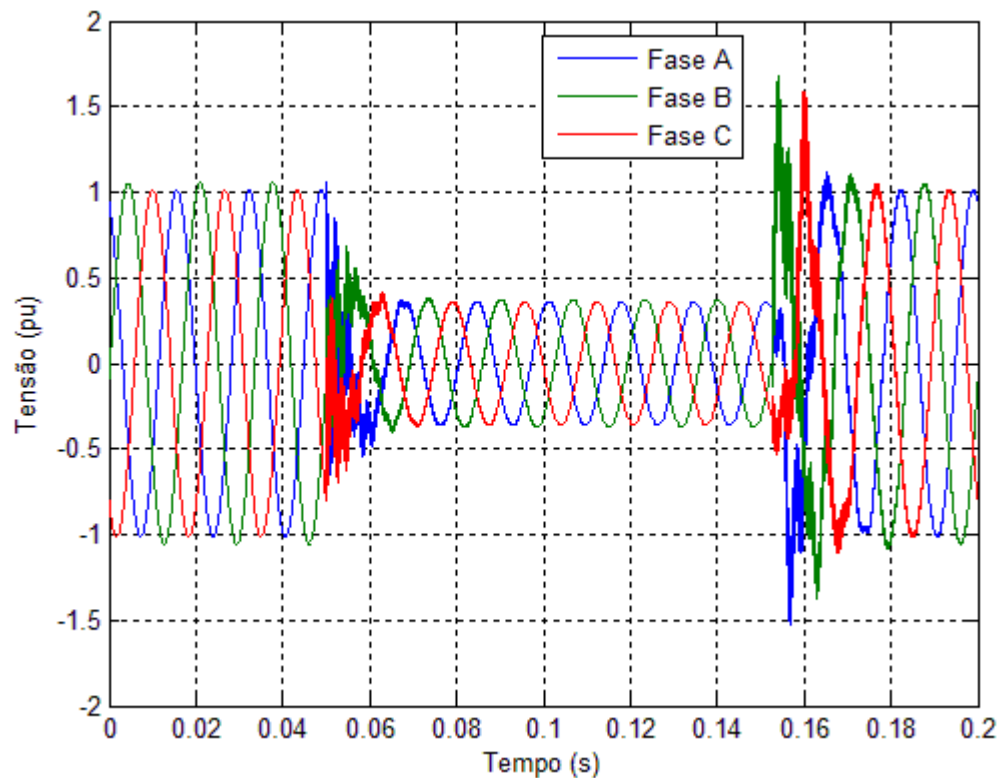


Figura 37. Afudamento Trifásico.

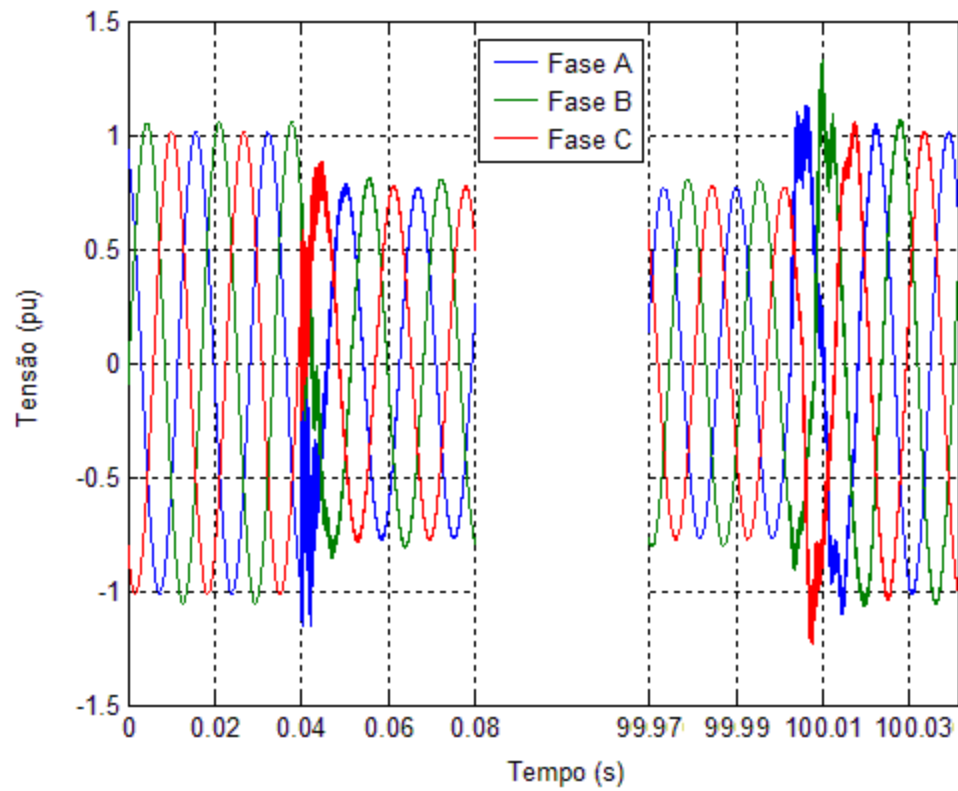


Figura 38. Subtensão Trifásica.

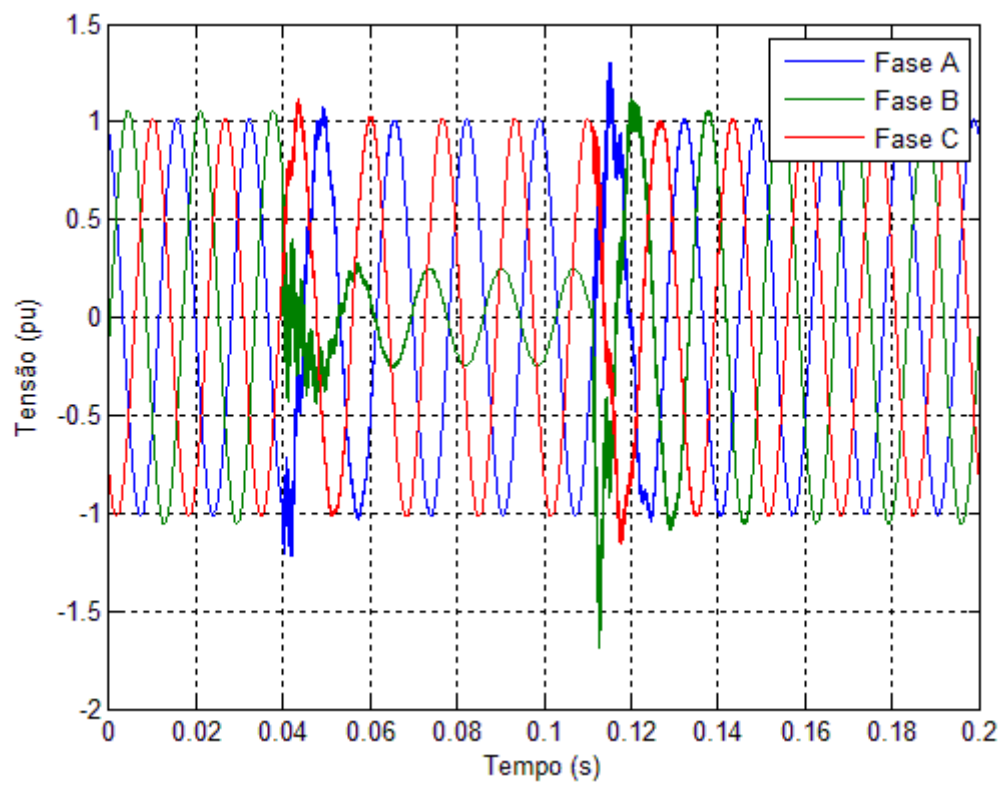


Figura 39. Afundamento Monofásico.

