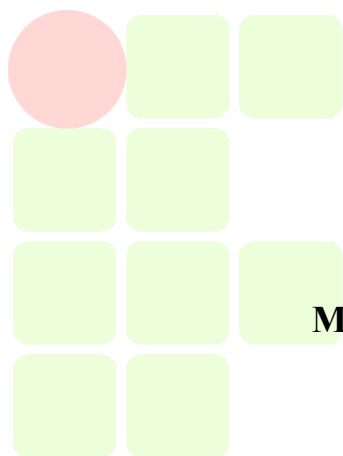


**INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA EM ELETRO-ELETRÔNICA  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA  
PROJETO DE FIM DE CURSO**

**AVALIAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PARA O  
PLANEJAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE  
SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E FERRAMENTA DE  
MONITORAÇÃO.**



**MOISÉS ARAUJO OLIVEIRA**

**EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
BAHIA**

**SALVADOR-BA  
MARÇO/2014**

**MOISÉS ARAUJO OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PARA O  
PLANEJAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE  
SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E FERRAMENTA DE  
MONITORAÇÃO.**

Parte manuscrita do Projeto de Fim de Curso do aluno Moisés Araujo Oliveira, apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica do Instituto Federal da Bahia, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**SALVADOR – BA  
MARÇO/2014**

**MOISÉS ARAUJO OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PARA O  
PLANEJAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO ATRAVÉS DE  
SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E FERRAMENTA DE  
MONITORAÇÃO.**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof., Eng.  
Juan Jose Jorge Prado Franco  
Orientador**

---

**Prof., Eng.  
Antônio Luís Santos Moisés  
Examinador**

---

**Prof. MsC.  
Juarez Caetano Silva  
Examinador**

**Salvador-BA, 10 Março de 2014**

## **DEDICATÓRIA**

Ao nosso Senhor Jesus Cristo que entregou a sua vida por nós.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e meus familiares por terem me dado suporte, amor, ter compreendido minha ausência em alguns momentos, e sempre incentivando para alcançar esse momento.

Ao IFBA pela organização do curso de Engenharia Industrial Elétrica.

Ao meu orientador Juan Franco pelas observações importantes e o conhecimento passado durante o trabalho.

Aos colegas e amigos que fiz durante o curso e colaboraram fortemente durante a graduação com palavras de incentivo: Emílio Abreu, Tatiana Barreto, Tuanny Cajuhi, Ana Ribeiro, Vitor Reis, Perivaldo Pereira, Murilo Moreira, Rafael Casaes, Eduardo Carvalho, Murilo Silva.

A todos os amigos e familiares mais próximos que colaboraram com momentos de alegria e apoiaram em situações mais difíceis como Lucas, Margarete, Washington, Lanny.

Ao Grupo de Pesquisas em Ensaios Não Destrutivos, o GPEND que foi o primeiro local que abriu as portas para o começo dos meus trabalhos no ramo das pesquisas científicas. Em especial à Professor Cláudia líder do grupo pelas palavras de estímulo, e aos colegas Igor Ribeiro, Ygor Tadeu, Teodorio Oliveira e Ana Lorena, pelas contribuições e momento de descontração.

A TECNOQUADROS por ter aberto as portas para a primeira experiência no ramo da engenharia. Aos colegas e amigos que fiz lá como Sidnei meu supervisor à época, e os demais.

A NORSUL Engenharia e Consultoria por permitir e colaborar diretamente com a realização do trabalho disponibilizando o equipamento, as amostras de medição e a infraestrutura necessária para a execução dos trabalhos.

## **RESUMO**

Esta monografia analisa a propagação dos afundamentos de tensão na rede de distribuição englobando uma subestação e equipamento de qualidade de energia adequado como piloto de uma concessionária, confrontando com a previsão dos distúrbios simulados e apresentar uma ferramenta com metodologia de análise e soluções para a resolução dos problemas dos afundamentos de tensão.

Foram realizadas simulações para eventos de falta com programa de análise de transientes eletromagnéticos ATP com o uso da ferramenta gráfica para determinação dos tipos de afundamentos de tensão possíveis de obter no ponto de medição. Os valores recolhidos do medidor de qualidade de energia permitiram por meio dos índices propostos sua comparação com as simulações obtendo uma forte correlação entre os resultados.

A ferramenta de avaliação proposta em desenvolvimento se propõe a analisar e apresentar soluções pontuais para as equipes de operação, planejamento e mercado da empresa distribuidora de energia.

## **ABSTRACT**

This monograph examines the propagation of voltage sags on the distribution network encompassing a substation and quality appropriate power equipment as a pilot of a dealership , comparing with the prediction of the simulated disturbances and provide a tool with analysis methodology and solutions for resolving problems of voltage dips .

Fault event simulations with ATP transient electromagnetic analysis using graphical tool for determining types of voltage sags possible to obtain the point of measurement program were conducted. The amounts paid meter power quality enabled through its proposed rates compared with simulations obtained a strong correlation between the results .

The assessment tool development proposal aims to analyze and present specific solutions for dealership operation, planning and market power groups.

## SUMÁRIO

|   |            |
|---|------------|
| <b>DEDICATÓRIA.....</b>   | <b>I</b>   |
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>   | <b>II</b>  |
| <b>RESUMO .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>SUMÁRIO .....</b>  | <b>V</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>  | <b>VII</b> |
| <b>LISTA DE TABELA .....</b>  | <b>IX</b>  |
| <b>GLOSSÁRIO.....</b>   | <b>X</b>   |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                   | <b>2</b>   |
| 2.1 Definições dos Afundamentos de Tensão.....                        | 2          |
| 2.2 Origens dos Afundamentos.....                                     | 4          |
| 2.3 Variáveis de Influência .....                                     | 5          |
| 2.4 Caracterização dos Afundamentos de Tensão .....                   | 7          |
| 2.4.1 Faltas Monofásicas .....  | 8          |
| 2.4.2 Faltas Trifásicas.....  | 8          |
| 2.4.3 Tipos dos Afundamentos.....                                     | 9          |
| 2.5 Sensibilidade dos equipamentos .....                              | 10         |
| <b>3 PLANEJAMENTO DO SISTEMA CONSIDERANDO OS</b>                      |            |
| <b>AFUNDAMENTOS DE TENSÃO .....</b>                                   | <b>13</b>  |
| 3.1 Índices de amplitude e duração dos afundamentos.....              | 13         |
| 3.2 Índices de frequência dos afundamentos .....                      | 14         |
| 3.3 Modelagem em ATPDraw para simular os eventos .....                | 14         |
| 3.4 Escolha dos pontos de medição .....                               | 15         |
| 3.5 Ferramenta para análise dos afundamentos de tensão .....          | 17         |
| <b>4 ESTUDO DE CASO.....</b>  | <b>19</b>  |
| 4.1 Medição Sistema Elétrico .....                                    | 19         |
| 4.2 Sistema Simulado.....   | 25         |
| 4.3 Proposta de Metodologia aplicada com Ferramenta de Avaliação..... | 29         |



|  |           |
|--|-----------|
| 4.3.1 Módulo de Entrada .....                        | 29        |
| 4.3.2 Módulo de Análise dos Eventos .....            | 30        |
| <b>5 RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>                  | <b>31</b> |
| 5.1 Análise das simulações para os indicadores ..... | 31        |
| 5.2 Análise das medições com os indicadores .....    | 34        |
| 5.3 Módulos de avaliação dos afundamentos .....      | 41        |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>                            | <b>45</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>               | <b>46</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Afundamento de tensão monofásico. ....  | 8  |
| Figura 2 – Afundamento de tensão – Método da agregação de fases.....   | 9  |
| Figura 3 – Classificação ABC para os tipos de afundamentos de tensão.....                                      | 10 |
| Figura 4 – Curva de suportabilidade CBEMA .....  | 12 |
| Figura 5 - Curva de suportabilidade ITIC.....  | 12 |
| Figura 6 – Mapa Eletrogeográfico de Teresina – Eletrobras Distribuição Piauí.....                              | 20 |
| Figura 7 – Diagrama Unifilar Sistema Elétrico Regional Teresina.....   | 21 |
| Figura 8 – Diagrama Unifilar Subestação Renascença. ....   | 22 |
| Figura 9 – Analisador de Qualidade de Energia IMS PowerNET PQ-600 .....  | 23 |
| Figura 10 – Medidor instalado na saída do alimentador instalado no interior do cubículo do disjuntor 11C7..... | 24 |
| Figura 11 – Circuito Simulado em ATPDraw. ....   | 29 |
| Figura 12 – Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta trifásica.....              | 31 |
| Figura 13 - Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta monofásica. ....            | 32 |
| Figura 14 - Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta bifásica a terra. ....      | 33 |
| Figura 15 - Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta bifásica. ....              | 33 |
| Figura 16 – Oscilografia para afundamento monofásico no alimentador AL01-C07 .....                             | 36 |
| Figura 17 - Oscilografia para afundamento bifásico no alimentador AL01-C07.....                                | 37 |
| Figura 18 – Oscilografia para afundamento bifásico à terra no alimentador AL01-C07 .....                       | 38 |
| Figura 19 - Oscilografia para afundamento trifásico no alimentador AL01-C07 .....                              | 39 |
| Figura 20 – Histograma das medições de afundamento de tensão registradas em termos de amplitude.....           | 40 |
| Figura 21 – Comparação estatística entre as medições e eventos simulados .....                                 | 41 |
| Figura 22 - Telas Principal de Acesso do software nerSAG. ....   | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23 – Tela inicial de Entrada do nerSAG. ....                               | 42 |
| Figura 24 – Tela de importação das medições.....                                  | 43 |
| Figura 25 – Área de cadastro dos parâmetros da subestação .....                   | 44 |
| Figura 26 – Tela com histogramas gerados para classificação dos afundamentos..... | 44 |

## **LISTA DE TABELA**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Classificação dos Afundamentos de Tensão segundo PRODIST. ....                                  | 3  |
| Tabela 2 - Período mínimo de monitoração para uma dada precisão.....                                       | 4  |
| Tabela 3 - Valor da tensão característica para os tipos de falta.....                                      | 14 |
| Tabela 4 – Parâmetros Fornecidos para a Simulação .....  | 25 |
| Tabela 5 – Tabela resumo com faixas de amplitude e duração dos eventos simulados<br>dos afundamentos ..... | 34 |
| Tabela 6 – Registros obtidos para o alimentador AL01-C07 da SE Renascença.....                             | 35 |

## GLOSSÁRIO

AMT - Afundamento Momentâneo de Tensão

ATT - Afundamento Temporário de Tensão

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CBEMA - *Computer & Business Equipment Manufacturer's Association*

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ITIC - *Information Technology Industry Council*

LD – Linha de Distribuição

LT - Linha de Transmissão

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

P&D - Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento

PRODIST - Procedimentos de Distribuição

p.u. – Por Unidade

QEE - Qualidade da Energia Elétrica

SE - Subestação

SEP - Sistema Elétrico de Potência

SIN - Sistema Interligado Nacional

RMS - *Root Mean Square* (valor eficaz)

V - Volts

VTCD - Variação de Tensão de Curta Duração

## 1 INTRODUÇÃO

A questão da Qualidade de Energia constitui-se em problema econômico e social para os consumidores de energia elétrica, para as Concessionárias e para a sociedade em geral. Apesar de no passado terem sido relegadas a um segundo plano, atualmente as variações de tensão de curta duração, especialmente os afundamento de tensão, são responsáveis por grandes prejuízos às diversas classes de consumidores, principalmente industriais e comerciais.

O maior impacto que agora se verifica deve-se, sobretudo, à maior complexidade e sensibilidade das cargas atuais, bem como ao crescente padrão de exigências dos clientes das Concessionárias de energia.

Os problemas causados pelos afundamentos de tensão possuem efeitos diversos, que vão de consequências relativamente simples até a parada de processos produtivos, com reflexos na qualidade da energia fornecida. Nos sistemas elétricos, os curtos-circuitos, partida de motores, chaveamento de cargas etc. provocam distúrbios que afetam áreas vulneráveis, a partir do ponto em que ocorreu o evento. O excesso de religamentos automáticos, além de provocar distúrbios, encurta a vida dos transformadores de potência das subestações, dos isolamentos dos cabos etc.

Os projetos inadequados de subestações de consumidores industriais e comerciais aumentam o número de interrupções desses consumidores. Também podem ocorrer interrupções em instalações elétricas em geral, que tenham problemas de projeto, construção e manutenção.

A consequência para as Concessionárias de energia elétrica é o desgaste de sua imagem empresarial, custos com o ressarcimento de danos a instalações e equipamentos de consumidores. Esses fatos impõem às empresas a necessidade de orientar esforços para a implantação de programas de diagnóstico e controle da qualidade de energia fornecida.

O objetivo deste trabalho é apresentar a avaliação do sistema elétrico de uma Concessionária perante os eventos de afundamentos de tensão de curta duração a partir da comparação de dados simulados com o programa de análise de transitórios eletromagnéticos ATP através de sua ferramenta gráfica ATPDraw e a realização de

medições com equipamentos de qualidade de energia com a finalidade de propor um ferramenta com alternativas ao planejamento e expansão do sistema a fim de minimizar a propagação dos eventos de afundamentos, como parte do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Eletrobrás Distribuição Piauí e Eletrobrás Distribuição Roraima denominado “Afundamentos de Tensão no Sistema Elétrico de Concessionárias, com Medições, Avaliação Estatística, Modelagem e Reflexos na Qualidade da Energia”.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Definições dos Afundamentos de Tensão**

Uma fonte de fornecimento de energia ideal é caracterizada por estar sempre disponível, dentro das tolerâncias de tensão e frequência, e por apresentar forma de onda senoidal pura e livre de interferências. A tolerância quanto ao desvio do valor ideal depende da regulação vigente (identificadas como Competências Vitais) e das características dos consumidores denominados especiais: tipo de equipamento instalado, aplicação e percepções das necessidades do consumidor final [2,3, 4].

A correta caracterização dos distúrbios requer um entendimento de suas definições básicas e do seu possível impacto nos equipamentos conectados à rede elétrica. A detecção de distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é o primeiro passo para uma correta análise do problema, normalmente realizado pelos registradores de qualimetria e oscilografia [5,6,7].

Para estabelecer os limites mínimos aceitáveis, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com objetivo de orientar procedimentos relativos à QEE, sobretudo a partir da caracterização de fenômenos, definiu terminologias, parâmetros, valores de referência, indicadores, padrões e responsabilidades, com os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [1,2].

O Sistema Elétrico está sujeito a diferentes distúrbios de QEE dentre os quais as Variações de Tensão de Curta Duração denominadas VTCD têm se mostrado um dos mais frequentes. As VTCD's que incluem os afundamentos de tensão têm impactos potenciais significativos.

Considerando as definições de duração e amplitude, as VTCDs são classificadas como momentâneas para os eventos com duração inferior ou igual a 3 (três) segundos e temporárias para os eventos com duração superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto.

A Tabela 1 resume os valores de classificação segundo o PRODIST Manual 8 - Qualidade da Energia Elétrica [1].

