

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**ESTIMADOR DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA
DURAÇÃO PARA REDES DE SUBTRANSMISSÃO**

Carlos Frederico Meschini Almeida

PROJETO DE FORMATURA/2003

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



PROJETO DE FORMATURA / 2003

**ESTIMADOR DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA
DURAÇÃO PARA REDES DE SUBTRANSMISSÃO**

ALUNO: Carlos Frederico Meschini Almeida
ORIENTADOR: Nelson Kagan
COORDENADOR: Carlos Márcio Vieira Tahan

DEDICATÓRIA

Dedico este projeto ao meu pai, engenheiro Carlos Alberto Almeida, em quem sempre me espelhei, devido a inteligência e caráter e que motivou o meu ingresso na Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os colaboradores do ENERQ (Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia) que participaram do projeto *“Metodologia para Monitoração Eficiente da Qualidade de Energia Elétrica em um Sistema de Subtransmissão e de seu Suprimento”* desenvolvido para a CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) em particular, agradeço a Pedro Rosa, Nelson Matsuo, Silvio Xavier, Eduardo Ferrari, Luciano Camilo e Silva, Tânia Arango e André Meffe.

Agradeço ao Professor Doutor Nelson Kagan pela oportunidade de participar de projetos modernos, o que me levou a conhecer esse projeto em especial, e pelo apoio no entendimento e desenvolvimento das suas etapas.

Também agradeço ao Professor Doutor Carlos Márcio Vieira Tahan pela coordenação, e a minha família e a minha namorada pela compreensão e apoio durante todo o projeto.

ÍNDICE

1. RESUMO	página 01
2. SUMMARY	página 02
3. INTRODUÇÃO	página 03
3.1. Justificativa para o projeto	página 03
3.2. Objetivo	página 04
4. A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	página 06
4.1. Introdução	página 06
4.2. Conceituação	página 07
4.3. Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs)	página 07
4.3.1. Principais efeitos	página 12
4.3.2. Indicadores de VTCDs	página 16
5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ESTIMAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	página 21
5.1. Medidores de Qualidade de Energia	página 22
5.2. Processamento inicial dos dados (Módulo 1)	página 23
5.3. Arquivos de dados de medições	página 24
5.4. Controlador de transmissão de dados (Módulo 2)	página 25
5.5. Banco de dados da rede	página 25
5.6. Fluxo de potência (Módulo 3)	página 26
5.7. Curto-circuito (Módulo 4)	página 26
5.8. Arquivos de dados de simulações	página 28
5.9. Estimação (Módulo 5)	página 29
5.10. Arquivos de medições virtuais	página 30
5.11. Determinação dos indicadores de VTCDs (Módulo 6)	página 30