Tabela 10. Tabela de Saída para um Afundamento Trifásico

	Amplitude (RMS)			Duração (ms)			DHT (%)		
	fase A	fase B	fase C	fase A	fase B	fase C	fase A	fase B	fase C
Parcela 1	1,01	1,06	1,01	-	-	-	1,81	0,20	0,39
Parcela 2	0,63	0,62	0,60	17,88	16,46	15,56	30,99	41,53	34,27
Parcela 3	0,36	0,38	0,36	84,85	86,16	87,07	6,30	4,69	5,11
Parcela 4	1,52	1,61	1,50	26,06	28,48	27,07	29,30	22,48	27,44
Parcela 5	1,01	1,05	1,02	-	-	-	24,46	20,23	22,91
Fases A, B e C com Afundamento de Tensão									

Tabela 11. Tabela de Saída para uma Subtensão Trifásica

	Amplitude (RMS)			Duração (ms)			DHT (%)		
	fase A	fase B	fase C	fase A	fase B	fase C	fase A	fase B	fase C
Parcela 1	1,01	1,06	1,01	-	-	-	19,29	11,53	13,78
Parcela 2	1,00	0,83	0,85	8,59	8,89	8,89	92,77	68,76	42,12
Parcela 3	0,78	0,81	0,77	1,94*	1,66*	1,85*	5,78	10,47	5,52
Parcela 4	1,09	1,30	1,21	20,10	23,54	26,16	27,37	28,66	24,79
Parcela 5	1,03	1,06	1,01	-	-	-	6,42	4,82	8,93
Fases A, B e C com Subtensão									

* Resultado expresso em minutos.

Tabela 12. Tabela de Saída para um Afundamento Monofásico

	Amplitude (RMS)			Duração (ms)			DHT (%)		
	fase A	fase B	fase C	fase A	fase B	fase C	fase A	fase B	fase C
Parcela 1	1,01	1,06	1,01	-	-	-	19,31	11,52	13,74
Parcela 2	-	0,42	-	-	20,40	-	-	35,23	-
Parcela 3	-	0,37	-	-	50,91	-	-	1,79	-
Parcela 4	-	1,63	-	-	23,03	-	-	27,95	-
Parcela 5	-	1,06	-	-	-	-	-	0,63	-
Fases B com Afundamento de Tensão									

Caso ocorra um transitório em uma das fases, o *software* verifica se este é devido ao fato de que ocorreu uma falta nessa fase (aparecendo um fenômeno principal), ou se é relacionado a distúrbios em outras fases (não aparecerá o fenômeno principal) ou, por exemplo, até mesmo relacionados a chaveamentos no sistema. Resumindo, caso o *software* verifique que o transitório em uma das fases não está relacionado com uma VTCD ou VTLD, os resultados não são apresentados na tabela final.

Comenta-se que para teste e validação deste algoritmo foram simulados diversos distúrbios classificados como VTCD e VTLD nos dois SD modelados neste projeto. Para todos os casos,

notou-se que os valores de duração e de tensão, dos visualizados via ATP e dos obtidos das tabelas de saída do *software* desenvolvido, não tiveram discrepâncias maiores que 5%.

Além do mais, através dos trabalhos realizados, pode-se comentar que este foi importante por proporcionar um aprimoramento em técnicas de programação, bem como para o conhecimento e aplicação das ferramentas e Toolbox do *software* Matlab®. Além de atingir o objetivo deste trabalho que é de compreender melhor como realizar a classificação e caracterização de uma falta no âmbito da Qualidade da Energia Elétrica.

Vale ressaltar que este método pode ser facilmente incorporado em qualquer *software* de qualidade de energia elétrica, uma vez que os dados adquiridos de um SEP podem ser facilmente transportados para este *software*. O tratamento desses dados foi rápido e a resposta do método também é de fácil visualização e manipulação, o que facilita a construção de um amplo banco de dados.

Nota-se que ainda existem certos aspectos e generalizações que devem ser melhorados para que este método opere de forma mais automatizada e otimizada. Deste modo, futuras melhorias poderão ser implementadas.

5. Caracterização das Situações de Faltas

As faltas em sistemas elétricos de potência estão relacionadas a diversos fatores, tais como: problemas na isolação, contatos entre os cabos e rompimento dos mesmos, contato das linhas com árvores ou com qualquer outro agente externo, entre outros. As situações podem ser modeladas por uma resistência de falta entre a fase envolvida e a terra, ou mesmo entre uma fase e outra.

Nesta parte do trabalho, foram caracterizados todos os tipos de faltas que podem ocorrer em um sistema de potência. São estes: falta fase terra monofásica, fase terra bifásica, fase terra trifásica, fase-fase e fase-fase terra. A princípio, estas faltas foram aplicadas no sistema de distribuição de 13 barras e verificaram-se graficamente como as mesmas afetaram a forma de onda das tensões de cada fase do sistema em análise. Nesta parte do trabalho, verificou-se que não agregaria conhecimento, utilizar os demais sistemas modelados, uma vez que a caracterização das situações de faltas não varia de sistema para sistema. Vale ressaltar que para os casos simulados, a impedância de falta (Z_f) foi de 1 ohm, considerando-se que a inserção da situação foi a 40 ms, com a sua extinção (exclusão) a 100 ms. A inserção inicial caracteriza um ângulo de aproximadamente 45°.

5.1. Falta Fase Terra Monofásica

As faltas fase terra monofásicas são as que ocorrem com maior frequência em um sistema elétrico de distribuição, por isso a caracterização destas são de grande valia para o projeto em questão. Esta frequência de ocorrência é de 65%, para classe de tensões de 69 kV, conforme [15]. A Figura 40 mostra as tensões do barramento 632 antes, durante e depois da ocorrência de uma falta fase terra, envolvendo a fase A, no barramento 684.

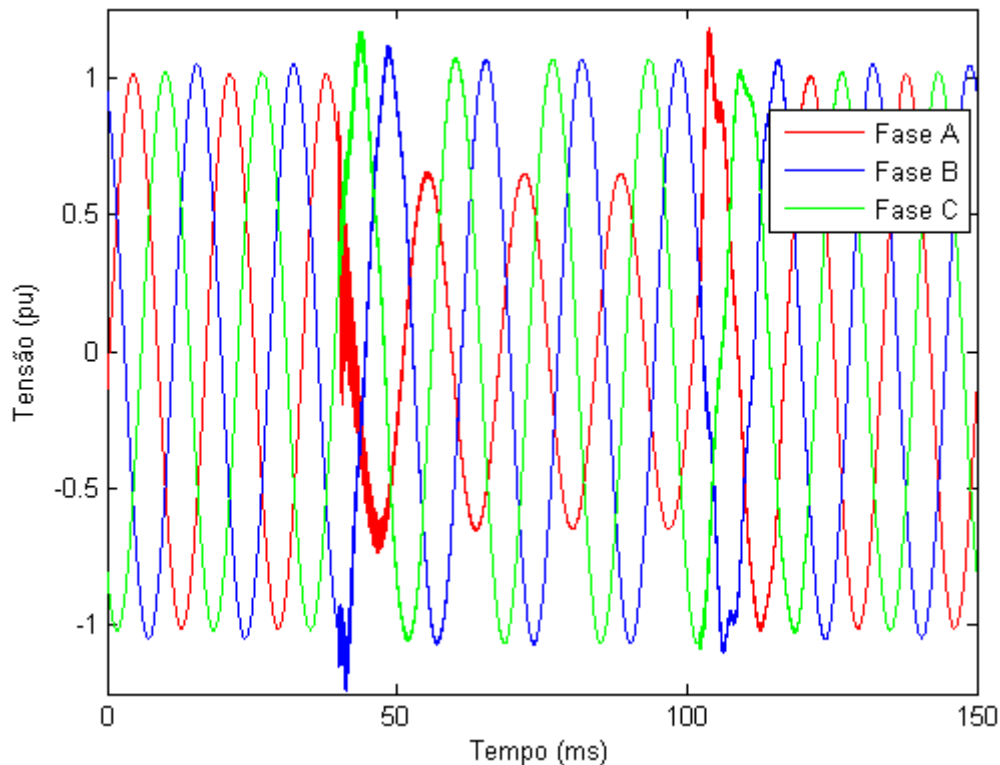


Figura 40. Falta fase terra monofásica.

Verifica-se que nos primeiros instantes a forma de onda da tensão na fase A está em regime. Posteriormente a aplicação da falta esta sofre um transitório de alta frequência e entra em regime caracterizando uma tensão de pós falta. Ao se eliminar a condição de falta o sistema volta novamente para a condição de regime nas mesmas condições iniciais. Vale ressaltar que a tensão de pós falta na fase A, que sofreu a falta, caiu para uma tensão remanescente de X p.u. (caracterizando um afundamento de tensão). Já a tensão nas outras fases teve um leve acréscimo (ilustrando uma elevação de tensão).