Tabela 1 - Classificação dos Afundamentos de Tensão segundo PRODIST.

| Denominação                            | Duração da Variação   | Tensão (RMS) em relação à tensão de referência |
|--|---|--|
| Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT) | Superior ou igual a um ciclo (16,67 ms em 60Hz) e inferior ou igual a três segundos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.  |
| Afundamento Temporário de Tensão (ATT) | Superior a três segundos e inferior a três minutos                                  | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.  |

O IEEE, através da Norma IEEE 1159 - 1995 [8] que avalia dos fenômenos de qualidade de energia elétrica define afundamento de tensão como sendo a redução do valor RMS da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 p.u., durante um período de tempo entre 0,5 ciclo e 60 s. De acordo com o IEEE, a intensidade do afundamento é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio. Um evento cuja intensidade é inferior a 0,10 p.u. é classificado como interrupção de tensão pelo IEEE. O IEEE classifica os afundamentos de tensão, segundo a sua duração, em três grupos:

- Instantâneos: entre  $\frac{1}{2}$  ciclo e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

A IEC 61000-2-8 avalia a intensidade do afundamento de tensão a partir da queda do valor RMS de tensão. Tal classificação aponta como afundamento de tensão um evento onde ocorre uma diminuição do valor RMS da tensão entre 0,10 e 0,99 p.u., durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclos e alguns segundos. Distúrbios com queda de tensão acima de 0,99 p.u., o que equivale a tensões remanescentes abaixo de 0,01 p.u., são considerados pela IEC como interrupções.



## 2.2 Origens dos Afundamentos

Os afundamentos de tensão dentro do sistema elétrico podem ser ocasionados por diferentes fatores entre os quais os eventos de curto-circuito monofásicos (com maior ocorrência), bifásicos e trifásicos na rede elétrica, a partida de motores de grande porte, a energização de transformadores e problemas de perdas na geração.

Para o caso dos afundamentos de tensão trifásicos, outros parâmetros devem ser agrupados, entre eles a assimetria e o desequilíbrio. Adicionalmente, o comportamento da forma de onda também pode ser empregado para caracterizar tanto os afundamentos de tensão monofásicos e trifásicos.

A Tabela 2 mostra o resultado de um estudo feito a respeito do tempo necessário para monitoração de afundamento de tensão [8].

Tabela 2 - Período mínimo de monitoração para uma dada precisão

| Frequência do evento | 50% de precisão | 90% de precisão |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| 1 por dia            | 2 semanas       | 1 ano           |
| 1 por semana         | 4 meses         | 7 anos          |
| 1 por mês            | 1 ano           | 30 anos         |
| 1 por ano            | 16 anos         | 400 anos        |

O perfil da tensão durante um afundamento pode indicar a origem do mesmo. Para uma partida de um motor normalmente tem dois picos, um de baixa magnitude, ao início, devido à conexão de circuito indutivo, seguida de uma reta quase constante até que chega a uma velocidade de regime e a magnitude aumenta rapidamente.

No caso da energização de transformadores, o afundamento de tensão máximo apresenta-se em uma fase devido às condições de magnetismo remanescente e ângulo de conexão. No registro de tensão, nota-se a queda brusca e a recuperação suave. Sua característica de afundamento é de forma de onda deformada e unidirecional com atenuação exponencial [8].

O salto de ângulo de fase (em inglês *phase shift*) é caracterizado pela diferença entre os ângulos de fase das tensões fundamentais existentes antes e durante o afundamento de tensão [8,13].

### 2.3 Variáveis de Influência

A avaliação do afundamento de tensão pode ser considerada um trabalho de grande complexidade, pois abrange diversos fatores que interferem nas características do distúrbio e sua frequência de ocorrência. A seguir são apresentados alguns dos fatores indicados:

- Tipo de falta;
- Localização da falta;
- Tensão pré-falta;
- Índice cerâmico da região, ação dos ventos, contaminação de isoladores e acidentes;
- Conexão e quantidade de transformadores entre o ponto de falta e a carga;
- Conexão da carga e tipo de alimentação da carga (monofásica, bifásica, trifásica);
- Desempenho do sistema de proteção;
- Existência de sistema de religamento;
- Taxa de falha das linhas de transmissão e distribuição;
- Intensidade da descarga atmosférica que origina a falta;
- Potência de curto circuito do sistema e nível de interconexão.

As faltas no sistema elétrico podem ser: trifásicas (FFF), trifásicas à terra (FFFT), fase-fase (FF), fase-fase-terra (FFT), e fase-terra (FT). As faltas trifásicas e trifásicas à terra são simétricas e produzem afundamentos de tensão também simétricos. Esses afundamentos de tensão são mais severos, porém com menor frequência de ocorrência quando comparadas com as demais faltas. As faltas fase-fase, fase-fase-terra e, principalmente, as fase-terra, apresentam as maiores frequências de ocorrência, resultando em afundamentos de tensão menos severos, desequilibrados e assimétricos.

A localização da falta no sistema elétrico influencia expressivamente o impacto dos afundamentos de tensão sobre os consumidores. As faltas no sistema de transmissão e subtransmissão afetam um número maior de consumidores do que as faltas no sistema de distribuição, devido às suas características, que são normalmente malhados e abrangem uma grande extensão geográfica. Os sistemas de distribuição são mais concentrados geograficamente e possuem comumente configuração radial, sendo que curtos-circuitos nos ramais de uma subestação de distribuição causam impactos somente nos consumidores alimentados pelos ramais adjacentes e, dificilmente, provocarão afundamentos de tensão expressivos no sistema de transmissão, principalmente naqueles dotados de alta capacidade de curto-circuito.

A tensão pré-falta nos estudos de curto-circuito é normalmente adotada igual a 1,0 p.u.. Mas, em função da curva de carga do sistema, esta definição pode não ser verdadeira, provocando erros [9, 10]. Assim, a consideração das tensões pré-falta é muito importante na avaliação de sistemas de distribuição, onde os valores das tensões podem ser muito diferentes de 1 p.u..

O tipo de conexão dos transformadores existentes entre o ponto de falta e o barramento do consumidor irá influenciar os atributos do distúrbio percebido pela carga na avaliação e cálculo dos afundamentos de tensão. Podemos ter três grupos:

- Primeira classe de transformadores cujas tensões nas bobinas em um dos enrolamentos é função da diferença fasorial entre duas tensões aplicadas nas bobinas do outro enrolamento. Filtram a componente de sequência zero da tensão de frequência fundamental e introduzem defasamento angular nas componentes de sequência positiva e negativa. São os transformadores com conexão  $Y-\Delta$ ,  $\Delta-Y$ ,  $Y_{\text{aterrado}}-\Delta$ ,  $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$ .
- Segunda classe de transformadores que filtram as componentes de sequência zero da tensão de frequência fundamental e, são fabricados de modo a não introduzir defasamento angular nas demais sequências. São os transformadores com conexão  $Y-Y$ ,  $\Delta-\Delta$ ,  $Y_{\text{aterrado}}-Y$ ,  $Y-Y_{\text{aterrado}}$ .
- Terceira classe de transformadores que não filtram as componentes de sequência zero da tensão de frequência fundamental e, são fabricados de modo

a não introduzir defasamento angular nas demais sequências. São os transformadores com conexão  $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}, Y_{\text{aterrado}}-\Delta-Y_{\text{aterrado}}$ .

O desempenho do sistema de proteção interfere na duração dos distúrbios do afundamento de tensão. O tempo de sensibilização e de atuação dos relés adicionado ao tempo de abertura e extinção de arco dos disjuntores caracteriza a proteção. O tempo de atuação dos relés é função de suas características de resposta (distância, tempo dependente e tempo definido), da filosofia e da seletividade desejada. O tempo de abertura e de extinção da corrente de curto-circuito dos disjuntores é função das propriedades construtivas destes equipamentos [22].

A existência de sistema de religamento no sistema de proteção e os tipos de curtos-circuitos no sistema elétrico estão diretamente ligados à frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão. Vários equipamentos e processos industriais desligam durante a ocorrência do primeiro evento registrado [28, 29].

Uma vez parado, os eventos subsequentes não causam efeito sobre a carga e por conta disso, a contabilização de todos os eventos, provoca um erro estatístico na avaliação do desempenho do suprimento da Concessionária, sobrestimando o número de eventos de afundamentos de tensão.

A agregação temporal com a janela de tempo pré-definida como recomendado pelo PRODIST com o intervalo de duração de 1 minuto é uma das formas de solucionar o problema, embora as concessionárias possam adotar janelas de tempo maiores para considerar o impacto de afundamentos de tensão em processos industriais a fim de avaliar o tempo mínimo para restabelecimento de tais processos.

## 2.4 Caracterização dos Afundamentos de Tensão

Os principais parâmetros que caracterizam um afundamento de tensão monofásico são a magnitude e a duração, os quais, somados à frequência de ocorrência, fornecem informações satisfatórias sobre o fenômeno [9,10]. Ao analisar afundamentos de tensão trifásicos, outros parâmetros são incorporados, como a assimetria e o desequilíbrio das tensões.

### 2.4.1 Falhas Monofásicas

A variação do valor RMS da tensão em função do tempo pode determinar a magnitude e a duração do evento. A magnitude do afundamento de tensão, seguindo a filosofia do IEEE, é o menor valor da tensão remanescente durante a ocorrência do evento [8]. A duração, por outro lado, é o tempo durante o qual o valor RMS da tensão permanece abaixo do patamar de 0,90 p.u. da tensão de referência (tensão nominal, pré-falta, operativa, etc.).

A Figura 1 ilustra a caracterização do evento monofásico de afundamento de tensão com duração e amplitude definidos.

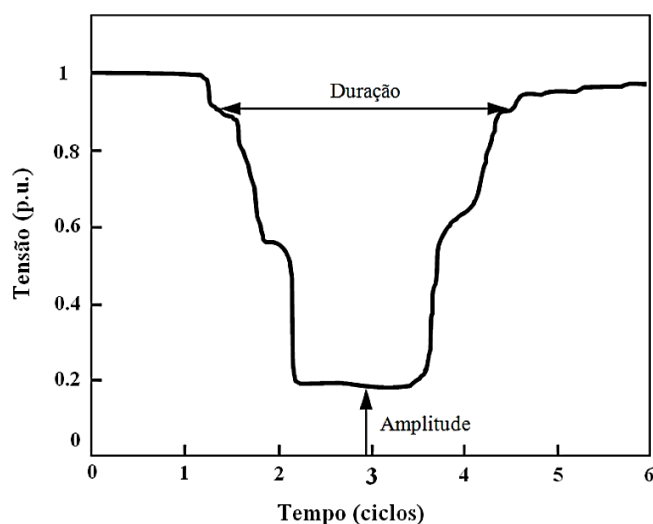


Figura 1 – Afundamento de tensão monofásico.

### 2.4.2 Falhas Trifásicas

Uma ocorrência no sistema de potência pode afetar uma, duas ou até as três fases. A magnitude e a duração do afundamento de tensão resultante em cada fase podem diferenciar-se substancialmente, sobretudo em sistemas de distribuição onde podem ocorrer curtos-circuitos deslizantes. Para fins de cálculo de indicadores e avaliação do impacto dos distúrbios sobre equipamentos, utiliza-se o procedimento chamado de agregação de fases, que define os parâmetros de amplitude e duração a uma ocorrência que provoque registro em mais de uma fase.

A agregação de fases pela fase crítica estabelece que a duração do evento esteja associada à duração dessa fase que apresentou a menor amplitude de tensão. A amplitude do evento obtida após o processo de agregação de fases corresponde ao mínimo valor da tensão restante entre as três fases. A Figura 2 mostra a agregação de fases para a qual a fase crítica é a fase C.

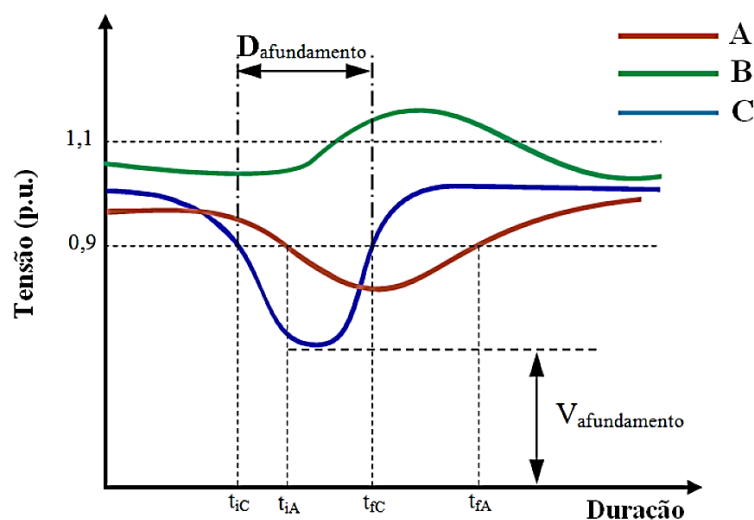


Figura 2 – Afundamento de tensão – Método da agregação de fases

### 2.4.3 Tipos dos Afundamentos

Math H. J. Bollen apresentou uma classificação dos afundamentos de tensão de acordo com o tipo de falta e conexão da carga. Após tais observações, foram propostos sete tipos de afundamentos de tensão, classificados como tipos A, B, C, D, E, F e G, que resultam da associação entre os diferentes tipos de faltas, as formas tradicionais de se conectar uma carga trifásica, e o tipo de conexão dos transformadores [8,9].

A Figura 3 apresenta os diagramas e as equações no domínio da fase com as principais características desses afundamentos em que:

E - Magnitude do afundamento de tensão;

V - Magnitude da tensão nominal do sistema;

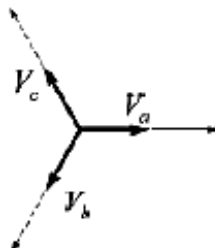
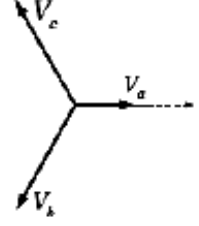
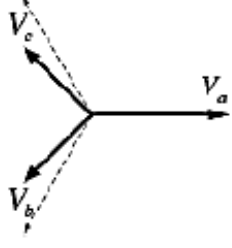
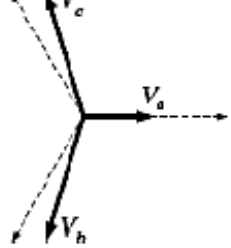
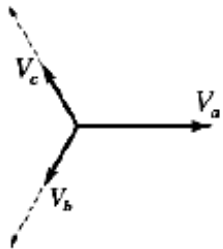
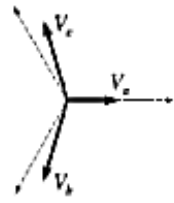
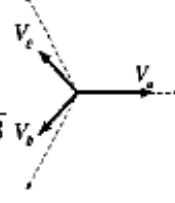
|  |  |
|--|--|
| <p><i>Tipo A</i></p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$    | <p><i>Tipo B</i></p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{1}{2}jE\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{1}{2}jE\sqrt{3}$    |
| <p><i>Tipo C</i></p> $V_a = E$ $V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$    | <p><i>Tipo D</i></p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}Ej\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jE\sqrt{3}$    |
| <p><i>Tipo E</i></p> $V_a = E$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}$    | <p><i>Tipo F</i></p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \left(\frac{1}{3}E + \frac{1}{6}V\right)j\sqrt{3}$ $V_c = +\frac{1}{2}V - \left(\frac{1}{3}E + \frac{1}{6}V\right)j\sqrt{3}$  |
| <p><i>Tipo G</i></p> $V_a = \frac{2}{3}E + \frac{1}{3}V$ $V_b = -\left(\frac{1}{3}E + \frac{1}{6}V\right) - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_b = -\left(\frac{1}{3}E + \frac{1}{6}V\right) + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$  |  |

Figura 3 – Classificação ABC para os tipos de afundamentos de tensão.