6. O ESTIMADOR DE VTCDs**página 31**

6.1. O método dos mínimos quadrados

página 31

6.2. Localização da falta

página 31

6.3. Descrição do Funcionamento do Estimador de VTCDs

página 33

6.3.1. Tabela de valores calculados nas simulações

página 35

6.3.2. Pontos contemplados nas tabelas

página 35

6.3.3. Pontos a serem representados nas simulações

página 35

6.3.4. Impedâncias de falta

página 36

6.3.5. Falhas a montante do ponto de suprimento

página 37

6.3.6. Informações de correntes monitoradas

página 37

7. APLICATIVOS**página 38**

7.1. O Funcionamento

página 38

7.2. O EDITOR

página 40

7.2.1. Apresentação do ambiente computacional

página 40

7.2.2. Editando a rede

página 42

7.3. O ESTIMADOR

página 43

7.3.1. Apresentação do ambiente computacional

página 43

7.3.2. Navegando pelas contingências registradas no banco de dados

página 44

7.4. O ESTATÍSTICAS

página 47

7.4.1. Apresentação do ambiente computacional

página 47

7.4.2. Eventos e Lista de Eventos

página 49

7.4.3. Apresentação do ambiente computacional

página 51

8. RESULTADOS OBTIDOS**página 63**

8.1. Procedimentos para avaliação

página 63

8.2. Contingências consideradas

página 63

8.3. Exemplos de forma de onda de tensão e corrente obtidas das simulações com ATP

página 66

8.4. Valores de tensões obtidos com o ATP

página 70

8.5. Análise dos resultados

página 75

**9. CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E FUTUROS
DESENVOLVIMENTOS**

página 78

10. BIBLIOGRAFIA

página 81

ANEXO I

página 83

1. RESUMO

Este relatório apresenta uma metodologia utilizada para estimar as Variações de Tensões de Curta Duração (VTCDs) em sistemas de subtransmissão.

A estimação é realizada por meio de um aplicativo (**Estimador de VTCDs**) que recebe dados de medições de alguns pontos da rede em avaliação, processados adequadamente. Com esses dados e informações sobre a condição de operação e configuração da rede, o **Estimador** executa diversos módulos, que permitem localizar a falta e para a estimação das VTCDs.

O diagnóstico final é composto por uma série de indicadores de VTCDs que refletem o comportamento da rede frente ao fenômeno de qualidade de energia em questão.

2. SUMMARY

This project presents a methodology used to estimate voltage Sags and Swells in sub transmission systems.

The estimation is realized by a software (**Estimador de VTCDs**) that receives data of measurements in some points of the system in study. With these data and the information about the operation condition and the configuration of the system, the **Estimador** executes a few modules that allow locating the fault and reaching a final diagnosis.

The final diagnosis is composed by a series of proposed indicators that shows how a sub transmission system reacts from these quality power's phenomena.

3. INTRODUÇÃO

3.1. Justificativa para o projeto

Para avaliar adequadamente a Qualidade de Energia de um sistema elétrico é necessário obter informações que caracterizem o comportamento de todos os pontos que o compõem. Porém, a obtenção dessas informações através de medições locais é praticamente inviável, devido à grandeza dos sistemas envolvidos; o que torna essa metodologia de medição bastante onerosa, por requerer uma elevada quantidade de equipamentos sofisticados.

Uma alternativa mais econômica é proposta por algumas metodologias de estimação do comportamento de alguns dos pontos de um sistema elétrico perante contingências têm sido desenvolvidas. Assim, quando ocorrem fenômenos de *Variações de Tensão de Curta Duração* (VTCDs), devido as faltas a que este pode vir a ser submetido (de diferentes tipos – fase-terra, dupla fase, trifásica, etc.; e em diferentes locais); essas metodologias permitem a avaliação global do sistema através da determinação de índices de desempenho..

Para sistemas elétricos de subtransmissão, essas metodologias envolvem o desenvolvimento de aplicativos que, utilizando as informações captadas durante a ocorrência das faltas por um número limitado de medidores de Qualidade de Energia (instalados em apenas alguns pontos do sistema em avaliação), realizam um processamento que permite:

- inicialmente, localizar o ponto onde a falta aconteceu;
- e, em seguida, estimar o comportamento da tensão dos outros pontos (onde não há medidores instalados).

Desta forma, torna-se possível promover a avaliação de todo um sistema elétrico, com referência aos fenômenos de VTCDs, sem a necessidade de instalar medidores em todos os pontos do mesmo.

Além disso, esses aplicativos, se executados de forma “on-line” pelo setor de manutenção das concessionárias que detêm o sistema elétrico em avaliação, também podem fornecer informações úteis, por fornecerem a localização do ponto em que se deu a falta, possibilitando maior agilidade no atendimento das ocorrências e restabelecimento dos desligamentos.

3.2. Objetivo

Pelo presente projeto pretende-se **desenvolver módulos que estimem as variações de tensão de curta duração para sistemas de subtransmissão (Estimador de VTCDs)**.