Com a finalidade de saber como o ângulo de inserção da falta afeta a tensão de pós falta do sistema para a falta fase terra monofásico, foi construída a Tabela 13. Esta foi construída variando-se o ângulo de inserção da falta e extraindo-se o nível de tensão de pós falta do sistema. A partir disso, foi observado que o ângulo de inserção não interfere de modo significativo nos níveis de tensão de regime de pós falta no caso das faltas fase terra. No entanto, pelos testes, notou-se que os níveis de transitórios eletromagnéticos mudam para os diferentes ângulos de inserção. Porém, a análise de tais transitórios não será foco de estudo para o momento.

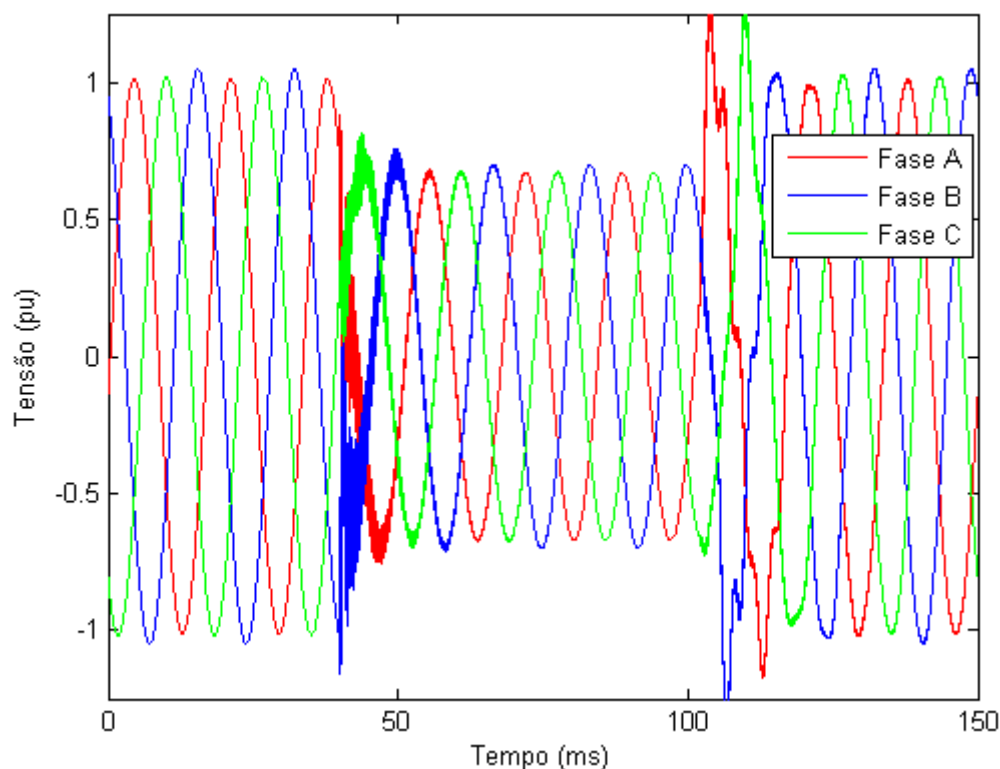
Tabela 13. Tensão de pós-falta para ângulos de inserção diferentes, na falta fase terra aplicada.

Ângulo de inserção	Tensão
0°	0,877
45°	0,877
90°	0,877
135°	0,877
180°	0,877
225°	0,877
270°	0,877
315°	0,877

5.2. Falta Trifásica

As faltas trifásicas com envolvimento da terra são as mais severas à rede de energia elétrica, pois a três fases estão envolvidas na falta. Porém, esta ocorre com menos frequência ao compará-la com as anteriores. A frequência de ocorrência é de 6%, para classe de tensão de 69 kV, conforme [15]. A Figura 41 representa as tensões do barramento 632 antes, durante e posterior a uma condição de falta trifásica com o envolvimento da terra no barramento 680.

Nota-se que para sistemas elétricos trifásicos equilibrados eletricamente, tanto importa se a falta é trifásica com o envolvimento da terra ou não.

**Figura 41. Falta trifásica com envolvimento da terra.**

Comparando as tensões do barramento 632 para a falta trifásica, com a falta fase terra monofásica, pode-se perceber que a primeira possui transitórios de alta frequência maiores. Fato que se justifica, pois as faltas trifásicas são as que mais mudam drasticamente a forma de onda da tensão de um sistema de potência.

5.3. Falta Fase-Fase

A falta fase-fase também possui grande importância nesse projeto, pois, diferentemente do que ocorre nos ST, nos SD as linhas ficam mais próximas uma das outras. A Figura 42 mostra as tensões no barramento 632 antes, durante e depois de ocorrer uma falta fase-fase (fases A e B) no barramento 680 do sistema de distribuição de 13 barras. Verificou-se que após esta falta, a fase sã do sistema teve uma leve queda no módulo da tensão. As demais fases que foram envolvidas na falta tiveram tensões de pós falta diferente entre si.

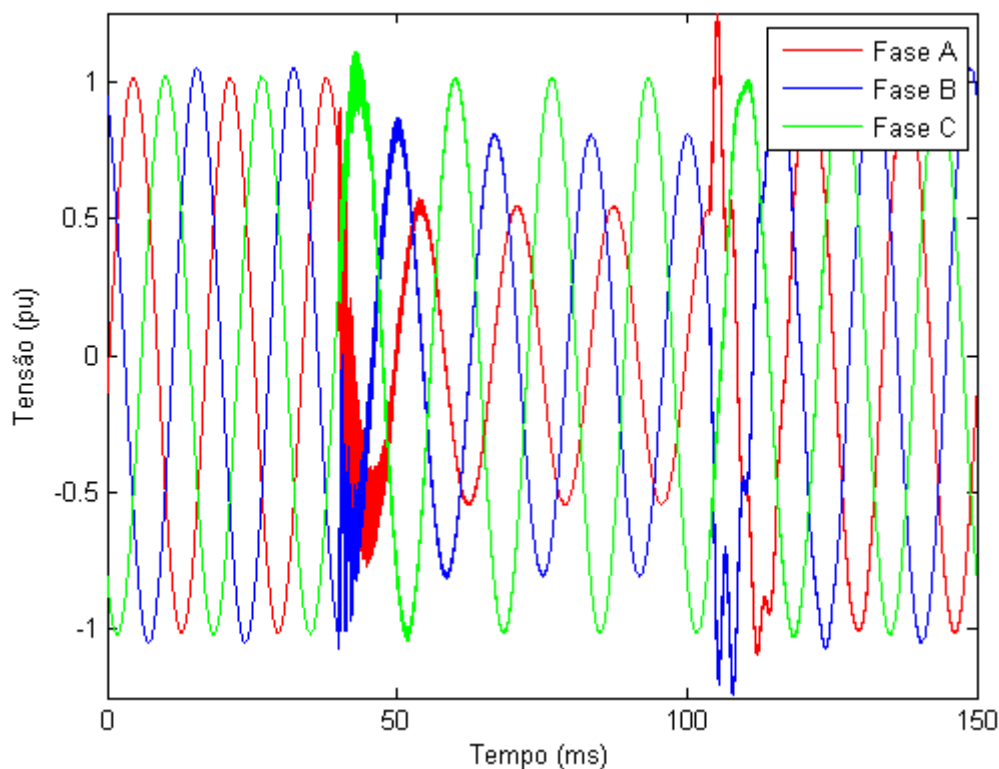


Figura 42. Falta fase-fase.

Para este tipo de falta, também foi estudado como o ângulo de inserção influencia a tensão de pós falta do sistema. Para tal, foi construída a Tabela 14 que mostra a variação de tensão de pós falta de um barramento qualquer depois de se aplicar uma falta com diferentes ângulos de inserção. Através desta tabela pode-se notar que este ângulo não resulta diferenças significativas na tensão de pós falta de regime, ocorrendo diferenças significativas apenas nos transitórios

eletromagnéticos.