## 2.5 Sensibilidade dos equipamentos

As implicações dos afundamentos de tensão sobre os consumidores industriais ocorrem de forma diferenciada em função da sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos instalados, das características intrínsecas a cada processo industrial e dos sistemas de controle de processo envolvidos. Assim, a sensibilidade da carga do

consumidor é uma soma da sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos instalados com a sensibilidade do processo industrial.

Para os consumidores domésticos, os efeitos do distúrbio são observados pela perda de memória e de programação de relógios digitais, fornos de micro-ondas, desligamento de microcomputadores. Tais problemas não estão totalmente relacionados a perdas financeiras, mas à satisfação dos consumidores e à imagem das Concessionárias.

O impacto dos afundamentos de tensão em consumidores industriais se dá através de interrupção parcial ou total de processos produtivos, e os prejuízos associados à parada de produção, perda de produtividade e de insumos, conserto e substituição de equipamentos danificados [10,11,12].

Os problemas resultantes dos afundamentos de tensão sobre os equipamentos eletrônicos utilizados na indústria se manifestam com:

- Desligamento de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que levam cerca de alguns minutos para reacenderem;
- Perda de programação de CLP's;
- Desligamento de acionamentos devido à atuação de dispositivos de proteção associados, que promovem o bloqueio do disparo de tiristores ou o desligamento imediato da fonte de alimentação;
- Falhas de comutação em pontes controladas, afetando os disparos dos gatilhos de tiristores;
- Queima de fusíveis e outros componentes em acionamentos CC operando no modo regenerativo.

A curva CBEMA apresentada na Figura 4 foi originalmente construída para caracterizar a sensibilidade de computadores de grande porte, mas também tem sido empregada para outros componentes eletroeletrônicos como microcomputadores, equipamentos microprocessados entre outros.

A curva ITIC foi resultado de uma modificação da curva CBEMA para caracterização da sensibilidade dos mais diversos e modernos dispositivos eletrônicos



e computadores. A Figura 5 mostra a curva de suportabilidade com tempo de milissegundos *versus* a tensão por unidade p.u.

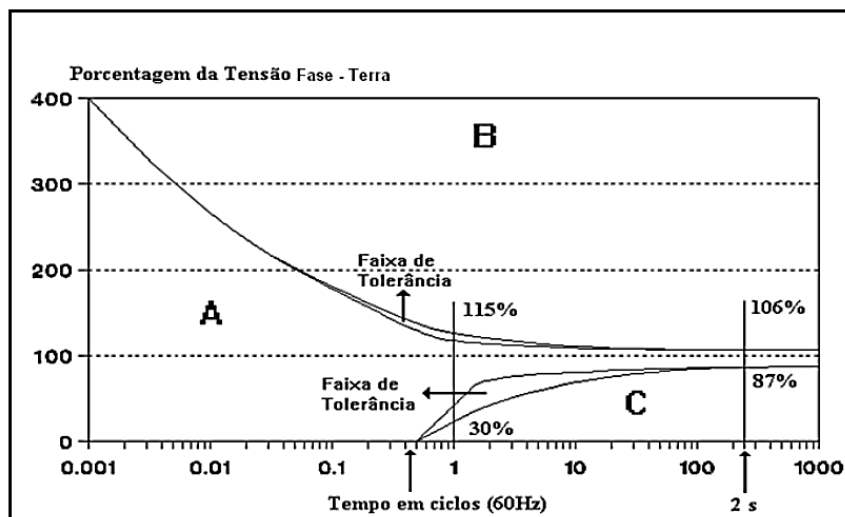


Figura 4 – Curva de suportabilidade CBEMA

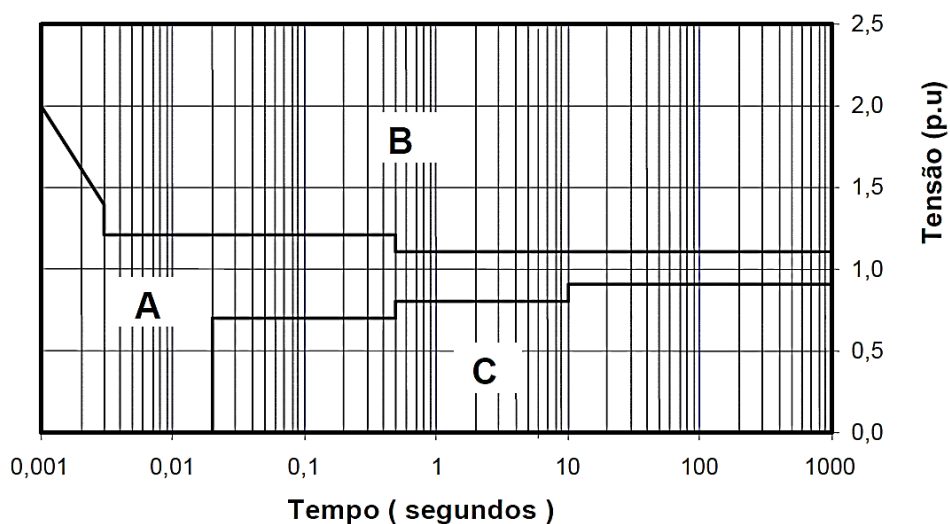


Figura 5 - Curva de suportabilidade ITIC

São definidas três regiões distintas de operação que representam:

- Região A - área de imunidade, de funcionamento normal dos equipamentos sem possibilidades de problemas;

- Região B - área de susceptibilidade, com possibilidade de ruptura da isolação dos equipamentos, em função de sobretensões transitórias e elevações de tensão;
- Região C - região de sensibilidade, com possibilidade de parada de operação dos equipamentos, devido à ocorrência afundamentos de tensão, com as interrupções momentâneas.

### **3 PLANEJAMENTO DO SISTEMA CONSIDERANDO OS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

#### **3.1 Índices de amplitude e duração dos afundamentos**

A magnitude e duração do evento podem ser determinadas a partir da evolução do valor da tensão eficaz em função do tempo, sendo o menor valor da tensão eficaz durante a ocorrência do evento.

A duração de um afundamento de tensão corresponde ao momento quando o valor de tensão eficaz torna-se menor do que o valor limite estabelecido pela normal de 90% da tensão de referência (tensão de contrato, tensão nominal, tensão operativa ou tensão pré-falta). Da mesma forma, o fim é definido quando a tensão é superior a 90% da tensão de referência [8,19,22].

A duração dos afundamentos indica a possível causa do mesmo, sendo geralmente:

- Menor do que 6 ciclos para faltas geradas no nível de Transmissão;
- De 150 a 300 ms para as faltas decorrentes nos Sistemas de Distribuição;
- De 2 a 20 s faltas para arranque de motor

Para o cálculo dos indicadores de desempenho e para avaliação do impacto de fenômenos sobre equipamentos, é utilizado o procedimento chamado de agregação de fases, que consiste em atribuir um conjunto de parâmetros únicos (magnitude e duração) a um afundamento que se registre em mais de uma fase [1,2].

### 3.2 Índices de frequência dos afundamentos

A frequência de ocorrência de afundamentos considera-se como o número de afundamentos por ano, para um dado barramento que tenha sido monitorado através de medição. Num método de estimativa, se necessita de dados estatísticos a respeito da frequência de ocorrência de faltas no sistema [23]

Ferreira et. al. [14] sugere a avaliação da capacidade dos diferentes índices para os afundamentos de tensão dentre os quais observa o uso do desequilíbrio das fases e o salto do ângulo das fases.

São apresentadas duas propostas:

- Avaliar o Módulo da amplitude característica e a Duração do afundamento para caracterizar o distúrbio;
- Avaliar o Ângulo da amplitude característica, o Módulo da amplitude característica e a Duração do afundamento para caracterizar o distúrbio;

A partir dos diferentes tipos de falta a Tabela 3 apresenta o valor de tensão característica  $V_f$  que é a tensão da fase faltosa para os diferentes tipos de falta [14].

Tabela 3 - Valor da tensão característica para os tipos de falta

| TIPO DE FALTA                         | TENSÃO CARACTERÍSTICA (V) |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Fase-Terra                            | $1/3+2/3*V_f$             |
| Bifásica, Bifásica à Terra, Trifásica | $V_f$                     |

### 3.3 Modelagem em ATPDraw para simular os eventos

A etapa de simulação dos circuitos de monitoração foi realizada por meio do programa de análise de transientes eletromagnéticos ATP, com a construção na interface ATPDraw.

No ATPDraw é possível construir um diagrama unifilar a partir de modelos pré-definidos dos principais componentes de uma rede elétrica, como: as representações de elementos a parâmetros concentrados, elementos distribuídos, chaves, geradores, transformadores, linhas de transmissão, para-raios, reatores, não-linearidades, etc. O ATPDraw é um software com interfaces com muitos recursos

gráficos, que permitem a criação e edição dos arquivos de dados de entrada para o processamento no ATP [14,16,18,20].

Novaes (2007) mostra uma pesquisa sobre validação de ferramentas de simulação de afundamentos de tensão através de medições com aplicação em um determinado sistema elétrico de uma concessionária.

As medições foram realizadas durante seis meses utilizando 12 registradores localizados em pontos convenientes da rede e sincronizados numa mesma base de tempo através de GPS.

Os resultados das medições foram confrontados com resultados obtidos através de simulações utilizando os programas ANAFAS e ATP. A validação dos resultados foi realizada a partir da comparação das intensidades dos afundamentos de tensão e através de indicadores individuais e globais.

Nas comparações utilizou-se também análise de sensibilidade das variáveis de influência dos afundamentos, como tensão pré-falta, localização do defeito e resistência de falta nos curtos circuitos para a terra. Foram abordados os aspectos relativos à propagação dos afundamentos e identificação das áreas de vulnerabilidade.

As conclusões indicam a validação das simulações, a partir do confronto com as medições realizadas. Neste sentido, as sensibilidades estudadas podem servir de base para a realização de simulações, permitindo antecipar os resultados esperados para distintos tipos e configurações de falta, e para variações nas redes simuladas [23].

### **3.4 Escolha dos pontos de medição**

Atualmente, a atuação das concessionárias para a avaliação dos distúrbios relacionados aos afundamentos de tensão ocorre através da área de operação da empresa, em caráter corretivo, dispendendo tempo e análise técnica e envolvendo o sistema de monitoramento existente [24].

Medeiros (2003) aborda a procura de determinar indicadores que expressem a qualidade de energia nos pontos de conexão com a transmissora em alguns pontos de entrega. São considerados na pesquisa aspectos qualitativos e quantitativos, permitindo estabelecer relações de causa e efeito relativos à ocorrência dos distúrbios na rede,

para subsidiar ações preventivas e corretivas para a operação, como também para o planejamento da operação e da expansão do sistema de distribuição.

A pesquisa trata dos diversos aspectos da qualidade de energia em geral, com a devida atenção para os problemas relacionados com os afundamentos de tensão.

Foram selecionados os pontos de monitoração e feita uma pesquisa sobre os parâmetros de medida, seguindo-se da definição, aquisição e instalação dos registradores. Com a aquisição dos dados foram estabelecidas comparações entre os valores registrados e as simulações realizadas [21].

Kempner (2012) apresenta o Método das Posições de Falta como forma de determinar as tensões remanescentes em barras de um sistema de distribuição com a ocorrência de afundamentos de tensão sobre a rede. Além disso, utiliza um algoritmo capaz de determinar um número ideal de medidores de qualidade de energia e as respectivas barras onde os mesmos deverão ser instalados a fim de realizar o monitoramento e garantir a sensibilização de ao menos um dos medidores para cada curto-circuito simulado.

Para a definição de um monitoramento eficaz dos afundamentos de tensão nos SEP (Sistemas Elétricos de Potência) são definidos todos os limiares inteiros possíveis de ocorrência para caracterizar a solução ótima. Com a possibilidade prática de adicionar restrições sobre quais barras os medidores não devem ser instalados, quais já possuem esses medidores instalados ou quais são as barras prioritárias onde devem ser instalados.

Se a barra já possui um medidor instalado e deseja-se priorizar a alocação do instrumento na solução ótima, a posição do vetor correspondente a esta barra terá um valor inteiro, e as demais variáveis valor fracionário. Outra possibilidade é associar um menor valor para esta barra e valores superestimados para as demais variáveis, assegurando que o algoritmo vai instalar o medidor na barra especificada, para uma solução realizável de minimização com a participação dessa variável [18].

### **3.5 Ferramenta para análise dos afundamentos de tensão**

Oliveira (2004) discute o desenvolvimento e aplicação de um sistema de software para estudos de afundamentos de tensão, visando complementar alguns aspectos e suprir deficiências em relação aos softwares então disponíveis.

Esse estudo tratou da integração das pesquisas relativas às análises prospectiva e retrospectiva, à possibilidade de utilização de estudos de curto circuito deslizante e de metodologia estocástica. Abordou também a implantação das proteções de sobrecorrente e caracterização dos afundamentos através das metodologias alternativas, como perda de energia e perda de tensão.

O sistema de software foi elaborado para permitir a análise dos impactos dos afundamentos no sistema, tanto pela concessionária como pelo consumidor, para possibilitar o estabelecimento de ações mitigadoras economicamente viáveis [26].

Fonseca (2009) desenvolve um sistema de apoio à tomada de decisão para atribuição de responsabilidade por perda de qualidade de energia devido às VTCD.

A pesquisa apresenta uma ferramenta computacional desenvolvida para auxiliar o processo de análise dos pedidos de indenização por danos de equipamentos elétricos de consumidores, decorrentes de perturbações na rede relacionadas com os afundamentos de tensão.

O sistema desenvolvido considera resultados de simulações sobre ocorrências de prováveis defeitos na rede, dados de monitoramento através de medições e dados de suportabilidade de equipamentos elétricos.

Esses dados são integrados a um módulo de análise nexo-causal, baseado em classificadores de redes neurais artificiais, que fornece subsídios à elaboração de pareceres técnicos, estabelecendo as causas prováveis dos danos [15].

Menezes (2007) mostra uma estratégia para análise de afundamento de tensão no planejamento do sistema elétrico. Ele propõe uma estratégia a ser adotada na fase de planejamento do sistema elétrico, visando à minimização dos efeitos esperados dos distúrbios de afundamentos de tensão.

A metodologia envolve uma fase de definição das denominadas competências vitais, seguindo-se aos estudos de planeamento do sistema e depois aos tratamentos dos consumidores considerados especiais, contendo cargas sensíveis.

A estratégia provê diretivas para as equipas de planeamento, na análise e avaliação de alternativas de expansão, incluindo questões relativas aos afundamentos de tensão, e expectativas de melhoria de desempenho do sistema elétrico [23].