O **Estimador de VTCDs** constitui-se no núcleo do **Sistema de Estimação de Variações de Tensão de Curta Duração**, que vem sendo desenvolvido pelo ENERQ - Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia da Universidade de São Paulo, para a CELPE – Companhia Energética de Pernambuco, no projeto: “*Metodologia para Monitoração Eficiente da Qualidade de Energia Elétrica em um Sistema de Subtransmissão e de seu Suprimento*”.

Trata-se, portanto, de um sistema composto por:

- um conjunto de equipamentos de medição (medidores de Qualidade de Energia);
- computadores locais;
- softwares que exercem as funções de processamento inicial de dados;
- sistemas de comunicação e transmissão de dados;
- controle de transmissão de dados;
- computador central;

- softwares que exercem a parte principal do sistema de estimação de VTCDs.

No qual o **Estimador de VTCDs** constitui esses últimos softwares. Assim, ele é o módulo que realizará a análise dos fenômenos de VTCDs propriamente dita, ou seja, ele é o aplicativo que, a partir das informações de medidores de Qualidade de Energia, localizará o ponto de ocorrência da falta, estimará o comportamento das tensões para todos os demais pontos de interesse e fornecerá uma avaliação do comportamento de todo o sistema elétrico em estudo para os fenômenos de VTCDs captados.

Os aplicativos serão desenvolvidos em linguagem C++, utilizando o software C++ Builder 5 da Borland.

4. A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1. Introdução

A crescente preocupação com a Qualidade de Energia dos últimos anos foi motivada, basicamente, por dois aspectos:

- a *evolução tecnológica da sociedade*;
- e, a *reestruturação do setor elétrico*.

A *evolução tecnológica da sociedade* revelou-se através da irreversível automação dos processos industriais. A fim de desfrutar dos aumentos da produtividade, flexibilidade, conforto e qualidade dos produtos industriais, proporcionados pela automação; as cargas tornaram-se mais sensíveis, com relação à variação da sua tensão de alimentação e mais perturbadoras com o uso em maior escala da eletrônica de potência.

A *reestruturação do setor elétrico* trouxe a competitividade. E a energia elétrica tornou-se um produto comercial, e, por isso, a ser vista não só sobre a ótica da continuidade, mas, também, de sua conformidade. Assim, as empresas que fornecem energia com maior qualidade e com menor custo ocupam uma posição privilegiada no mercado energético, por terem um produto diferenciado.

A preocupação com Qualidade de Energia Elétrica (QE) é recente. Ela, originalmente, surgiu devido da mudança da natureza das cargas elétricas, ou seja, as cargas que no passado eram predominantemente eletromecânicas e hoje são, na sua maioria, eletro-eletrônicas. Esta evolução na característica das cargas foi motivada por permitir melhorias na qualidade de vida moderna e na produção. Exemplos disso são: o crescimento na utilização de equipamentos constituídos por fontes de alimentação em corrente contínua nas residências, devido a evolução na fabricação dos mesmos, que os tornaram mais acessíveis; e a própria indústria brasileira que, nos últimos anos, investiu, e continua investindo, na automação de seus processos produtivos, na busca de melhor

qualidade e maior produtividade, para fazer frente à concorrência internacional, originada da globalização. Com isto os sistemas e processos tornam-se mais vulneráveis a distúrbios que antes não causavam danos nenhum, sendo considerados desprezíveis. Hoje em dia, estes devem ser tratados com maior atenção devido à gravidade das consequências que possam vir a causar.

4.2. Conceituação

O termo QUALIDADE DE ENERGIA (QE) é utilizado para caracterizar qualquer variação de amplitude e/ou de frequência, e conseqüentemente de valor eficaz, e/ou ainda, qualquer deformação da forma de onda das grandezas elétricas, quer seja em condições de regime transitório ou permanente em um sistema elétrico de energia, que possa vir a causar a falha ou o mau funcionamento de equipamentos elétricos. As grandezas elétricas básicas consideradas são as tensões e correntes e, conseqüentemente, as grandezas derivadas: potência, fluxo eletromagnético, etc.