Tabela 14. Tensão de pós-falta para ângulos de inserção diferentes na falta Fase-Fase.

Ângulo de inserção	Tensão		
	A	B	C
0°	0,557	0,750	0,987
90°	0,558	0,750	0,989
180°	0,557	0,751	0,988

5.4. Falta Fase-Fase Terra

A falta fase-fase terra possui uma frequência de ocorrência de 22%, para classe de tensão de 69 kV, conforme [15], sendo o segundo tipo de falta que mais ocorre em SD. Sua maior ocorrência está associada com o rompimento duplo dos cabos das linhas de distribuição. Para ilustrar tal situação, apresenta-se o gráfico da Figura 43, no qual, pode-se visualizar a forma de onda da tensão no barramento 632 após uma falta fase-fase terra envolvendo as fases B e C do barramento 680.

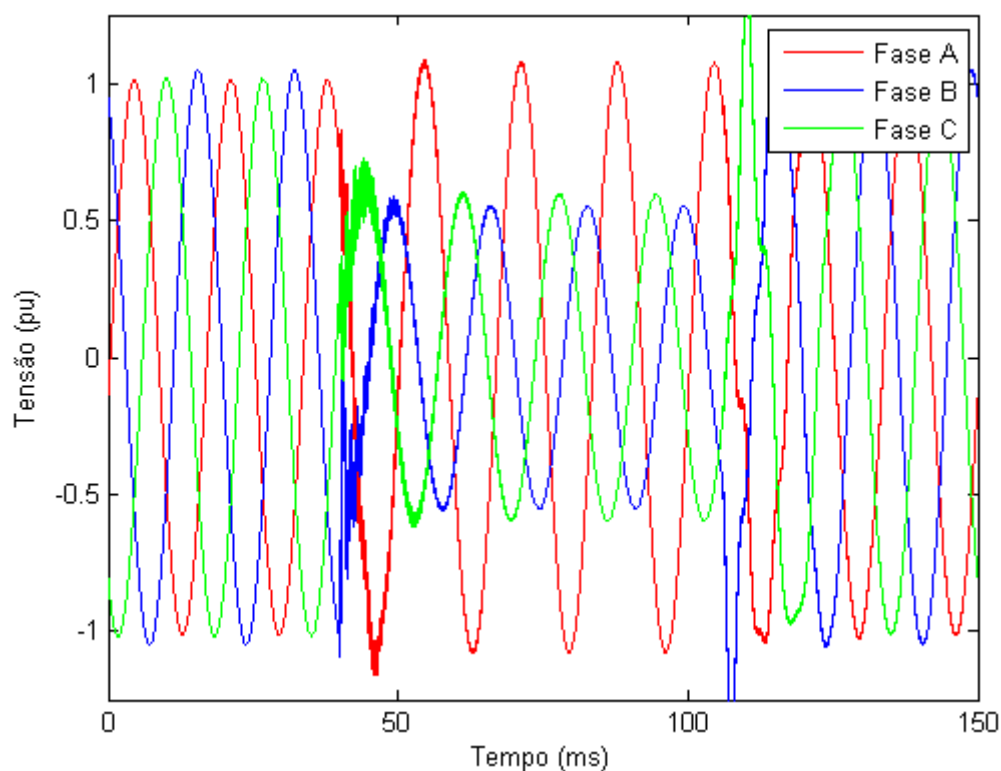


Figura 43. Falta Fase-Fase Terra.

Através do estudo prático desta falta, pode-se perceber que após a falta, a tensão na fase sã

do sistema aumenta um pouco e as fases envolvidas pela falta caem para uma tensão remanescente de pós falta (afundamento de tensão) correspondente a características da rede elétrica. O valor de aumento e decaimento dos níveis de tensão depende das características do sistema e da resistência de falta. Nos SEP simulados não foi possível verificar um aumento de uma fase até esta ser classificada como uma elevação de tensão, apenas utilizando resistência de falta.

Nota-se que não foi apresentado um vasto banco de dados sobre o estudo da caracterização das faltas, nem do comportamento da tensão remanescente em função do ângulo de incidência da falta. Contudo, percebe-se que as situações ilustrativas apresentadas nesta seção são recorrentes, e que em nenhum caso simulado, de muitos, o ângulo de incidência interferiu o valor da tensão remanescente.

6. Níveis de Tensão Pós Falta

Normalmente para estudos sobre QEE, desprezam-se os transitórios eletromagnéticos, pois estes duram poucos mili segundos (transitórios) e são de difícil análise. Portanto, os estudos e análises foram direcionados apenas às tensões de pós falta do sistema. Nas próximas subseções serão abordados os níveis de tensão de pós falta do sistema em um determinado barramento, após a aplicação de situações de defeitos (curtos-circuitos) em todos os demais barramentos. Este estudo se justifica caso haja a necessidade de monitorar uma carga crítica. Deste modo, podem-se encontrar os barramentos que mais influenciam esta carga crítica. Para complementar, também serão analisados os níveis de tensão de todos os barramentos depois de uma falta em um barramento em específico.

Vale ressaltar que 1 p.u. é a tensão de regime (sem falta, operação normal do SD) do barramento em análise. A impedância de falta foi modelada de duas formas, a primeira, como uma resistência desprezível, aproximadamente zero (resistência de falta franca) que representa o caso mais severo, e a outra, como uma resistência de 3 ohms. Sendo utilizado este último valor de resistência pelo fato de que deste modo, os níveis de tensão de pós falta, para a maioria das barras, ficariam no limite de ser considerado um afundamento de tensão. Representando assim, o caso mais brando. Por fim, os ângulos de inserção utilizados nas simulações de faltas dos próximos itens foram de 0° para a fase A, de 120° para a fase B e de 240° para a fase C, pois o sistema em análise possui sequência de fase negativa (cba).

6.1. Resultados para as Faltas Fase Terra Monofásicas Aplicadas

Nesta seção foram aplicadas situações de faltas envolvendo uma fase e a terra (monofásica) a cada um dos barramentos constituintes do SD de 13 barras em análise. Como resultado, foi verificado o nível de tensão de pós falta em p.u. nos barramentos 632 e 675. Os resultados dos níveis de tensão dos barramentos 632 e 675 para uma impedância de falta de 3 ohms estão expressos nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Nota-se que foi monitorado somente os barramentos 632 e 675, pelo fato do barramento 632 estar localizado na entrada do sistema (logo abaixo do transformador abaixador) e devido ao barramento 675 estar localizado em um ramo distante do transformador abaixador. Sendo assim, com o monitoramento de apenas estes dois barramentos, obtêm-se uma visão geral de como os níveis de tensão se comportariam nos demais barramentos.

Tabela 15. Tensão na barra 632 para falta fase terra monofásica, com resistência de falta de 3 ohms.

Falta($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 632			Falta($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 632		
Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C	Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C
650	A	0,959	1,000	1,000	671	A	0,847	0,994	1,032
	B	1,000	0,989	1,000		B	1,046	0,851	0,993
	C	1,000	1,000	0,989		C	0,998	1,037	0,844
632	A	0,862	0,986	1,040	692	A	0,847	0,994	1,032
	B	1,054	0,866	0,985		B	1,046	0,851	0,993
	C	0,989	1,043	0,863		C	0,998	1,037	0,844
633	A	0,860	0,988	1,038	675	A	0,851	0,995	1,031
	B	1,052	0,863	0,986		B	1,045	0,853	0,994
	C	0,991	1,041	0,861		C	0,999	1,036	0,847
634	A	0,998	1,000	1,001	684	A	0,849	0,995	1,031
	B	1,001	0,998	1,000		C	0,999	1,036	0,845
	C	1,000	1,001	0,998	611	C	0,999	1,034	0,846
645	B	1,051	0,866	0,987	652	A	0,853	1,001	1,024
	C	0,990	1,040	0,862	680	A	0,844	0,996	1,030
646	B	1,049	0,866	0,987		B	1,044	0,847	0,995
	C	0,991	1,039	0,862		C	1,000	1,035	0,841

Tabela 16. Tensão na barra 675 para falta fase terra monofásica, com resistência de falta de 3 ohms.