## **4 ESTUDO DE CASO**

### **4.1 Medição Sistema Elétrico**

O sistema elétrico da concessionária Eletrobrás Distribuição Piauí é suprido pelas subestações Teresina II, Boa Esperança e São João do Piauí, alimentadas a partir das linhas de transmissão em 500 kV pertencentes ao Sistema Interligado Nacional SIN apresentadas na Figura 6. O sistema de 230 kV deriva dos autotransformadores dessas subestações e de um elo existente entre as subestações de Teresina II e Teresina I [13].

A Figura 7 apresenta o diagrama unifilar da Regional Teresina com a identificação das barras das subestações e linhas de transmissão do sistema. Na Figura 8 está o diagrama da subestação em que o analisador de qualidade de energia foi instalado [13].

De acordo com informações apresentadas pela concessionária, atualmente a SE Renascença tem apenas dois de seus alimentadores operando suprimindo uma carga de 2,5 MW para aliviar os transformadores da SE Teresina 13,8 kV, embora a sobrecarga existente no sistema 69 kV da regional esteja com um carregamento elevado em torno de 30% [13].

O Departamento de Operações também disponibilizou uma planilha com o número de reclamações de consumidores por danos elétricos em cada alimentador da regional ao longo do ano de 2012. Das 530 reclamações registradas na capital, 14% estavam vinculadas ao alimentador AL01-C07 na SE Renascença um dos mais afetados.

A partir dessas informações foi adotada como subestação piloto para o projeto a instalação do equipamento portátil de qualidade de energia na saída do respectivo alimentador.



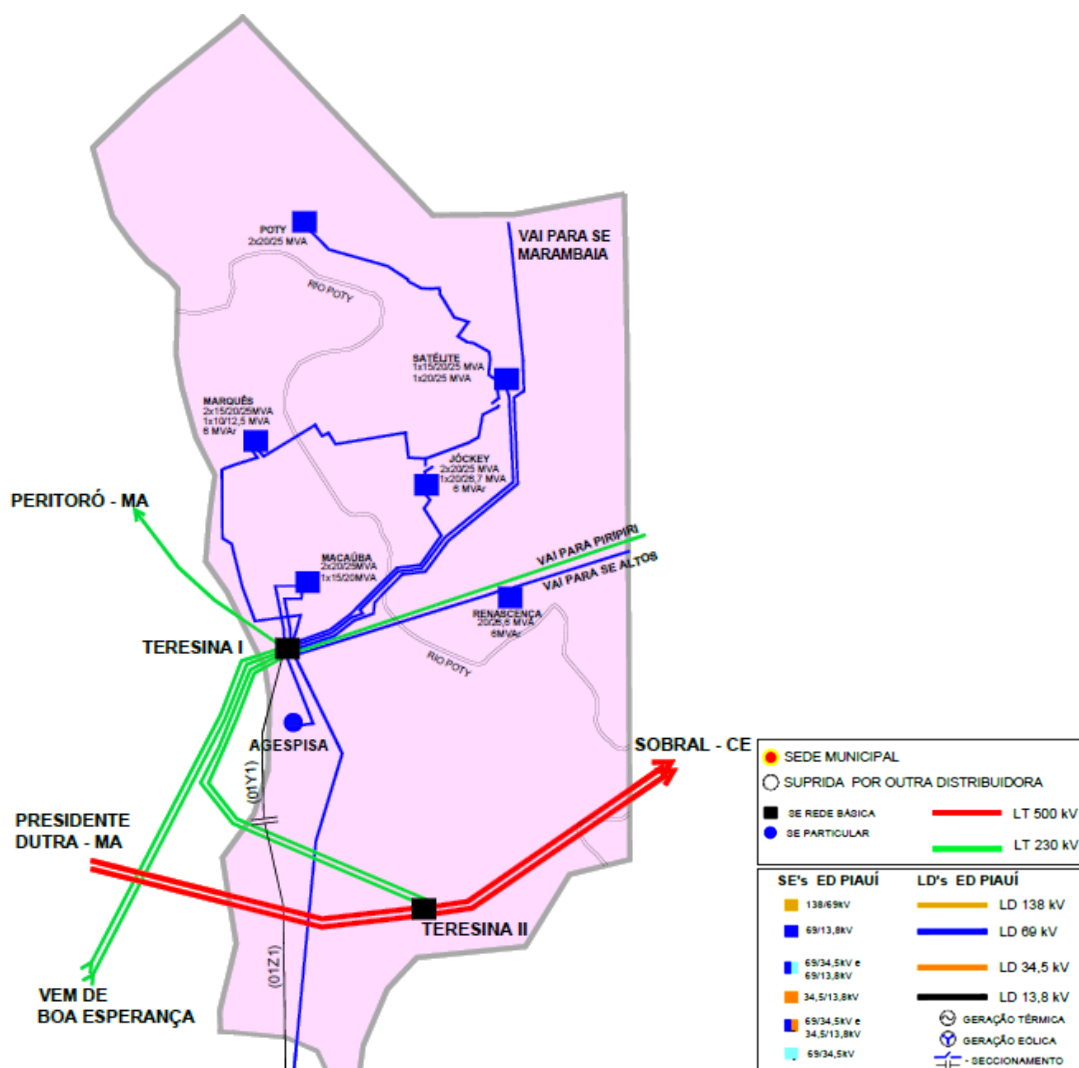


Figura 6 – Mapa Eletrogeográfico de Teresina – Eletrobras Distribuição Piauí

Figura 7 – Diagrama Unifilar Sistema Elétrico Regional Teresina.

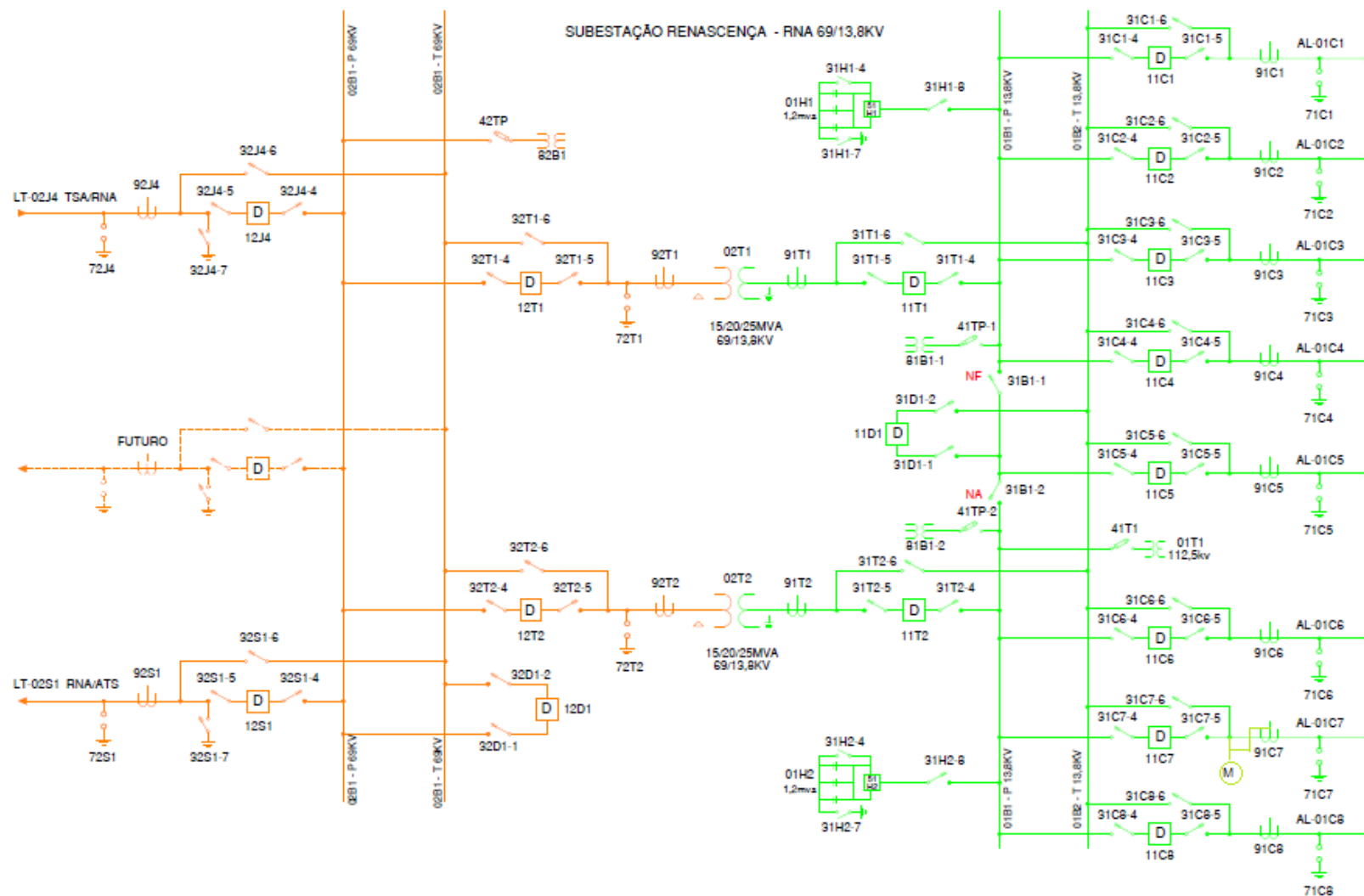


Figura 8 – Diagrama Unifilar Subestação Renascença.

O PRODIST estabelece requisitos mínimos quanto à instrumentação utilizada nas medições de QEE [1]. As leituras devem ser obtidas por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital e atendam os seguintes requisitos mínimos:

- Taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
- Conversor analógico/digital de sinal de tensão: 12 bits;
- Precisão: até 1% da leitura.

Os equipamentos de medição devem permitir a apuração das seguintes informações:

- Valores calculados dos indicadores individuais;
- Tabela de medição;
- Histograma de tensão.

A medição deve corresponder ao tipo de ligação da unidade consumidora, abrangendo medições entre todas as fases ou entre todas as fases e o neutro, quando este for disponível.

O equipamento de qualidade de energia utilizado foi o modelo PowerNET PQ-600, marca IMS, ilustrado pela Figura 9, que está regulamentado pelo PRODIST e registra os distúrbios de VTCD's como apresentado a seguir [17]:



Figura 9 – Analisador de Qualidade de Energia IMS PowerNET PQ-600

O analisador foi instalado na saída do alimentador AL-01C7 da SE Renascença utilizando o sinal de tensão de comando dos relés de proteção disjuntor 11C7 para a medição de tensão e o sinal do proveniente do secundário do transformador de corrente 91C7 conforme a Figura 10.

A parametrização do equipamento permitiu registrar os valores apresentados conforme indicado a seguir:

- Afundamentos e elevações e Interrupções com limites de detecção ajustáveis para (interrupções de 0 a 10%, afundamento 10 a 90%, e elevações 110 a 200%).
- Histerese ajustável 0 a 10%.

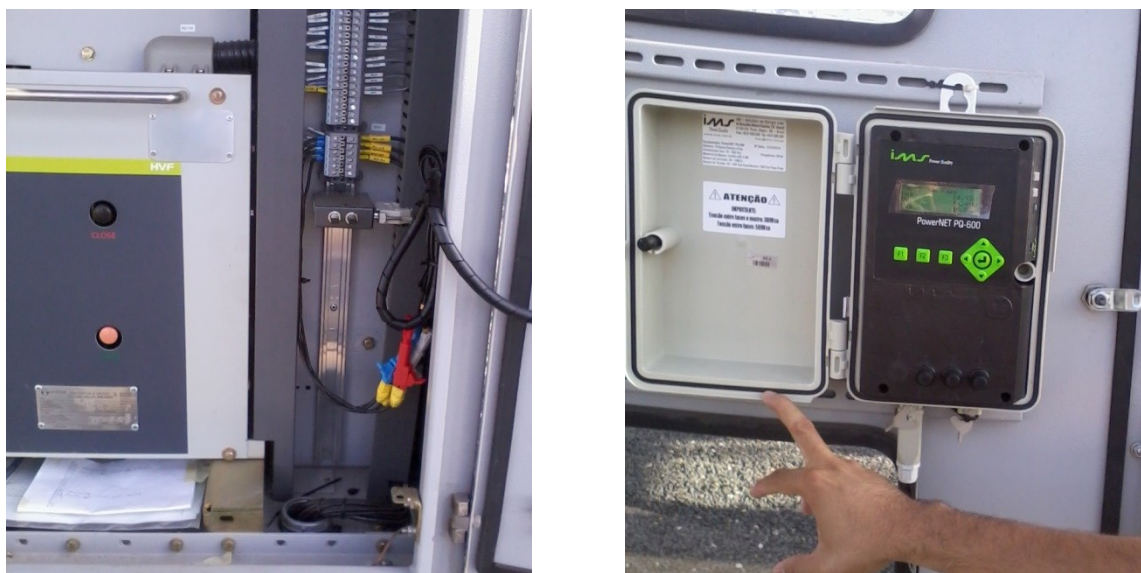


Figura 10 – Medidor instalado na saída do alimentador instalado no interior do cubículo do disjuntor 11C7.

## 4.2 Sistema Simulado

Os parâmetros utilizados para a caracterização dos componentes utilizados no sistema estão apresentados na Tabela 4 fornecidos pela concessionária da distribuição:

Tabela 4 – Parâmetros Fornecidos para a Simulação

| Subestação      | Relação Tensão (kV) | Alimentadores (Bitola) | Potência de Transformação (MVA) | Impedância do transformador (%) |
|-----------------|---------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Altos           | 69/13,8             | 01C1 (1/0CAA)          | 10 / 12,5                       | 6,64                            |
|                 |                     | 01C2 (1/0CAA)          |                                 |                                 |
|                 |                     | 01C3 2/0CAA            |                                 |                                 |
| Amarante        | 34,5/13,8           | 01N1 (4/0CAA)          | 5 / 6,25                        | 6,80                            |
| Jockey          | 69/13,8             | 01X1 (336,4)           | 20/26,67                        | 9,79                            |
|                 |                     | 01X2 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01X3 (336,4)           | 2 x 20 / 25                     | 12,03                           |
|                 |                     | 01X4 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01X5 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01X6 (336,4)           |                                 | 11,85                           |
|                 |                     | 01X7 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01X8 (336,4)           |                                 |                                 |
| José de Freitas | 34,5/13,8           | 01C1 (4/0)             | 5 / 6,25                        | 6,61                            |
|                 |                     | 01C2 (4/0)             |                                 |                                 |
|                 |                     | 01C3 (4/0)             |                                 |                                 |
| Macaúba         | 69/13,8             | 01V1 (4/0)             | 20 / 25                         | 8,62                            |
|                 |                     | 01V2 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01V4 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01V5 (336,4)           | 20 / 25                         | 8,66                            |
|                 |                     | 01V6 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01V7 (336,4)           | 15 / 20                         | 7,61                            |
|                 |                     | 01V8 (336,4)           |                                 |                                 |
| Marambaia       | 69/34,5             | 09F1 (4/0CAA)          | 5 / 6,5                         | 4,85                            |
|                 | 69/13,8             | 01C1 (4/0CAA)          | 2 x 6,5                         | 6,31                            |
|                 |                     | 01C2 (4/0CAA)          |                                 | 6,07                            |
| Marquês         | 69/13,8             | 01N1 (336,4)           | 2 x 15/20/25                    | 11,88                           |
|                 |                     | 01N2 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01N3 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01N4 (336,4)           |                                 | 12,07                           |
|                 |                     | 01N5 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01N6 (336,4)           |                                 |                                 |
|                 |                     | 01N8 (336,4)           | 10/12,5                         | 6,88                            |
|                 |                     | 01N7 (336,4)           |                                 |                                 |
| Miguel Alves    | 69/13,8             | 01C1 (1/0CAA)          | 2 x 2                           | 6,36                            |
|                 |                     | 01C2 (1/0CAA)          |                                 | 6,20                            |
|                 |                     | 01C3 (1/0CAA)          |                                 |                                 |
| Nazaria         | 69/13,8             | 01Z1 (4/0CAA)          | 15 / 20                         | 7,56                            |
|                 |                     | 01Z2 (1/0CAA)          |                                 |                                 |
|                 |                     | 01Z3 (4/0CAA)          |                                 |                                 |
|                 |                     | 01Z4 (1/0CAA)          |                                 |                                 |
| Novo Nilo       | 69/13,8             | 01C1 (1/0CAA)          | 2,0                             | 6,44                            |

|                 |             |                 |              |               |
|-----------------|-------------|-----------------|--------------|---------------|
| Regeneração     | 34,5/13,8   | 01C1 (4/0CAA)   | 5 / 6,25     | 6,62          |
|                 |             | 01C2 (2AWG CAA) |              |               |
| Renascença      | 69/13,8     | 01C7 (336,4)    | 2x20/26,6    | 12,07         |
|                 |             | 01C8 (336,4)    |              | 11,86         |
| Satélite        | 69/13,8     | 01L1 (336,4)    | 15 / 20 / 25 | 12,66         |
|                 |             | 01L2 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01L3 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01L6 (336,4)    | 20 / 25      | 12,86         |
|                 |             | 01L7 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01L8 (336,4)    |              |               |
| São Pedro       | 69/13,8     | 01C1 2/0CAA     | 15 / 20      | 7,81          |
|                 |             | 01C2 2/0AWG     |              |               |
|                 |             | 01C3 (4/0CAA)   |              |               |
|                 | 69/34,5     | 09F5 (2/0CAA)   | 10/12,5      | 6,92          |
|                 |             | 01N2 (4/0CAA)   |              |               |
| Polo Industrial | 69/13,8     | 01P1 (336,4)    | 1x20/26,6    | 11,99         |
|                 |             | 01P2 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01P3 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01P4 (336,4)    |              |               |
| Poty            | 69/13,8     | 01P1 (397,5)    | 2x20/25      | 11,90         |
|                 |             | 01P5 (336,4)    |              | 12,03         |
|                 |             | 01P6 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01P8 (397,5)    |              |               |
| Teresina        | 230/69/13,8 | 01Y1 (336,4)    | 33,33        | 10,8-15,5-4,1 |
|                 |             | 01Y2 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01Y4 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01Y8 (336,4)    |              |               |
|                 | 230/13,8    | 01Y3 (336,4)    | 40           | 14,83         |
|                 |             | 01Y5 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01Y6 (336,4)    |              |               |
|                 |             | 01Y7 (336,4)    |              |               |
| União           | 69/13,8     | 01C1 (1/0CAA)   | 5 / 6,5      | 6,46          |
|                 |             | 01C2 (1/0CAA)   |              |               |
|                 |             | 01C3 (1/0CAA)   |              |               |

Foram realizadas simulações dos casos de curto-circuito monofásico, bifásico, bifásico a terra e trifásico nas barras de 13,8kV com a colocação do monitor de tensão rms trifásico no alimentador em que o monitor de qualidade de energia foi instalado na SE Renascença, e em outros pontos para avaliar os efeitos das faltas no sistema de transmissão em 69kV, e também na rede de distribuição em 34,5 kV e 13,8kV.

Para o diagrama de impedâncias fornecido a potência de base  $S_b$  foi informada igual a 100 MVA, e as linhas de transmissão informadas em termos percentuais.

Os modelos de linha de transmissão foram representados por parâmetros concentrados PI trifásico com os valores rede de sequência simétrica RLC equivalente

utilizando os valores nominais de resistência e reatância por unidade de comprimento para cada condutor.

Os dados da sequencia positiva foram adotados a partir da bitola do condutor informado para as linhas de transmissão identificadas. Os parâmetros de sequência zero são obtidos através da multiplicação dos valores de sequência positiva por três [24].

O modelo de transformador foi de núcleo saturado, com seu lado de alta tensão conectado em delta e o lado de baixa tensão conectado em estrela aterrado, com um defasamento de 30°.

Os parâmetros utilizados foram as reatâncias do transformador obtidas a partir a impedância de base em ambos os lados do dispositivo, conforme disponibilizado pela Tabela 4. Dividindo a reatância de cada transformador igualmente por dois, e com as impedâncias de base para a potência de base em 100 MVA em cada lado calculada, com a definição das Equações 1 e 2:

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (1)$$

$$Z_{baixa}(\Omega) = Z_{base(b)} * \frac{Z_{equivalente}(pu)}{2} \quad (2)$$

Dado que a impedância do transformador é reativa o cálculo é efetuado pela utilizando a frequência da rede em 60 Hz por meio da Equação 3.

$$L_{baixa} = \frac{Z_{baixa}(\Omega)}{\omega} = \frac{Z_{baixa}(\Omega)}{2 * \pi * 60} \quad (3)$$

O procedimento para o cálculo da indutância para lado de alta tensão dos transformadores segue o mesmo procedimento conforme as equações 4 e 5:



$$Z_{\text{alta}}(\Omega) = Z_{\text{base(a)}} * \frac{Z_{\text{equivalente}}(\text{pu})}{2} \quad (4)$$

$$L_{\text{alta}} = \frac{Z_{\text{alta}}(\Omega)}{\omega} = \frac{Z_{\text{alta}}(\Omega)}{2 * \pi * 60} \quad (5)$$

A fonte do sistema situada na barra de 69 kV da subestação da Chesf, foi considerada com elevada potência de curto circuito e, conseqüentemente, com impedância equivalente muito baixa comparada com as impedâncias do subsistema. Dessa forma não exerceria influência nos curtos circuitos da rede de distribuição, exceto no sistema de 69 kV em pontos próximos àquela subestação.

Os modelos de cargas lineares foram representados através dos modelos de impedância constante, em que os valores de resistência e reatância da carga equivalente em cada barramento do sistema são considerados.

A Figura 11 apresenta a tela do sistema construído dentro do software ATPDraw para realizar as simulações dos curtos-circuitos.

Os passos de configuração da simulação são listados a seguir:

- Passo de integralização = 10µs
- Tempo de simulação = 0,5 ciclo até 1 seg
- Frequência do Sistema = 60Hz
- Reatância Indutiva = Sim;
- Reatância Capacitiva = Sim;

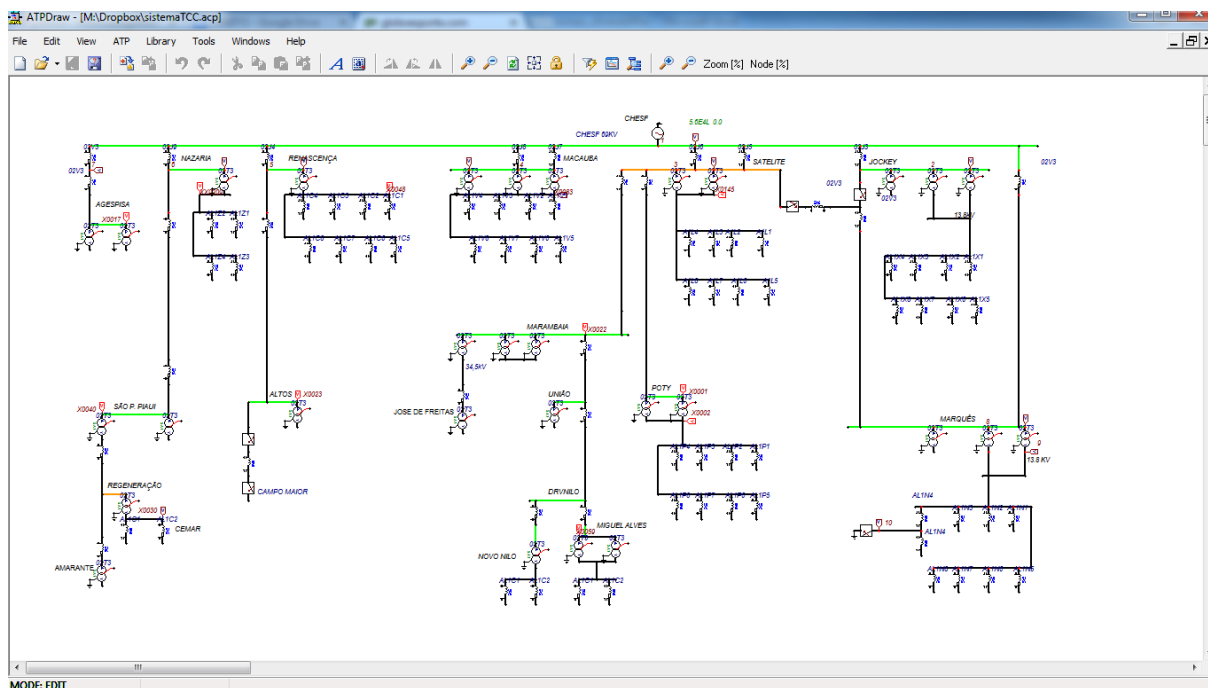


Figura 11 – Circuito Simulado em ATPDraw.

### 4.3 Proposta de Metodologia aplicada com Ferramenta de Avaliação

A partir dos resultados simulados e das medições coletadas, foi elaborado um banco de dados para alimentar uma ferramenta computacional auxiliar em linguagem de programação Delphi que está sendo desenvolvida com o objetivo de fornecer uma alternativa simples e eficaz para analisar tais distúrbios.

O sistema em elaboração compõe-se de dois módulos principais conforme apresentado a seguir:

#### 4.3.1 Módulo de Entrada

A ferramenta deverá apresentar uma interface amigável para acessar informações relativas ao cadastro das subestações, regionais associadas, alimentadores, potência nominal, tensão nominal do sistema, obras a serem realizadas e definidas pela equipe de planejamento.

Nesse módulo de entrada os dados necessários são importados das medições e do sistema simulado pela ferramenta gráfica ATPDraw para os transitórios eletromagnéticos gerados a partir do ATP e dos registros de tensão obtidos nos pontos de interesse.

#### **4.3.2 Módulo de Análise dos Eventos**

A análise dos eventos de afundamentos será realizada por meio de interface capaz de realizar, após o carregamento dos dados simulados e de medição, os tópicos a seguir:

- Exibição gráfica das oscilografias geradas;
- Avaliação estatística da ocorrência de afundamentos por duração, amplitude, e frequência;
- Comparativo entre os valores simulados e de medição com dados absolutos, e tratamento estatístico de erro, desvio padrão;
- Localizar o mapa de eventos para estimar a evidência de danos em equipamentos eletrônicos a partir da análise de sensibilidade por meio da curva ITIC;

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1 Análise das simulações para os indicadores

A partir da modelagem dos parâmetros da rede, são apresentadas as oscilografias dos diferentes afundamentos de tensão simulados a partir das faltas trifásicas, monofásicas, bifásicas a terra e bifásicas para o alimentador da SE Renascença.

A seguir são fornecidas algumas oscilografias obtidas com a identificação da amplitude, duração do evento e classificação do tipo de afundamento conforme o critério de Bollen.

A Figura 12 apresenta o resultado para o curto-circuito trifásico na rede de distribuição em um ponto próximo da subestação Renascença. Pode-se notar que o valor do afundamento por unidade ocorreu da ordem de 0,73 pu com duração definida pela falta de 100 ms. O tipo de afundamento de tensão classificado é o tipo A, com menor índice de ocorrência.

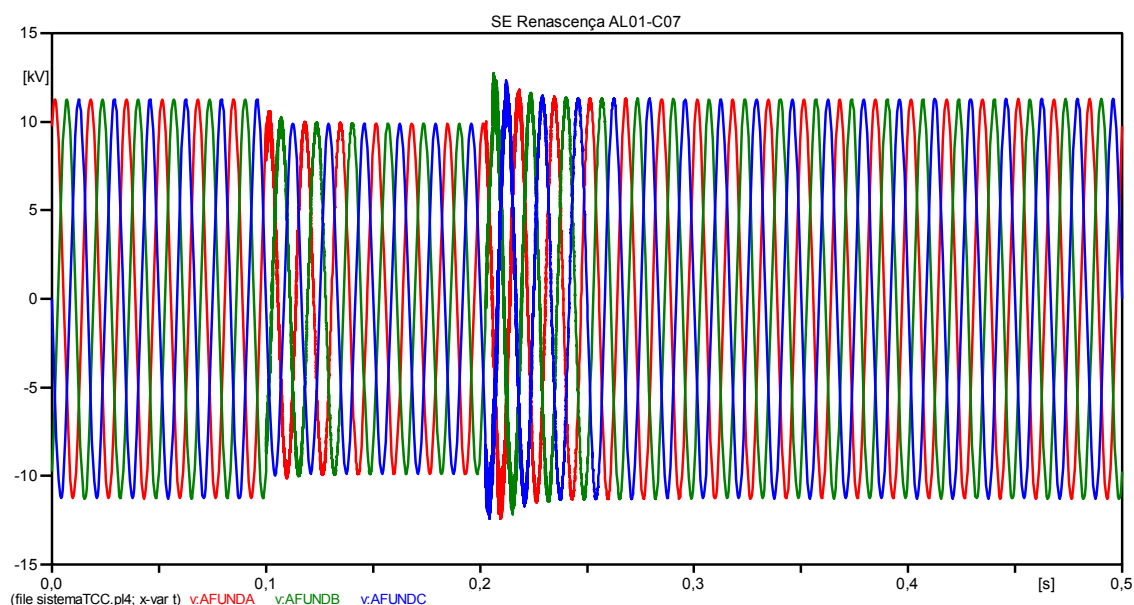


Figura 12 – Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta trifásica.

A Figura 13 exibe o resultado da oscilografia para a simulação de curto-circuito monofásico no mesmo ponto monitorado para sensibilização do equipamento

de qualidade de energia instalado. Foi encontrada uma amplitude de 0,30 pu para uma duração também de 100 ms. A característica de classificação identificada pelo método de Bollen nesse caso é o afundamento de tensão do tipo B.