De uma forma mais restrita a Qualidade de Energia é também conceituada como a preocupação com a qualidade de tensão fornecida pela concessionária no ponto de entrega ao cliente, a fim de garantir o bom desempenho das suas cargas.

4.3. Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs)

As Variações de Tensão de Curta Duração são distúrbios na amplitude ou valor eficaz de tensão com duração inferior a 1 minuto e superior a 0,5 ciclo da sua componente fundamental (aproximadamente 8 milissegundos). Geralmente, as causas deste distúrbio estão relacionadas às faltas, chaveamentos de grandes blocos de cargas e partidas de motores.

As Variações de Tensão de Curta Duração podem ser caracterizadas por uma subtensão, sobretensão ou uma interrupção em função da variação do valor eficaz da tensão monitorada.

Uma Subtensão de curta duração, também conhecida como **AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO, ou DEPRESSÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO, ou "VOLTAGE SAG", ou "VOLTAGE DIP"**, é definida como qualquer diminuição no valor eficaz da tensão para valores entre 10% a 90% do valor nominal do sistema com duração 0,5 ciclo a 1 minuto, voltando, em seguida, ao restabelecimento da tensão nominal. A Figura 4.1 ilustra este tipo de distúrbio.

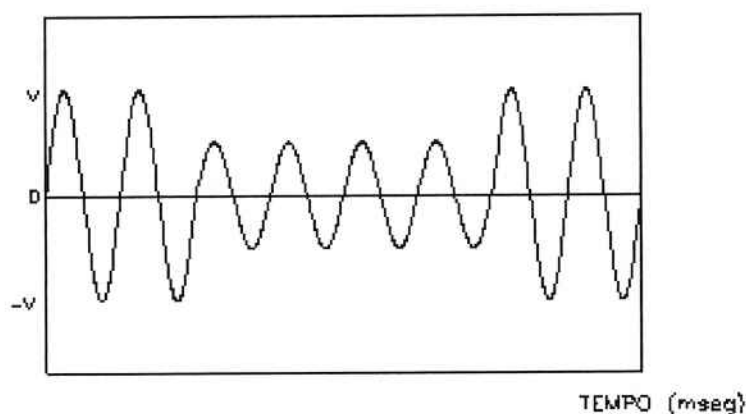


Figura 4.1 – Afundamento de Tensão de Curta Duração (SAG)

Uma Sobretensão de Curta Duração, também conhecida como **ELEVAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO, SALIÊNCIA DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO, ou "VOLTAGE SWELL"**, é definida como qualquer aumento no valor eficaz da tensão para valores acima de 110% do valor nominal do sistema, com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto, voltando, depois, ao restabelecimento da tensão nominal. A Figura 4.2 ilustra este tipo de distúrbio.

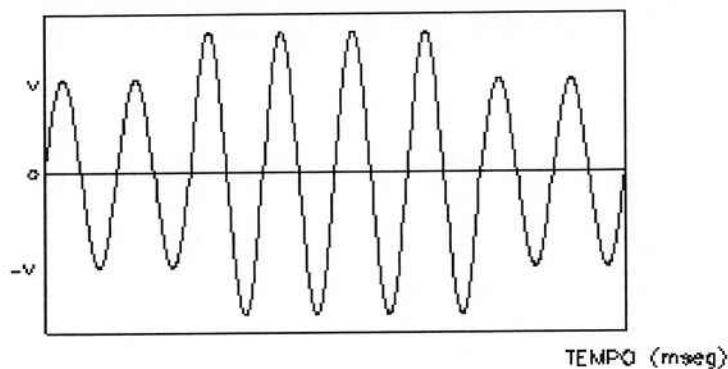


Figura 4.2 – Elevação de Tensão de Curta Duração (SWELL)

Uma **INTERRUPÇÃO DE CURTA DURAÇÃO** é definida como qualquer diminuição no valor eficaz da tensão para valores abaixo de 10% do valor nominal do sistema, ou até a perda da tensão (valor eficaz nulo), com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto, voltando, depois, ao restabelecimento da tensão nominal. A Figura 4.3 ilustra este tipo de distúrbio.