Falta($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 675			Falta($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 675		
Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C	Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C
650	A	0,958	1,004	1,000	671	A	0,799	0,989	1,069
	B	1,001	0,988	1,000		B	1,103	0,804	0,978
	C	1,000	1,000	0,989		C	0,992	1,075	0,801
632	A	0,858	0,992	1,038	692	A	0,799	0,989	1,069
	B	1,056	0,862	0,985		B	1,103	0,804	0,978
	C	0,992	1,040	0,865		C	0,992	1,075	0,801
633	A	0,855	0,994	1,036	675	A	0,783	0,995	1,067
	B	1,053	0,859	0,987		B	1,103	0,786	0,985
	C	0,993	1,038	0,862		C	0,998	1,074	0,784
634	A	0,998	1,000	1,001	684	A	0,800	0,990	1,066
	B	1,001	0,998	1,000		C	0,993	1,072	0,801
	C	1,000	1,001	0,998	611	C	0,994	1,070	0,801
645	B	1,052	0,862	0,987	652	A	0,804	0,990	1,065
	C	0,993	1,037	0,864	680	A	0,791	0,993	1,066
646	B	1,051	0,862	0,988		B	1,099	0,796	0,983
	C	0,994	1,036	0,864		C	0,995	1,071	0,794

Como pode ser observado através das tensões de pós falta dos barramentos em estudo, uma das fases do sistema, normalmente, apresentou um considerável afundamento de tensão. Já as outras tiveram apenas uma diminuição (afundamento) ou aumento de tensão (elevação). Como já era de se esperar, a fase que sofreu a falta foi aquela que sofreu o afundamento. Isso ocorre, pois após a falta há um grande aumento da corrente que, conseqüentemente, aumenta a queda de tensão nesta fase.

Nota-se também que para o barramento 632, uma falta no próprio barramento não foi a que causou o maior afundamento de tensão, isso ocorreu por características da impedância de falta (3 ohms) e do SD em análise. Isso ocorreu pelo fato da impedância da resistência de falta ser maior que a impedância equivalente do sistema com referência no próprio barramento 632. Tal situação é justificável, pois, utilizou-se uma resistência de falta alta, como mencionado anteriormente. Para o barramento 675 ocorreu o que era esperado, visto que uma falta no próprio barramento 675 foi a que causou o maior afundamento no mesmo. Normalmente é esperado que a impedância de falta fosse menor que o equivalente do sistema no barramento de análise.

Observa-se que a tensão de pós falta no barramento 632 mudou muito pouco para faltas com $Z_f = 3 \text{ ohms}$ nos barramentos 650 e 634, quando comparada com os demais barramentos. Isso ocorreu principalmente porque o barramento 650 está antes do regulador de tensão e este, de certa maneira, absorve o aumento de corrente causado pela falta no barramento 650, amenizando a queda de tensão no barramento 632. Já no barramento 634 não mudou muito porque uma impedância de falta de 3 ohm é mais relevante para tensões elevadas, e como este barramento está localizado depois de um transformador abaixador, uma resistência de falta de 3 ohm é menos considerável. Para que a mesma possua resistência compatível é necessário dividi-la pela relação de transformação do transformador ao quadrado.

Vale ressaltar que salvo as faltas nos barramentos 650 e 634, os afundamentos possuíram valores próximos, tanto para faltas no próprio barramento 632, como para barramentos mais distantes. Isso ocorreu pelo fato do sistema ser pequeno e consideravelmente ramificado.

Para verificar como a resistência de falta influi neste tipo de falta foram elaboradas mais duas tabelas, semelhantes às anteriores, porém, considerando uma resistência de falta praticamente nula. Estas são as Tabelas 17 e 18, onde a primeira mostra os níveis de tensão do barramento 632 e a última os níveis de tensão do barramento 675 para uma falta praticamente franca.

Tabela 17. Tensão na barra 632 para uma falta fase terra monofásica com resistência de falta próxima a zero (curto-circuito franco).

Falta ($Z_f \approx 0$ ohms)		Tensão 632			Falta ($Z_f \approx 0$ ohms)		Tensão 632		
Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C	Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C
650	A	0,005	0,982	0,976	671	A	0,270	1,050	1,003
	B	0,977	0,011	0,970		B	1,019	0,249	1,034
	C	0,969	0,980	0,003		C	1,031	1,017	0,258
632	A	0,000	1,072	1,027	692	A	0,270	1,050	1,003
	B	1,054	0,000	1,051		B	1,019	0,249	1,034
	C	1,045	1,036	0,000		C	1,031	1,017	0,258
633	A	0,101	1,060	1,021	675	A	0,301	1,044	1,003
	B	1,046	0,098	1,040		B	1,018	0,277	1,028
	C	1,036	1,030	0,101		C	1,026	1,017	0,289
634	A	0,359	1,033	1,006	684	A	0,315	1,044	1,001
	B	1,025	0,354	1,017		C	1,026	1,016	0,302
	C	1,014	1,015	0,358		C	1,021	1,015	0,343
645	B	1,049	0,131	1,035	652	A	0,341	1,038	1,002
	C	1,031	1,031	0,133		A	0,357	1,042	0,997
646	B	1,045	0,195	1,028	680	B	1,012	0,332	1,027
	C	1,024	1,029	0,197		C	1,025	1,010	0,345

Tabela 18. Tensão na barra 675 para uma falta fase terra monofásica com a resistência de falta próxima a zero (curto-circuito franco).

Falta ($Z_f \approx 0$ ohms)		Tensão 675			Falta ($Z_f \approx 0$ ohms)		Tensão 675		
Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C	Barra	Fase	Fase A	Fase B	Fase C
650	A	0,019	0,990	0,965	671	A	0,002	1,125	1,055
	B	0,978	0,026	0,973		B	1,111	0,003	1,095
	C	0,973	0,968	0,010		C	1,095	1,065	0,002
632	A	0,016	1,080	1,016	692	A	0,002	1,125	1,055
	B	1,054	0,019	1,054		B	1,111	0,003	1,095
	C	1,052	1,021	0,009		C	1,095	1,065	0,002
633	A	0,095	1,068	1,012	675	A	0,000	1,131	1,048
	B	1,046	0,101	1,043		B	1,105	0,000	1,102
	C	1,041	1,016	0,103		C	1,100	1,058	0,000
634	A	0,354	1,039	1,000	684	A	0,068	1,112	1,051
	B	1,025	0,356	1,019		C	1,083	1,062	0,066
	C	1,018	1,005	0,363		C	1,074	1,059	0,124
645	B	1,049	0,130	1,038	652	A	0,111	1,101	1,052
	C	1,036	1,018	0,141		A	0,122	1,109	1,041
646	B	1,045	0,194	1,030	680	B	1,092	0,114	1,080
	C	1,030	1,016	0,204		C	1,080	1,050	0,119

Através da análise dos curtos-circuitos sólidos (francos), pode-se notar que estes apresentaram níveis de afundamentos maiores do que com uma resistência de falta de 3 ohms. Nota-se também, que neste último caso pode ser verificado com maior clareza que os maiores níveis de queda da tensão ocorreram quando de uma situação de falta no mesmo barramento em análise, chegando neste caso a uma tensão de pós falta de zero p.u.

6.2. Resultados para as Falas Trifásicas Aplicadas

Pelo fato do sistema em análise ter alguns barramentos apenas com uma ou duas fases, foram aplicadas as faltas trifásicas apenas nos barramentos que possui as três fases. A Tabela 19 mostra os resultados da tensão de pós falta normalizada pela tensão em regime, dos barramentos 632 e 675, após a ocorrência de uma falta trifásica em todos os barramentos trifásicos.

Tabela 19. Falta trifásica.