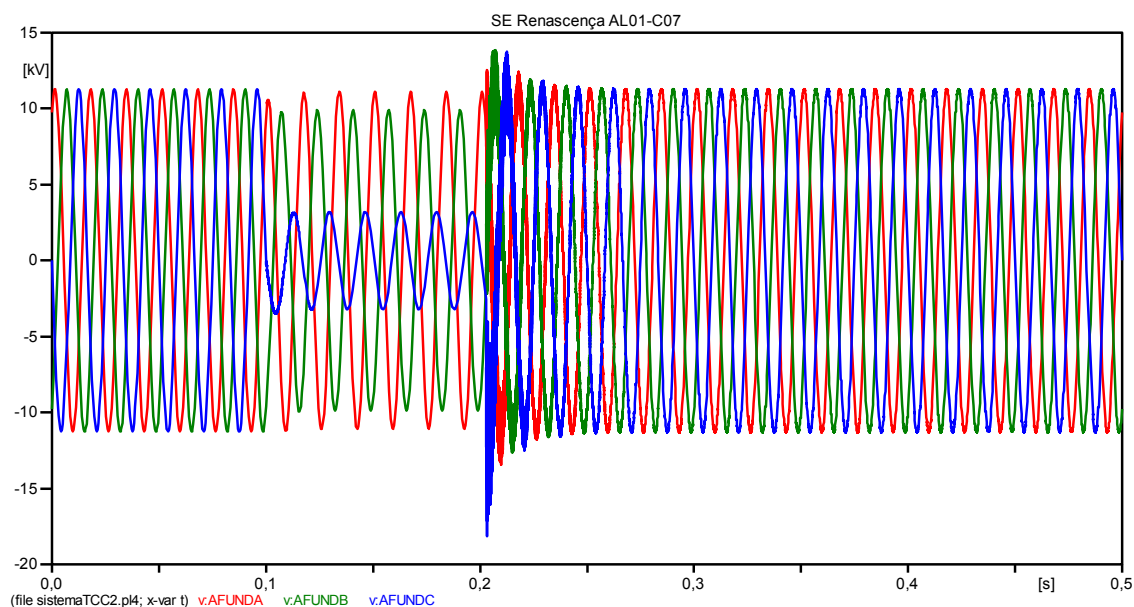


Figura 13 - Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta monofásica.

A Figura 14 retrata a oscilografia encontrada para a simulação de curto-circuito bifásico à terra para o alimentador AL01-C07 da SE Renascença. Foi encontrada uma amplitude de 0,20 pu para uma duração igual a 100 ms. A característica de classificação identificada pelo método de Bollen nesse caso é o afundamento de tensão do tipo F.

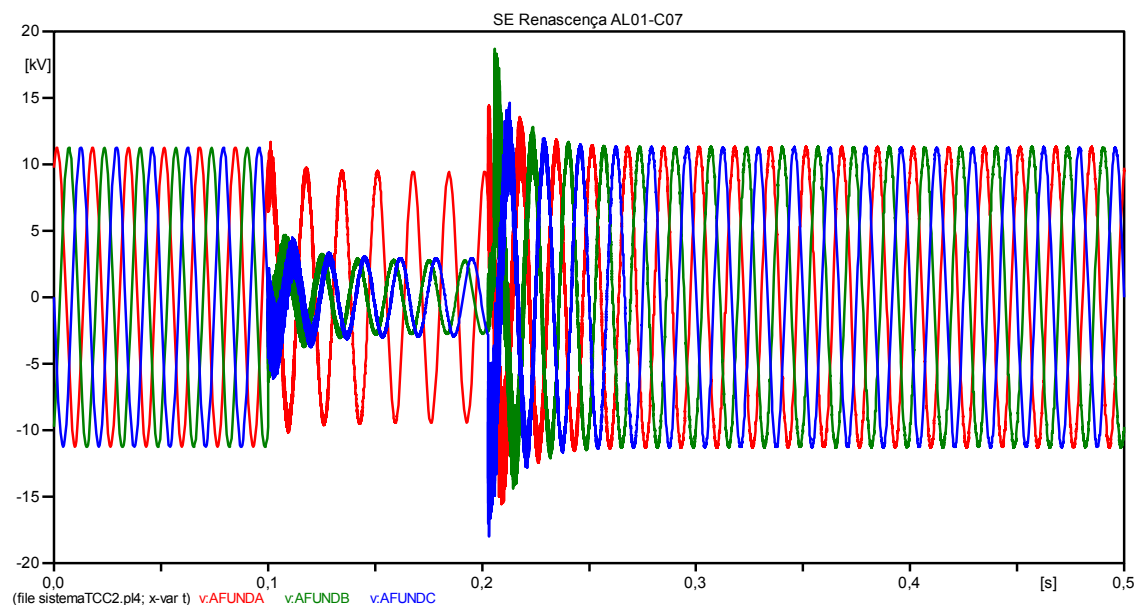


Figura 14 - Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta bifásica a terra.

A Figura 15 mostra a oscilografia encontrada para a simulação de curto-circuito fase-fase ou bifásico para o alimentador AL01-C07 da SE Renascença. Foi encontrada uma amplitude de 0,20 pu para uma duração igual a 100 ms. A característica de classificação identificada pelo método de Bollen nesse caso é o afundamento de tensão do tipo D.

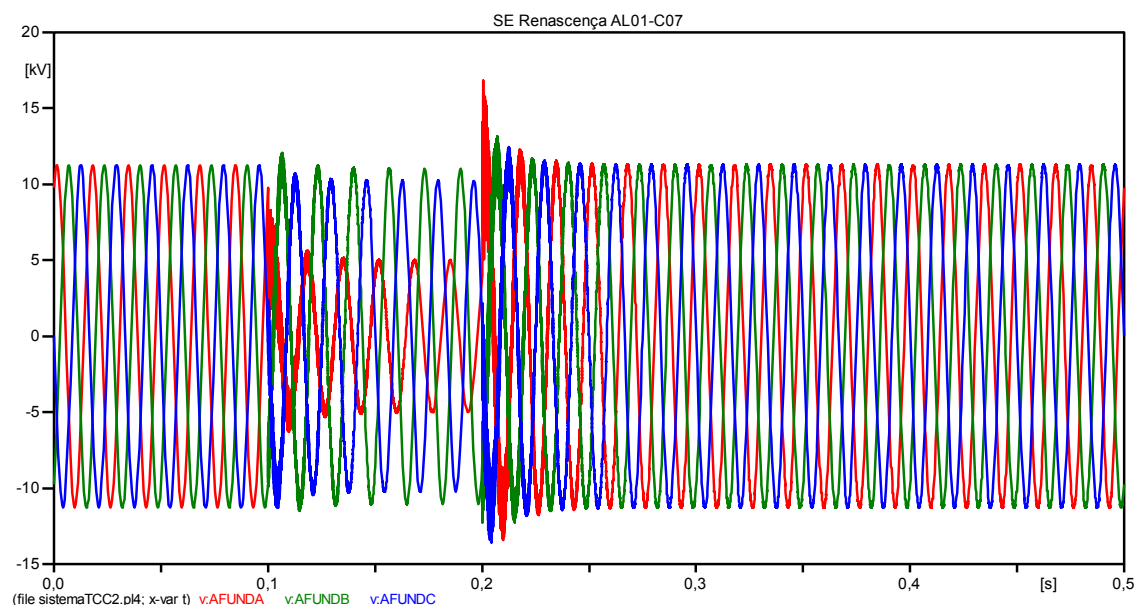


Figura 15 - Simulação de tensões fase-fase no barramento do alimentador para falta bifásica.

A Tabela 5 contabiliza 50 eventos registrados atendendo as condições dos índices de tempo de duração e magnitude para os curtos circuitos simulados em um período de monitoramento de 1 ano a partir da literatura indicada, desconhecendo a filosofia de proteção e as taxas de faltas anuais para melhor otimizar a caracterização dos resultados [27]:

Tabela 5 – Tabela resumo com faixas de amplitude e duração dos eventos simulados dos afundamentos

|              | Duração/Número de Eventos |              |             |         |           |
|--------------|---------------------------|--------------|-------------|---------|-----------|
| Amplitude    | [16,67-300 ms]            | (300-600 ms] | (600 ms-1s] | (1s-3s] | (3s-1min] |
| 0,90-0,85 pu | 5                         | 2            | 1           |         |           |
| 0,85-0,80 pu | 4                         | 3            | 1           |         |           |
| 0,80-0,70 pu | 6                         | 4            | 2           |         |           |
| 0,70-0,60 pu | 5                         | 3            |             |         |           |
| 0,60-0,50 pu | 6                         | 3            |             |         |           |
| 0,50-0,40 pu | 2                         | 1            |             |         |           |
| 0,40-0,30 pu | 2                         |              |             |         |           |
| 0,30-0,20 pu |                           |              |             |         |           |
| 0,20-0,10 pu |                           |              |             |         |           |

## 5.2 Análise das medições com os indicadores

A Tabela 6 apresenta os valores registrados pelo equipamento para os distúrbios identificados como afundamentos momentâneos de tensão ao longo dos 3 meses de monitoramento realizados entre novembro de 2013 e janeiro de 2014

Foram registrados pelo monitor de qualidade de energia ao todo 35 eventos de classificados como afundamento de tensão no alimentador da rede de distribuição para a SE Renascença.

Tabela 6 – Registros obtidos para o alimentador AL01-C07 da SE Renascença

| Data     | Início       | Final        | PUV1  | PUV2  | PUV3  | Duração [s] |
|----------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------------|
| 04/11/13 | 10:35:31'645 | 10:35:31'818 | 0,854 |       |       | 0,073       |
| 05/11/13 | 18:07:29'518 | 18:07:29'534 | 0,726 |       |       | 0,016       |
| 09/11/13 | 19:07:29'118 | 19:07:29'518 | 0,732 |       |       | 0,400       |
| 10/11/13 | 18:12:43'342 | 18:12:43'673 |       | 0,863 |       | 0,341       |
| 13/11/13 | 18:19:56'967 | 18:19:57'121 | 0,741 | 0,738 |       | 0,154       |
| 16/11/13 | 06:35:31'655 | 06:35:31'675 |       | 0,432 |       | 0,02        |
| 18/11/13 | 16:35:33'450 | 06:35:33'773 | 0,638 |       | 0,637 | 0,323       |
| 23/11/13 | 18:36:43'901 | 18:36:43'916 |       |       | 0,394 | 0,015       |
| 25/11/13 | 07:08:38'129 | 07:08:38'167 |       | 0,529 |       | 0,038       |
| 26/11/13 | 08:23:45'702 | 08:23:45'984 | 0,703 |       |       | 0,282       |
| 26/11/13 | 08:28:39'218 | 08:28:39'601 | 0,714 |       |       | 0,383       |
| 26/11/13 | 18:26:38'837 | 18:26:39'176 | 0,798 |       |       | 0,339       |
| 28/11/13 | 06:49:09'510 | 06:49:09'838 |       | 0,573 |       | 0,328       |
| 09/12/14 | 13:05:14'475 | 13:05:14'602 |       |       | 0,626 | 0,127       |
| 09/12/14 | 13:17:39'688 | 13:17:39'821 |       |       | 0,674 | 0,133       |
| 13/12/14 | 17:37:45'102 | 17:37:45'223 | 0,845 |       |       | 0,121       |
| 14/12/14 | 05:12:01'965 | 05:12:02'017 |       | 0,694 |       | 0,052       |
| 14/12/14 | 16:50:51'344 | 16:50:51'446 | 0,743 |       |       | 0,102       |
| 16/12/14 | 23:00:03'487 | 23:00:03'670 | 0,810 |       |       | 0,183       |
| 20/12/14 | 17:14:19'493 | 17:14:19'509 |       |       | 0,823 | 0,016       |
| 20/12/14 | 17:14:57'690 | 17:14:57'814 |       |       | 0,805 | 0,124       |
| 21/12/14 | 00:50:11'431 | 00:50:11'497 |       | 0,787 |       | 0,066       |
| 04/01/14 | 19:22:45'211 | 19:22:45'293 |       |       | 0,762 | 0,082       |
| 05/01/14 | 17:29:11'437 | 17:29:11'484 |       | 0,881 |       | 0,046       |
| 12/01/14 | 19:53:14'900 | 19:53:15'019 | 0,852 |       |       | 0,029       |
| 15/01/14 | 04:45:12'343 | 04:45:12'502 | 0,791 |       |       | 0,159       |
| 19/01/14 | 07:31:06'412 | 07:31:06'493 |       |       | 0,83  | 0,081       |
| 19/01/14 | 08:05:11'850 | 08:05:11'910 | 0,774 |       |       | 0,060       |
| 20/01/14 | 17:12:15'645 | 17:12:15'787 | 0,812 | 0,810 | 0,811 | 0,142       |
| 21/01/14 | 00:22:23'310 | 00:22:23'434 |       | 0,793 |       | 0,124       |
| 21/01/14 | 00:22:24'061 | 00:22:24'102 |       | 0,845 |       | 0,041       |
| 28/01/14 | 01:17:43'152 | 01:17:43'190 | 0,783 |       |       | 0,038       |
| 28/01/14 | 06:34:47'136 | 06:34:47'198 | 0,821 |       |       | 0,062       |
| 30/01/14 | 19:21:57'241 | 19:21:57'304 |       | 0,710 |       | 0,063       |

Usando o conceito de agregação temporal de eventos, resumimos a quantidade observada dos eventos para 32 distúrbios em função do intervalo de registros apontada nos dias 26/11/2013, 20/12/2013 e 21/01/2014.



A Figura 16 mostra a oscilografia para um curto-circuito monofásico com a depleção da onda de tensão da fase A de 0,6 pu de magnitude a duração inferior a 1 ciclo conforme observado.

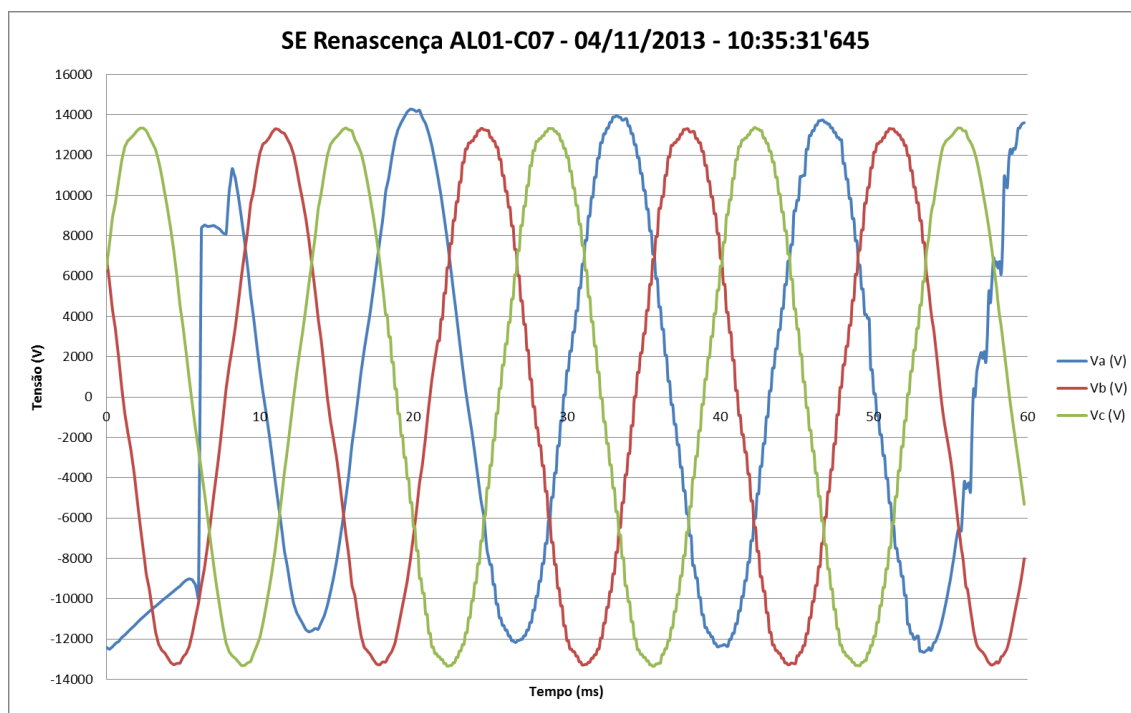


Figura 16 – Oscilografia para afundamento monofásico no alimentador AL01-C07

A Figura 17 mostra a oscilografia obtida para um afundamento bifásico da fase B e fase C atingidas pelo distúrbio. O método de Bollen indica que o tipo de afundamento B. Foi registrada pela operação a proteção de sobrecorrente e indicação de falha transitória no alimentador para a falta registrada. Esses eventos poderiam provocar funcionamento inadequado em equipamentos de consumidores afetados.