Falta ($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 632			Tensão 675		
Barra	Fases	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
650	A, B e C	0,949	0,949	0,949	0,907	0,949	0,925
632	A, B e C	0,899	0,890	0,884	0,862	0,889	0,863
633	A, B e C	0,897	0,889	0,883	0,859	0,888	0,862
634	A, B e C	0,999	0,999	0,999	0,957	0,998	0,975
671	A, B e C	0,886	0,881	0,870	0,839	0,852	0,818
692	A, B e C	0,886	0,881	0,870	0,839	0,852	0,818
675	A, B e C	0,887	0,880	0,871	0,827	0,835	0,805
680	A, B e C	0,882	0,805	0,867	0,833	0,847	0,814

Nota-se que quanto mais perto a falta estiver do barramento 675, maior será o nível do afundamento de tensão, chegando ao máximo quando a falta é no próprio barramento 675. Vale ressaltar que os níveis dos afundamentos dos barramentos 632 e 675 são parecidos. Isso se justifica pelo fato do sistema em análise possuir poucos barramentos e ser consideravelmente ramificado.

Para melhor entendimento do sistema em análise, também foi aplicado uma falta no barramento 671 e foram verificados os níveis de tensão de pós falta de todos os outros barramentos. Os resultados encontrados estão expostos na Tabela 20.

Tabela 20. Níveis de tensão dos barramentos para uma falta trifásica.

Falta Trifásica na Barra 671 ($Z_f = 3\text{ohms}$)			
Barra	Fase A	Fase B	Fase C
650	0,930	0,936	0,933
632	0,886	0,881	0,870
633	0,886	0,881	0,870
634	0,886	0,881	0,870
645	-	0,881	0,870
646	-	0,881	0,870
671	0,876	0,852	0,838
692	0,876	0,852	0,838
675	0,876	0,852	0,838
684	0,876	-	0,838
611	-	-	0,838
652	0,876	-	-
680	0,876	0,852	0,838

A partir desta tabela, pode-se notar que com a ocorrência de uma falta trifásica no barramento 671, os maiores níveis de afundamento aconteceram no próprio barramento 671 e nos barramentos próximos a este. Observa-se também que os barramentos localizados abaixo da carga distribuída sofreram afundamentos de mesma intensidade, e os barramentos localizados acima da carga distribuída, e abaixo do regulador de tensão, também possuíram intensidade de afundamentos iguais. Isso mostra que uma carga distribuída ao longo de uma linha acentua a queda de tensão do sistema.

Por estar situado logo abaixo do transformador da subestação, o barramento 650 não apresentou afundamento de tensão, pois este barramento não é afetado de modo significativo com o aumento da corrente, já que está localizado entre o transformador da subestação e o regulador de tensão. Exceto o barramento 650, todos os outros apresentaram afundamento com níveis de tensão de pós falta parecidos. Isso ocorreu, pois o sistema é pequeno e consideravelmente ramificado.

Vale ressaltar que uma falta de impedância de falta de 3 ohms no barramento 634 não chega a provocar afundamentos nos barramentos 675 e 632 como visto na Tabela 17. Porém quando ocorre uma mesma falta nestes barramentos, estes provocam afundamento no barramento 634. Novamente isso é explicado pela impedância de falta não ser significativa em tensões baixas como é o caso do barramento 634 e ser significativa para altas tensões como no barramento 671, que provoca altas correntes e quedas ao longo da rede que fatalmente provoca afundamento em 634.

6.3. Resultados para as Faltas Fase-Fase Aplicadas.

Estudou-se o comportamento do sistema em análise frente às faltas fase-fase. Para tal, foi levantado um banco de dados da tensão de pós falta do barramento 675, para uma resistência de falta de 3 ohms, sendo as situações de faltas aplicadas em barramentos estratégicos. Estes barramentos foram escolhidos por estarem espalhados pelo SD, um em cada ramo, e para simplificar a apresentação dos resultados cobrindo a análise de todo o SD. Estes resultados estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Falta Fase-Fase para uma resistência de falta de 3 ohms.

Falta($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 675		
Barra	Fases	Fase A	Fase B	Fase C
632	A e B	0,642	0,975	0,965
	A e C	0,932	0,993	0,657
	B e C	0,977	0,673	0,961
646	B e C	0,974	0,703	0,948
671	A e B	0,581	0,946	0,960
	A e C	0,902	0,986	0,593
	B e C	0,989	0,610	0,936
675	A e B	0,567	0,932	0,959
	A e C	0,888	0,987	0,580
	B e C	0,989	0,599	0,925
684	A e C	0,898	0,987	0,606

Através dos resultados obtidos para falta fase-fase com resistência de falta de 3 ohms, pode-se perceber que ocorreram maiores afundamentos de tensão quando comparado com uma falta fase-terra com a mesma resistência de falta. Os resultados também mostraram que para as fases afetadas pela falta, uma possui maior afundamento que a outra. Já a fase sã do sistema apresentou uma leve queda de tensão. Novamente para faltas envolvendo as fases A e B, o maior afundamento ocorreu na fase A. Para faltas envolvendo as fases A e C, o maior afundamento foi na fase A, e para faltas envolvendo as fases B e C, o maior afundamento foi na fase C. Estas respostas do sistema estão relacionadas com as características do sistema em análise, como tensões desbalanceadas e sequência de fase.

Foi levantado outro banco de dados similar ao anterior, agora com um falta aproximadamente franca. Este resultado pode ser visualizado na Tabela 22.

Tabela 22. Falta fase-fase para uma resistência de falta aproximadamente nula.

Falta($Z_f \approx 0$ ohms)		Tensão 675		
Barra	Fases	Fase A	Fase B	Fase C
632	A e B	0,531	0,518	0,952
	A e C	0,512	0,961	0,507
	B e C	0,954	0,535	0,539
646	B e C	0,967	0,501	0,609
671	A e B	0,493	0,480	0,949
	A e C	0,470	0,979	0,464
	B e C	0,955	0,501	0,510
675	A e B	0,488	0,472	0,936
	A e C	0,461	0,976	0,459
	B e C	0,947	0,482	0,496
684	A e C	0,522	0,962	0,478

Para as faltas francas, visualiza-se que os níveis de tensão das fases afetadas do barramento 675 são menores quando as faltas ocorrem em barramentos anteriores ao analisado. Isso ocorre, pois após uma falta fase-fase praticamente franca, a corrente das fases afetadas circula em sua grande parte entre suas fases no ponto de falta, ou seja, ela vai de uma fase para a outra. Desta maneira, chega apenas uma pequena parcela da corrente nas fases afetadas dos barramentos mais distantes, diminuindo assim a tensão. Quando a falta ocorre no barramento em análise, aumenta-se a corrente ao longo do sistema, o que causa a queda observada.

6.4. Resultados para as Faltas Fase-Fase Terra Aplicadas

De maneira semelhante à realizada para as demais situações de faltas aplicadas, foi construída a Tabela 23. Esta mostra os níveis de tensão do barramento 675 após ocorrência de uma falta Fase-Fase Terra com resistência de falta de 3 ohms nos barramentos 632, 646, 671, 675 e 684, usando todas as combinações possíveis desta falta nestes barramentos.

Tabela 23. Falta fase-fase terra com resistência de falta de 3 ohms.

Falta ($Z_f = 3\text{ohms}$)		Tensão 675		
Barra	Fases	Fase A	Fase B	Fase C
632	A e B	0,615	0,792	0,991
	A e C	0,754	1,028	0,621
	B e C	1,014	0,633	0,779
646	B e C	1,009	0,672	0,774
671	A e B	0,570	0,702	1,013
	A e C	0,669	1,053	0,558
	B e C	1,060	0,577	0,689
675	A e B	0,551	0,679	1,016
	A e C	0,650	1,057	0,538
	B e C	1,064	0,558	0,669
684	A e C	0,671	1,052	0,572

Observa-se que este tipo de falta é uma composição das faltas fase-fase e fase terra. Geralmente a tensão de pós falta da fase sã teve um leve aumento e ocorreram sensíveis níveis de afundamento de tensão nas fases envolvidas na falta. Como dito anteriormente, estes níveis de afundamento estão associados com as tensões desbalanceadas e pela sequência de fase do sistema em análise.

Vale ressaltar que a falta fase-fase terra foi a que possuiu os maiores níveis de afundamento de tensão, para as fases envolvidas na falta, com a mesma resistência de falta. A falta fase-fase também apresentou altos índices de afundamentos, principalmente para uma das fases envolvidas na falta. As faltas fase terra possuíram valores de afundamentos próximos, mudando apenas o número de fases envolvidas.