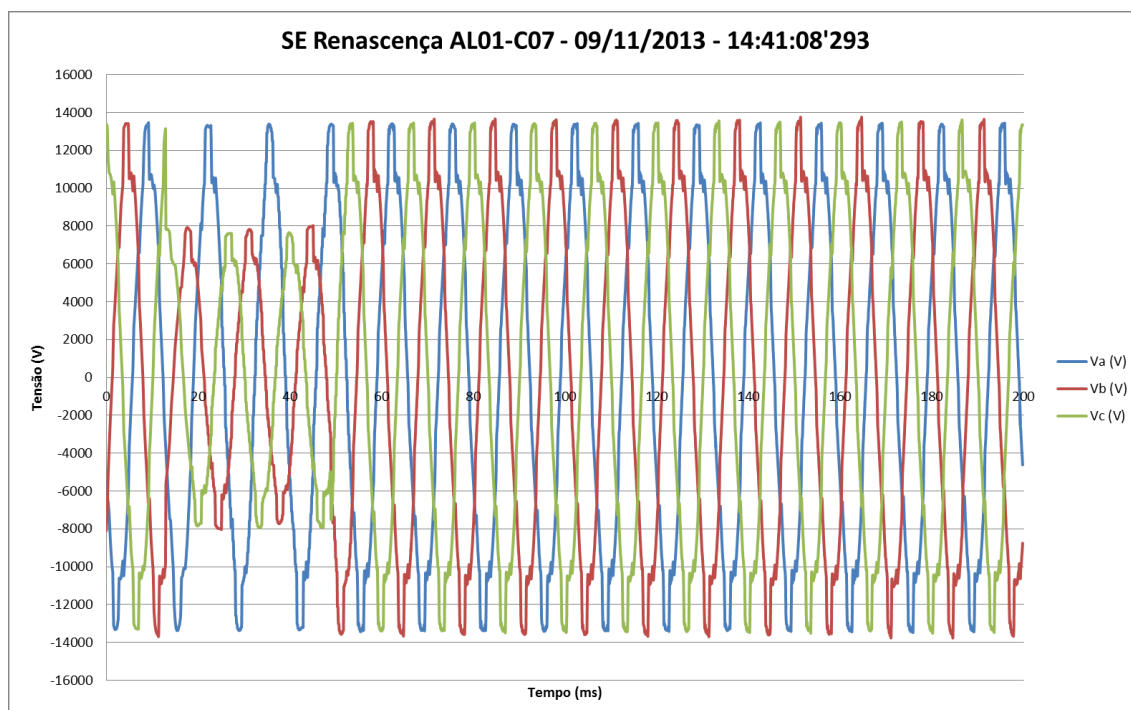


Figura 17 - Oscilografia para afundamento bifásico no alimentador AL01-C07

A Figura 18 mostra a oscilografia obtida para um afundamento bifásico à terra das fases B e C do circuito. O tipo B a partir da classificação do método de Bollen. Foi registrada pela operação a proteção de sobrecorrente e indicação de falha transitória no alimentador para a falta registrada.

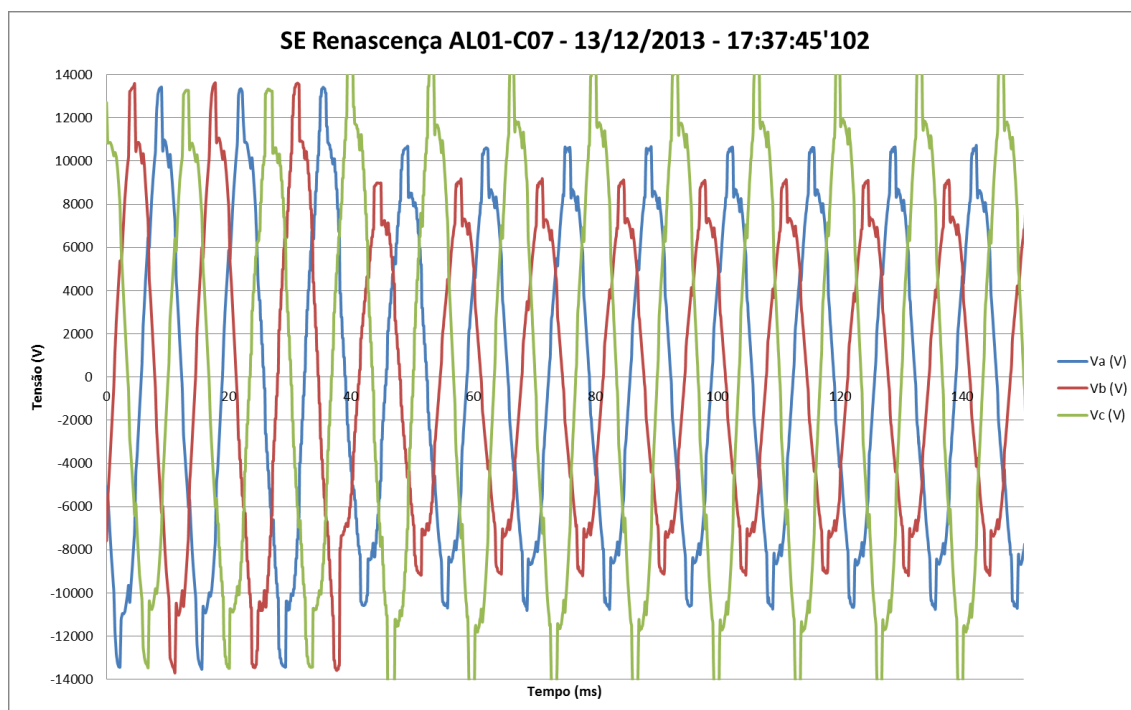


Figura 18 – Oscilografia para afundamento bifásico à terra no alimentador AL01-C07

Na Figura 19 temos a oscilografia coletada para um afundamento trifásico de único registro do tipo encontrado. Verifica-se o tipo A pela da classificação do método de Bollen. Foi registrada pela operação a proteção de sobre corrente e indicação de nova falha transitória no alimentador para a falta registrada.

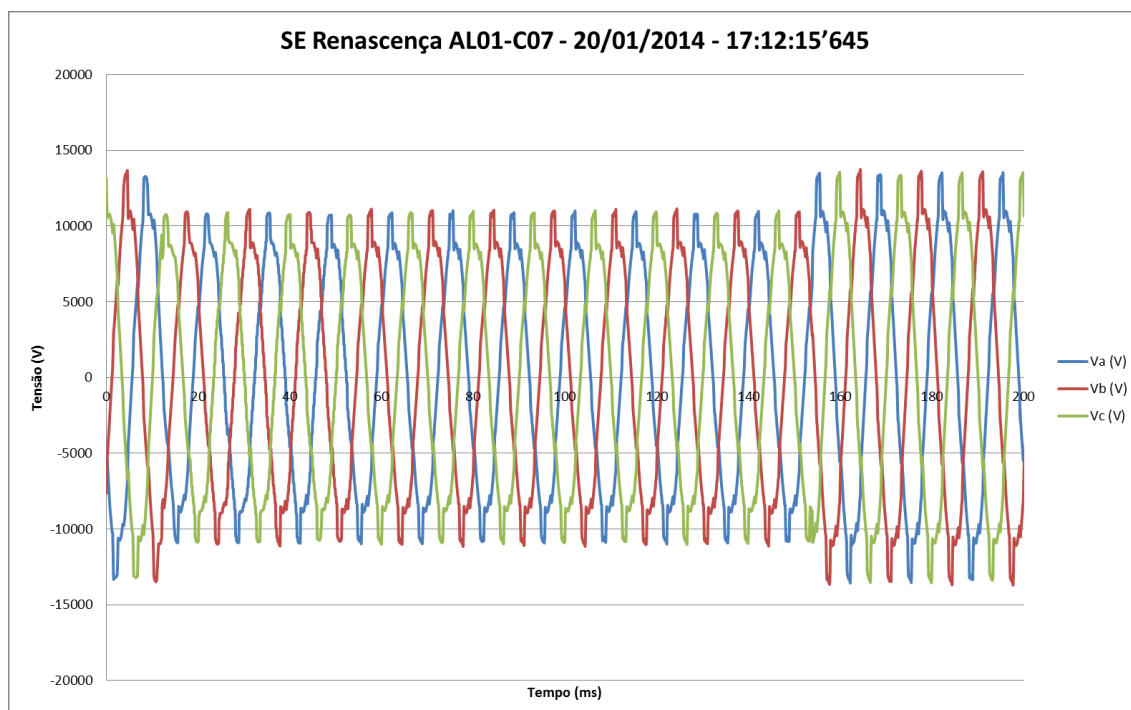


Figura 19 - Oscilografia para afundamento trifásico no alimentador AL01-C07

A Figura 20 exibe os resultados obtidos com análise dos afundamentos de tensão em termos de amplitude por meio de histograma de distribuição dos distúrbios.

Podemos verificar que os afundamentos momentâneos de tensão mais verificados foram obtidos entre 0,8-0,85 pu para um número total de 15 eventos. Observa-se que não houve registros de afundamentos para amplitudes inferiores a 0,4 pu o que era esperado em função da atuação da proteção de sobrecorrente para extinção do problema da falta no ponto avaliado.

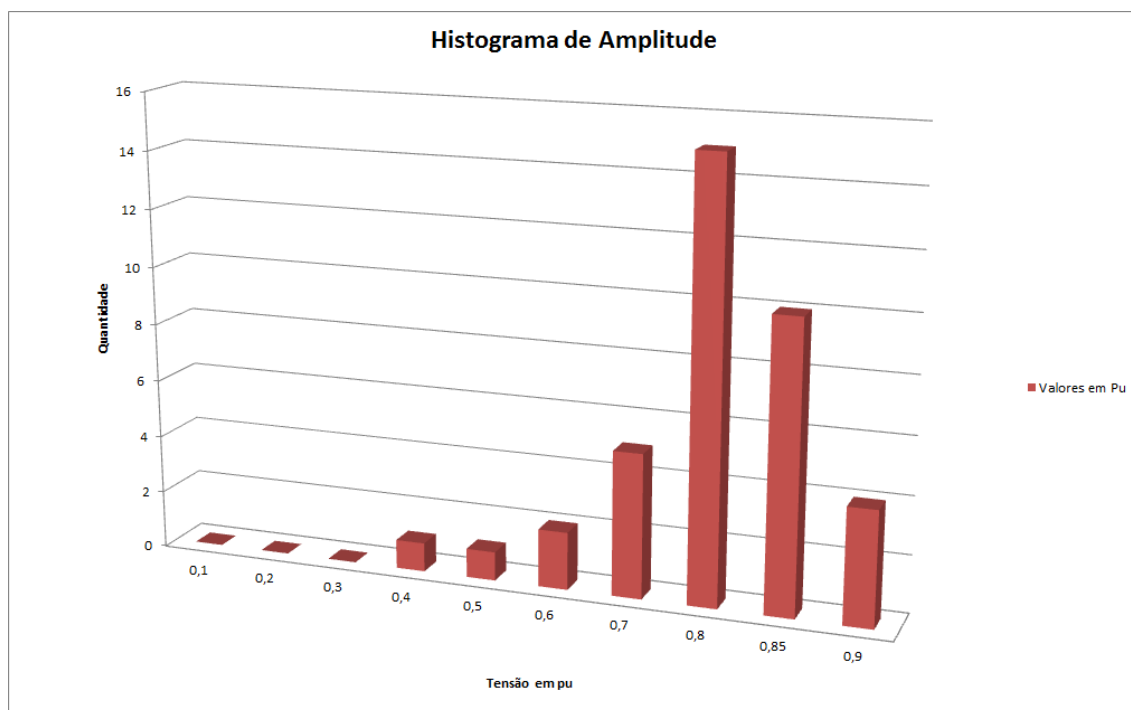


Figura 20 – Histograma das medições de afundamento de tensão registradas em termos de amplitude.

A Figura 21 exibe um gráfico com o erro percentual avaliado para os valores de magnitude dos afundamentos de tensão avaliados e a classificação dos afundamentos de tensão simulados para a Regional Teresina no alimentador AL01-C07 da SE Renascença.

Pode-se apurar que para o critério de magnitude os resultados da simulação dentro das classes de duração do afundamento de tensão mostram-se adequados para as medições obtidas no sistema.

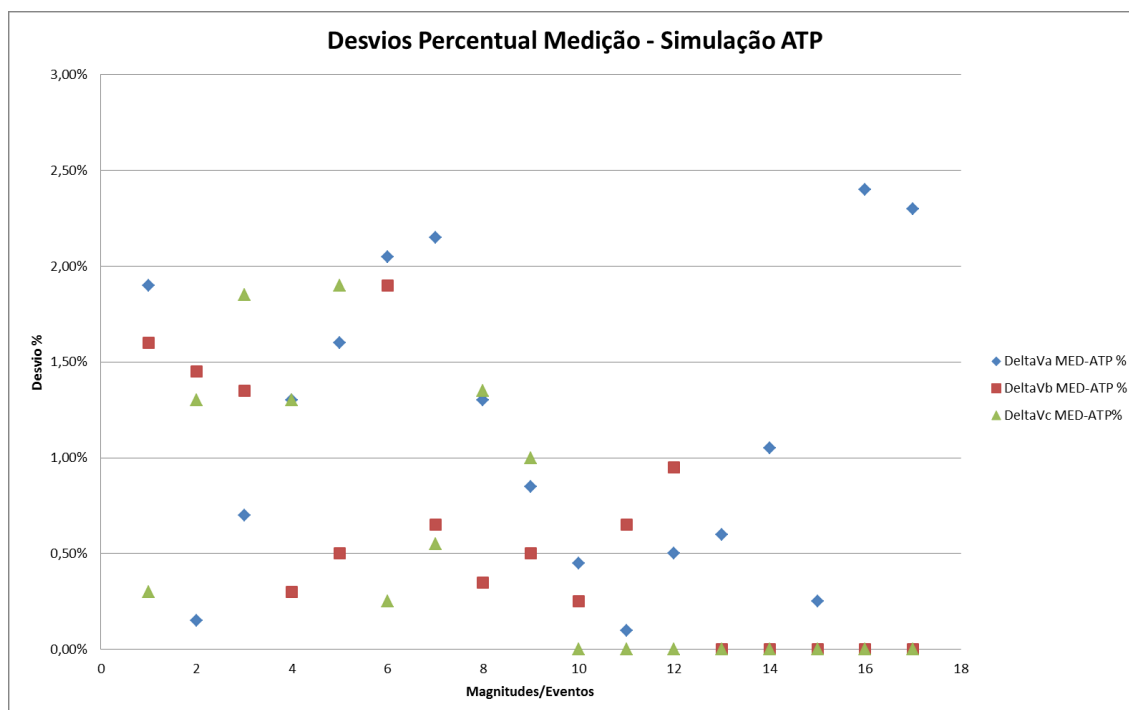


Figura 21 – Comparação estatística entre as medições e eventos simulados

### 5.3 Módulos de avaliação dos afundamentos

A seguir temos a ferramenta de análise proposta para os afundamentos de tensão a partir das informações observadas:

O formulário de abertura é apresentado pelas Figuras 22 e 23 com a identificação de usuário e senha para o acesso ao sistema em desenvolvimento. Com o nerSAG ® ferramenta em desenvolvimento como produto do projeto de P&D das distribuidoras do grupo Eletrobrás, tais empresas poderão utilizar como auxílio no desempenho das atividades recorrentes das áreas de Mercado, Planejamento e Operação.