Foram também aplicadas faltas fase-fase terra com resistência de falta praticamente nula. Os resultados dos níveis de tensão do barramento 675 para estas faltas em alguns barramentos estratégicos estão expostos na Tabela 24. Novamente, comenta-se que estes barramentos foram escolhidos por estarem espalhados pelo SD, um em cada ramo, e para simplificar a apresentação dos resultados cobrindo a análise de todo o SD.

Tabela 24. Falta fase-fase terra com resistência de falta praticamente franca.

Falta($Z_f \approx 0$ ohms)		Tensão 675		
Barra	Fases	Fase A	Fase B	Fase C
632	A e B	0,009	0,012	1,044
	A e C	0,007	1,096	0,006
	B e C	1,061	0,020	0,012
646	B e C	1,037	0,156	0,207
671	A e B	0,002	0,002	1,089
	A e C	0,001	1,149	0,001
	B e C	1,120	0,003	0,003
675	A e B	0,000	0,000	1,090
	A e C	0,000	1,148	0,000
	B e C	1,120	0,000	0,000
684	A e C	0,068	1,136	0,055

Nota-se que os níveis de afundamentos observado no barramento 675 para as faltas fase-fase terra com resistência de falta praticamente franca, possuíram valores de afundamentos altos nas fases faltosas, isso ocorreu pelo fato da presença da terra. Vale ressaltar que para este tipo de falta, algumas fases sãs do sistema apresentaram elevações de tensão.

Por fim foi levantado um banco de dados dos níveis de tensão de todos os barramentos após a ocorrência de uma falta fase-fase terra no barramento 671, com resistência de falta praticamente franca. Este resultado pode ser visualizado na Tabela 25.

Tabela 25. Níveis de tensão dos barramentos para uma falta fase-fase terra.

Falta($Z_f \approx 0$ ohms) Fase-Fase Terra no Barramento 671									
Barra	Falta Fases A e B			Falta Fases A e C			Falta Fases B e C		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
632	0,223	0,207	1,043	0,233	1,065	0,238	1,055	0,222	0,219
633	0,224	0,208	1,043	0,234	1,064	0,238	1,054	0,222	0,220
646	-	0,207	1,044	-	1,065	0,239	-	0,222	0,219
671	0,000	0,000	1,116	0,000	1,151	0,000	1,171	0,000	0,000
675	0,002	0,002	1,116	0,001	1,149	0,001	1,169	0,003	0,003
684	0,001	-	1,116	0,000	-	0,000	1,172	-	0,001
680	0,000	0,000	1,116	0,000	1,151	0,000	1,171	0,000	0,000

Através da Tabela 25, pode-se perceber que o nível de tensão do barramento 671 chegou à zero para as fases afetadas na falta e teve uma elevação de tensão para a fase sã. E que os barramentos que estão após este sofreram afundamentos e elevação semelhantes para as fases

afetas e para a fase sã, respectivamente. Os barramentos acima do barramento 671 (acima da carga distribuída) possuíram também, valores semelhantes. Fato que mais uma vez, justifica que a carga distribuída provoca grandes quedas de tensão no sistema em análise.

7. Análise e Apresentação das Possíveis Soluções para as VTCD e VTLD

A fim de complementar os estudos relacionados às VTCD e VTLD, foram estudadas possíveis soluções que venham a diminuir os níveis e a propagação dos afundamentos de tensão sobre um sistema de distribuição.

7.1. Métodos pesquisados

Com o intuito de mitigar os efeitos danosos e a propagação dos afundamentos de tensão sobre um barramento em específico, devem ser coletadas informações sobre as cargas conectadas no ponto de acoplamento comum, sobre a imunidade, ou sensibilidade das mesmas, e dados que reflitam a possibilidade de perda financeira devido a possíveis interrupções dos processos e taxas de ocorrência dos distúrbios manifestados.

Com base nestas informações, podem ser investigadas algumas possibilidades para reduzir o impacto e os custos decorrentes das interrupções operacionais. Estas possibilidades podem advir da análise e de alterações no próprio processo, da interação entre o processo e o sistema de distribuição e da rede elétrica (sistema de distribuição). Estas possibilidades serão brevemente apresentadas e comentadas no que segue.

7.1.1. Alterando as especificações dos equipamentos

Caso um consumidor conectado a rede de distribuição esteja com problemas relacionados à falta de QEE, em virtude das VTCD e VTLD, com o desligamento de equipamentos, ou mesmo com o mau funcionamento destes, uma solução aplicável poderá passar pela proteção individual de cada equipamento.

Porém, a proteção individual de equipamentos, na maioria das vezes, está restrita em mudar as suas especificações e controle dos mesmos. Em algumas das situações, a alteração das especificações do equipamento requer a intervenção do fabricante, restringindo sua implementação prática.

Vale ressaltar que antes de alterar o equipamento, é importante fazer um levantamento de todas as partes do processo que são vulneráveis ao afundamento de tensão manifestado. O fato que um dos equipamentos que faz parte do processo desligue primeiro, não implica que todos os outros também estejam imunes ao afundamento de tensão.

Existem algumas soluções para equipamentos específicos tais como, quando o disjuntor está sensível aos afundamentos. Uma opção é a substituição da bobina de mínima tensão instantânea, por uma bobina de mínima tensão temporizada, para eliminar os desligamentos intempestivos. Para as cargas mais sensíveis a afundamentos, como, por exemplo, o CLP

(Controlador Lógico Programável), balanças com células de carga e as impressoras industriais, uma solução é a instalação de *nobreaks* senoidais [17].

Estas alterações estão voltadas para o consumidor industrial, mas em certos casos, e dependendo do tipo de equipamento, também podem ser utilizadas por consumidores residenciais.

7.1.2. Alterações na Planta do Consumidor

Estas alterações objetivam manter a continuidade e a qualidade da energia elétrica apenas dentro da planta do consumidor. Uma solução é o uso de um Sistema de Energia Ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supply*) na forma, por exemplo, de um gerador a diesel auxiliar. Nesta configuração, no momento de uma VTCD ou VTLD, a planta se desconectará do SD automaticamente, e este passará a ser alimentado pelo gerador a diesel.

Existem outros sistemas que só protegem contra o afundamento de tensão, mas não contra interrupções. Exemplos destes sistemas são:

- Restaurador de Tensão Dinâmico (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*): um DVR somente soma a tensão perdida a tensão da rede [16].
- DySC: um DySC (*Dynamic Sag Correctors*) é um dispositivo de eletrônica de potência que contém uma série de corretores para a situação de afundamento de tensão, e um conversor em paralelo que provê imunidade contra este.
- Volante de Inércia: É um dispositivo acoplado juntamente ao eixo de um gerador e de um motor elétrico. O motor elétrico é alimentado pelo SD, que converte a energia elétrica em energia mecânica, suficiente para rodar o eixo do gerador e, conseqüentemente, do volante de inércia. Quando ocorrer um afundamento, o motor perderá potência para alimentar o gerador, porém, em um breve instante de tempo o volante de inércia conseguirá manter a rotação do eixo do gerador a uma rotação constante. Este dispositivo protege o equipamento contra todos os afundamentos de tensão, contanto que a inércia do volante possa suportar a carga. A maioria dos volantes pode alimentar a carga nominal durante 3 a 15s, o que é suficiente para proteger contra os afundamentos de tensão, mas não contra interrupções de energia [16].

Estas alterações são designadas principalmente para os consumidores industriais, uma vez que são aplicações que demandam um investimento relativamente alto.

7.1.3 Solução pela Concessionária: Modificações na Rede Elétrica

A imunização entre o processo e a rede pode ser aplicada em todas as situações, embora as possibilidades de imunização no processo, ou na rede, tenham que ser estudadas em separado.

Alterações do processo também podem ser evitadas alterando-se a rede. São duas as principais possibilidades. Aumentar a potência de geração, adicionando uma nova fonte de geração, ou aumentando a capacidade das fontes já existentes, e por uma reestruturação da

configuração da rede [16].

Por estas abordagens, basicamente, reduz-se a gravidade dos efeitos frente aos afundamentos de tensão, pois, alterando-se a topologia da rede, pode ser encontrado um ponto otimizado em que a impedância do sistema como um todo diminua. Deste modo, um curto-circuito será menos danoso a este sistema. O mesmo caso é encontrado quando os componentes do sistema são alterados para outros com impedância menor. Ou mesmo quando aumentado a potência do gerador, pois nesse caso, proporcionalmente, todos os outros equipamentos do sistema terão suas impedâncias diminuídas.