Figura 22 - Telas Principal de Acesso do software nerSAG.

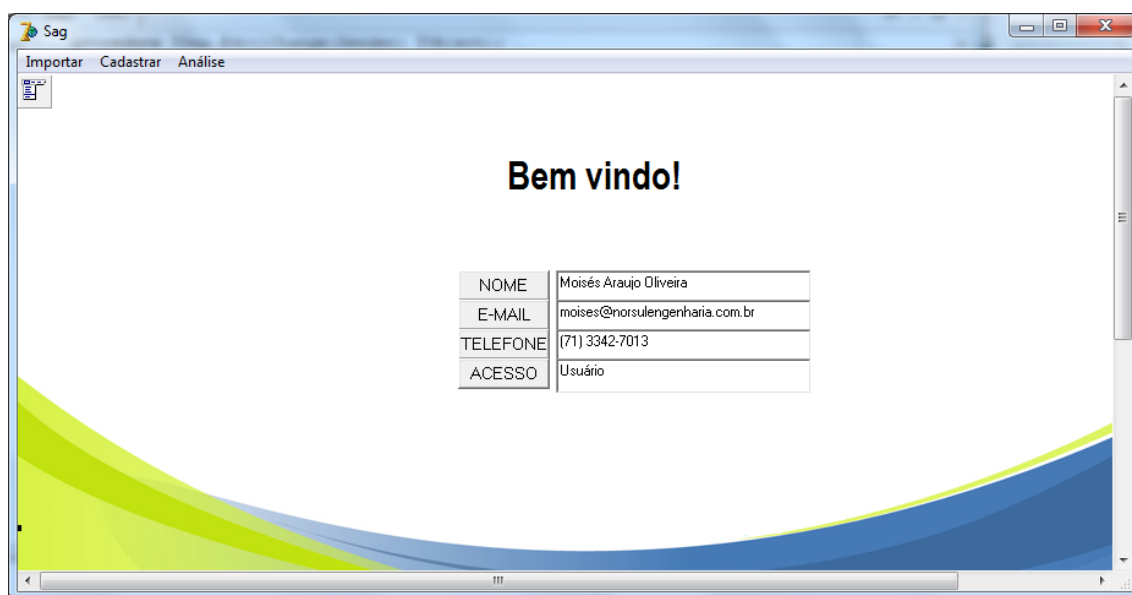


Figura 23 – Tela inicial de Entrada do nerSAG.

A Figura 24 indica o menu para importação do padrão de arquivo em excel gerado pelo software analisador do PQ-600 e também dos dados obtidos pelo arquivo de simulação do ATP com os registro de tensão.

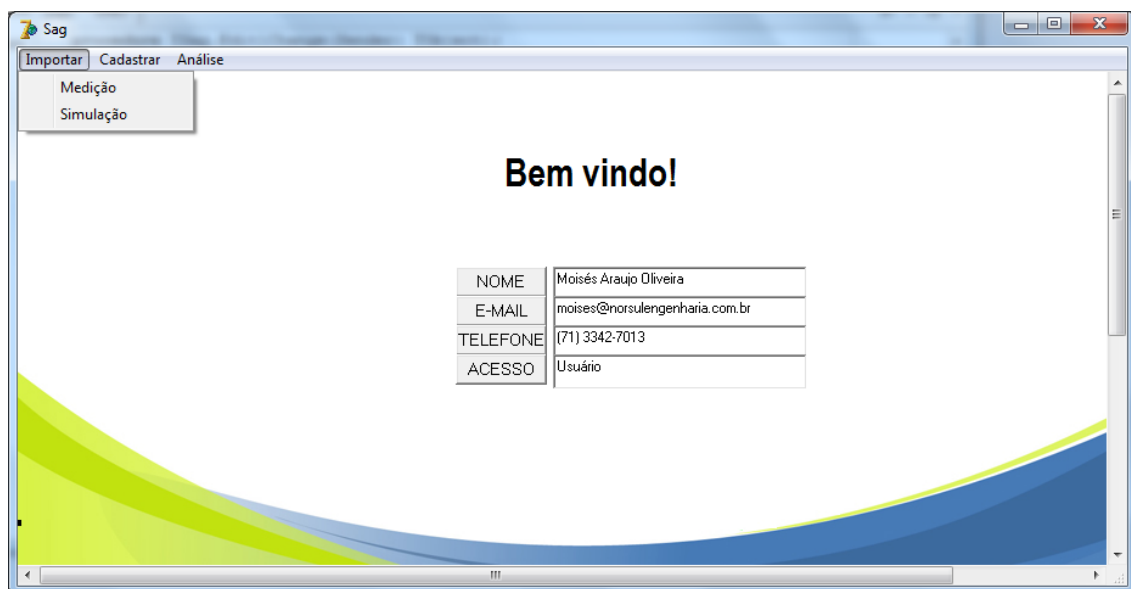


Figura 24 – Tela de importação das medições.

A Figura 25 apresenta o módulo de cadastro para as opções de banco de dados das subestações existentes, com os alimentadores e sua extensão em km, capacidade de potência nominal, tensões de transformação das subestações para o segmento da operação.

Nesse contexto também será possível importar uma planilha excel com o arquivo gerado pelo monitor de qualidade de energia bem como um arquivo de texto com os dados pertinentes ao pontos em que forem inseridos medidores nas barras de interesse da simulação.

Em termos de Planejamento do sistema, a ferramenta permite hoje inserir dados relativos às obras com a sua data de execução prevista e contratada, e aprimorar a tomada de decisão para a inclusão de novos consumidores mediante as informações obtidas para o monitoramento da qualidade de energia no tocante aos afundamentos de tensão nas linhas de transmissão bem como para a rede de distribuição.

O setor de Mercado das concessionárias pode-se beneficiar da correlação dos registros de distúrbios de AMT no sistema com os dados reportados pelo nerSAG®, obtendo assim maiores subsídios técnicos para justificar processos relativos à expansão do sistema.



Figura 25 – Área de cadastro dos parâmetros da subestação

A Figura 26 apresenta a tela com a exposição do histograma a partir da escolha de uma subestação e o nível de tensão monitorado para a propagação dos distúrbios de afundamento de tensão. A proposta é a ampliação com a comparação dos dados relativos a localização da falta por meio das técnicas de curto deslizando realizadas juntamente com a simulação.

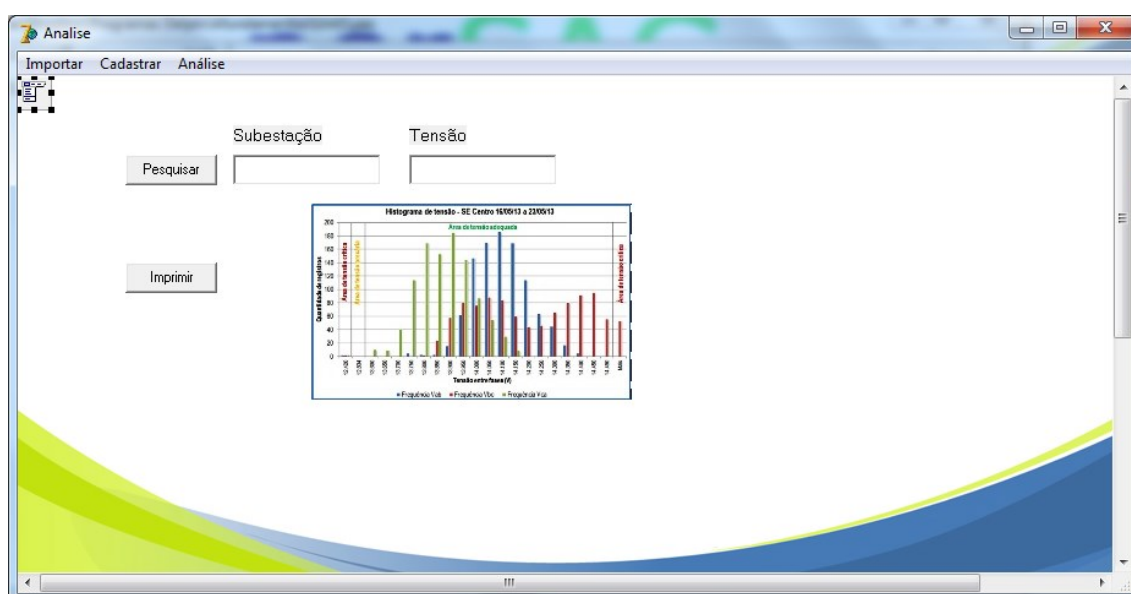


Figura 26 – Tela com histogramas gerados para classificação dos afundamentos.

## 6 CONCLUSÕES

Esta monografia apresentou uma proposta de avaliação para monitoramento do sistema de distribuição frente aos afundamentos de tensão. A metodologia proposta apresentou desde a definição do analisador, o ponto para o monitoramento da qualidade de energia; a escolha do procedimento de caracterização dos afundamentos de tensão e a aplicação da análise dos afundamentos a partir de ferramenta computacional com dados simulados para o sistema.

A caracterização dos afundamentos de tensão segundo metodologias para a classificação dos tipos durante a ocorrência do distúrbio foi realizada com sucesso embora uma maior amostra de registros de afundamentos seria ideal para a tipificação tipos de AMT.

A comparação mostrou-se satisfatória para os dados simulados e a medição realizada em função dos valores de erro e desvio padrão compatíveis concordando com a literatura existente.

A metodologia de sistematizar a caracterização dos distúrbios ocorridos no ponto do sistema elétrico monitorado com a ferramenta de análise mostrou-se promissora com os dos dados simulados e da campanha de medição realizada num único ambiente de trabalho. Esse ambiente, aliado a possibilidade de emissão de gráficos e geração de relatórios de forma automática, deverá auxiliar de maneira eficiente a análise das variações de tensão nos sistemas elétricos.

Uma sugestão de trabalhos futuros inclui a análise de diferentes índices de caracterização com a perda de tensão, perda de energia, mapeamento das zonas críticas e das áreas de vulnerabilidade para as campanhas de medição em consumidores com cargas perturbadoras, com a mesma ferramenta de análise em desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** Revisão 4. Brasília, 2012;
- [2]. ANEEL. **Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica.** Brasília, 2012;
- [3]. ALMEIDA, C. F. M. **Metodologia para Monitoração Eficiente de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas Elétricos de Potência.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, 2007;
- [4]. ANDO JUNIOR, O. H. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificar e Quantificar Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre – RS, 2009;
- [5]. ARRUDA, E. F. **Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo – USP, São Carlos – SP, 2003;
- [6]. BRADLEY, D. **Manutenção Preditiva – A Chave da Qualidade de Energia.** Rhopoint Systems Ltd., Abril, 2002;
- [7]. BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A.; COSTA, F. B. **Automação na Análise de Ocorrências: a Contribuição da Chesf para o Desenvolvimento de Novas Técnicas.** In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém - PA, 2010;
- [8]. CABRAL, R. J. **Análise Numérica de Curto Circuito Utilizando Componentes Simétricas e Componentes de Fases para Obter Índices de Afundamentos de Tensão.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2010;
- [9]. CAMPICI, P. P. F. **Afundamentos de Tensão no Contexto da Expansão dos Sistemas Elétricos: Proposta de Índices Considerando Dados do Sistema de**

- Deteção de Descargas Atmosféricas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2009;
- [10]. CÂNDIDO, C. K. S. S. **Classificação de Distúrbios na Rede Elétrica Usando Redes Neurais e Wavelets.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal – RN, 2008;
- [11]. CHAPMAN, D. **Introdução à Qualidade de Energia.** Cooper Development Association, April, 2002;
- [12]. CHAPMAN, D. **Os Custos da Má Qualidade de Energia.** Cooper Development Association, April, 2002(a);
- [13]. ELETROBRÁS DISTRIBUIÇÃO PIAUÍ – Departamento de Operações – Gerência de Engenharia da Transmissão;
- [14]. FERREIRA, D. D. **Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro – RJ, 2010;
- [15]. FONSECA, M. C. P. **Sistema de Apoio à Tomada de Decisão para Atribuição de Responsabilidade por Perda de Qualidade de Energia devido à Variação de Tensão de Curta Duração.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará - UFPA Belém-PA 2009.
- [16]. HØIDALEN, H. KR. **ATPDraw - Graphical Preprocessor to ATP-EMTP. Windows version.** Disponível no sítio <http://www.ece.mtu.edu/atp/ATPDraw/ATPDraw.html>. Acessado em 01/11/2012;
- [17]. IMS, POWER QUALITY. **PowerNET PQ-600: Analisador de Qualidade de Energia. Revisão do Manual 2.0.4,** Agosto, 2012;
- [18]. KEMPNER, T. R. **A Robustez de um Sistema de Distribuição e a Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica Frente aos Afundamentos de Tensão.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo – USP, 2012;
- [19]. LEAL, M. F.; FONSECA, H. L. C. A. **Análise de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando o Atpdraw.** Monografia de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília – UnB, Brasília – DF, 2003;

- [20]. LIMA, M. A. A. **Análise de Componentes Independentes Aplicada em Distúrbios de Qualidade de Energia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora - MG, 2009;
- [21]. MEDEIROS, M. O. B. **Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2003.
- [22]. MENDES, W. R. **Influência da Conexão dos Transformadores de Potência na Propagação dos Afundamentos de Tensão pelo Sistema Elétrico**. Dissertação de Mestrado em Ciências. Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 2008.
- [23]. MENEZES, T. V. **Estratégia para Análise de Afundamento de Tensão no Planejamento do Sistema Elétrico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2007;
- [24]. NEXANS, **Alumínio Condutores Nus - Cabos de alumínio nu com alma de aço - CAA - Dados técnicos**, 2013.
- [25]. NOVAES, E. G. C. **Validação de ferramentas de simulação de afundamentos de tensão através de medições**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2007.
- [26]. OLIVEIRA, T. C. **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão**. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, Outubro 2004;
- [27]. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS, **Submódulo 2.8 Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes**, 2011.
- [28]. RAMOS, A. C. L. **Avaliação dos Impactos da Impedância de Falta e da Geração Distribuída em Estudos de Afundamentos de Tensão**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal de Goiás – UFG, 2009;
- [29]. VALE, M. H. M. *et. al.* **Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Análise de Afundamento de Tensão Aplicada ao Planejamento da Expansão – PlanSag**. In VII CITENEL III SEENEL, Rio de Janeiro, 2012.