Estas alterações estão voltadas para as concessionárias de energia e para os agentes regulamentadores, quando existe a necessidade de deixar o sistema elétrico mais confiável.

7.1.4 Outras Soluções a Partir do Conceito de Redes Inteligentes

Este tipo de rede elétrica é uma das tendências para o futuro. Pela literatura consultada, pode-se apresentar o conceito de redes inteligentes caracterizando-as por [18]:

- Um fluxo de energia de forma bidirecional, com geração distribuída e integrada às redes a partir de unidades tradicionalmente consumidoras. Como por exemplo, um painel solar residencial gerando energia para a rede durante o dia, e consumindo energia da rede à noite.
- Um fluxo de informações de forma bidirecional, onde os dados e informações, adquiridos de forma maciça em campo, a partir de sensores instalados na rede, passam a alimentar os sistemas comerciais e técnicos.
- Informações sobre consumo, gastos, tarifa, status da rede e qualidade de serviço, dentre outras.

Neste cenário, a concessionária poderá aumentar a eficiência operacional, aumentando e fortalecendo o relacionamento com os clientes, otimizando investimentos, aumentando a confiabilidade e preparando-se para um ambiente com forte geração distribuída. Os clientes por sua vez poderão reduzir custos, ter modicidade tarifária, aumentar eficiência energética e ter acesso a novas fontes de energia [18], entre outras situações. Todas as partes envolvidas, clientes e concessionárias, terão a possibilidade de analisar e acompanhar os índices relativos à QEE em tempo real, exigindo um melhor fornecimento e condições para a energia elétrica.

As redes inteligentes destinam-se aos consumidores residenciais e as concessionárias, para que, através da flexibilidade e informações disponíveis, ambos os lados tenham vantagens.

8. Conclusões

Este projeto apresentou a modelagem de um sistema de transmissão e dois de distribuição, dispondo do *software* ATP, via a interface gráfica do *ATPDraw*. Foi verificado, por meio das simulações realizadas sobre os sistemas modelados, que os resultados obtidos são confiáveis e próximos aos fornecidos através dos métodos convencionais, como por exemplo, o do cálculo do fluxo de potência.

Pelas ilustrações apresentadas, constata-se que os resultados se mostraram muito próximos aos fornecidos pelo fluxo de carga apresentado nos arquivos de referência [3] e [4]. No entanto, em alguns dos barramentos, tanto dos SD como do ST, os erros entre os dois métodos foram maiores do que 2%. Isso se justifica pelo fato de que no método utilizado, algumas diferenças e/ou considerações foram adotadas sobre os componentes dos sistemas quando dos usados nas referências, que não foram fornecidos pelas mesmas. Estas considerações podem causar alguma diferença nos resultados, mas nada que tire o mérito e/ou prejudique a continuidade do trabalho.

Verificou-se também que para gerar um considerável banco de dados para um sistema de potência relativamente grande, uma opção viável e confiável seria a modelagem do sistema de maneira similar a realizada neste trabalho, pois esta modelagem gera uma resposta global e de fácil armazenamento. As simulações da maneira como apresentadas, são rápidas e eficientes. Através destas é possível realizar diversos estudos na área de qualidade da energia elétrica, ou mesmo em qualquer área da engenharia elétrica com cunho técnico-científico.

Nota-se que as respostas fornecidas pelas simulações via a interface do *ATPDraw* podem ser facilmente transportadas para outros *softwares* com ferramentas gráficas melhores e mais flexíveis, como o caso do *software* Matlab[®], usado neste trabalho. O que incentivou o desenvolvimento de uma código de programação no próprio Matlab[®], que fizesse um tratamento automatizado das oscilografias de tensão vinda do *ATPDraw*. Além disso, pode-se comentar que este foi importante por proporcionar um aprimoramento em técnicas de programação, bem como para o conhecimento e aplicação das ferramentas e Toolbox do *software* Matlab[®].

Vale comentar que este método de tratamento de oscilografias pode ser facilmente incorporado em qualquer *software* de qualidade de energia elétrica, uma vez que os dados adquiridos de um SEP podem ser facilmente transportados para o método. O tratamento desses dados foi rápido e a resposta do método também é de fácil visualização e manipulação, o que facilita a construção de um amplo banco de dados.

Para avanço nos estudos relacionados à qualidade da energia elétrica, mais precisamente dentro das VTCD e VTLD, foram caracterizados todos os tipos de faltas que podem ocorrer em um SEP, estudando também como o ângulo de inserção da falta influencia o SEP. Neste ponto foi notado que o ângulo de inserção não influencia os níveis de tensão remanescente, alterando apenas os transitórios de pré e pós falta.

Neste trabalho foi analisada a qualidade da energia elétrica do SD de 13 barras frente a diversas situações de faltas. Através dos testes, pode-se perceber que os níveis de tensão de pós-falta irão depender principalmente das características do sistema em análise, como do desequilíbrio de tensão e sequência de fase, da impedância de falta e tipo de falta.

Através da pesquisa realizada foi notado que para proteger uma carga contra os afundamentos de tensão existem três métodos principais, os quais são: alterar as especificações dos equipamentos; alterar a planta; e ou alterar as características do SEP. Foram pesquisadas também, as características das chamadas redes elétricas inteligentes (*Smart Grid*), mostrando como esta pode trazer melhora para a QEE.

Por fim, vale comentar que o trabalho de conclusão de curso nos moldes apresentado foi de grande importância para o crescimento intelectual na área da Qualidade da Energia Elétrica, mas principalmente no âmbito de compreender como que um SEP se comporta quando ocorre um distúrbio neste, como as VTCD e VTLD são classificadas e entender o que deve ser feito para diminuir os efeitos danosos destes distúrbios.

9. Referências Bibliográficas

- [1] MEHL, E. L. M. **Apostila de curso para pós-graduação em Engenharia Elétrica na UFPR**. Curitiba – PR, 2002.
- [2] COURY, D. V, OLESKOVICZ, M, GEOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. São Carlo – SP, 2007.
- [3] IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Site ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6169750, acessado em agosto de 2010.
- [4] IEEE. Site www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index, acessado em janeiro de 2011.
- [5] OLESKOVICZ, M. **Apostila de Qualidade da Energia Elétrica**. São Carlos – SP, [s.n], 2007.
- [6] CAMPICI, P, VALE, M. **Afundamentos de Tensão no Contexto da Expansão dos Sistemas Elétricos: Proposta de Índices Considerando Dados do Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas**, UFMG, Fevereiro de 2009.
- [7] RULE BOOK – ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM. [S.1] Leuven EMPT Center, 1987.
- [8] FILHO, J. A, PERREIRA, M. P. **Curso básico sobre a utilização do ATP**. Revisão de novembro de 1996.
- [9] PRIKLER, L. **ATP Draw for Windows 3.5**. Budapest, outubro de 2002
- [10] STEVESON JR, W. **Elemento de Análise Estática de Sistemas de Potência**. 2ª edição, São Paulo: Editora Makron Books, 1986. 458p.
- [11] KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. CRC Press, 2002.
- [12] Arruda, C. **Apostila de Representação de Sistemas de Potência**, UFG, Março de 2006.

- [13] Help of Matlab. **MathWork Learn more about Matlab**. MATLAB 7.10.0 (R2010a)
- [14] PRIKLER, L. **ATP Draw for Windows 3.5**. Budapest, outubro de 2002
- [15] CARVALHO, P. L. **Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão**. Dissertação de Mestrado EFEI-Itajubá, dezembro 1997.
- [16] DIPL-ING MARCEL DIDDEN. **DISTÚRBIOS DE TENSÃO – Afundamentos de Tensão em Processos Contínuos – Estudo de Caso**. KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, junho 2003.
- [17] Maia, R. M. **ESTUDO DE CASO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL DA MOINHOS VERA CRUZ**. Belo Horizonte, Julho de 2008.
- [18] Guimarães, D. S. **Sistemas que Compõem o Smart Grid**. Março de 2011.