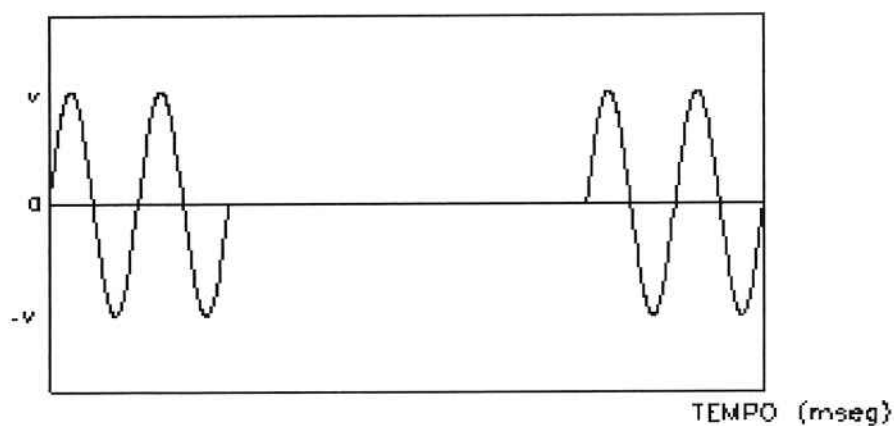


Figura 4.3 – Interrupção de Curta Duração

As Variações de Tensão de Curta Duração ainda são subdivididas quanto à sua duração. Isso permite estabelecer índices de desempenho específicos de acordo com as constantes de tempo de cada categoria de equipamento. Portanto, elas são agrupadas nos seguintes intervalos:

- de 0,5 ciclo a 30 ciclos;
- 30 ciclos a 3 segundos;
- e 3 segundos até o limite mínimo das Variações de Tensão Permanentes (de longa duração), que é de 1 minuto (3600 ciclos).

Foi comprovado através de medições reais que a maioria destas perturbações estão compreendidas na faixa de 30 ciclos à 3 segundos [5].

As causas deste distúrbio são inúmeras. Entre elas podemos apontar:

- transitórios aleatórios (raios) ou repetitivos (manobras);
- a falta temporária na transmissão e distribuição;
- a partida de motores;
- a partida de cargas pesadas.

Os curtos-circuitos também são os maiores causadores de faltas temporárias nos sistemas elétricos, principalmente os do tipo fase-terra, no qual a fase defeituosa sofre um afundamento de tensão, enquanto as fases não defeituosas sofrem uma elevação de tensão. Eles são considerados os casos mais prováveis de origem das Variações de Tensão de Curta Duração (cerca de 83% das VTCDs são originadas por curtos-circuitos [6]). As descargas atmosféricas estão entre os maiores causadores de curtos-circuitos, o que é justificado pela predominância de redes aéreas para a transmissão de energia.

A Variação de Tensão de Curta Duração pode atingir grandes áreas, dependendo do comprimento dos circuitos em que ela ocorra; e pode até mesmo atingir outros circuitos, onde não houve ocorrência de nenhum fenômeno de degradação da Qualidade de Energia. Basta lembrar que nas redes elétricas estes circuitos estão interligados por impedâncias finitas, que dependendo do tempo de duração e a intensidade do fenômeno causador do afundamento ou da elevação de tensão (variação na amplitude da tensão), permitem que o distúrbio seja propagado. Assim verifica-se que a falha ou defeito (no

caso, a falta) que motivou uma VTCD nem sempre esta próxima do local onde ela foi percebida. Esta falta pode ter sido originada em pontos remotos do sistema de distribuição ou transmissão.

Um exemplo clássico de Afundamento e Interrupção de Tensão de Curta Duração ocorre nos alimentadores primários dos sistemas de distribuição que têm religadores automáticos. De acordo com a Figura 4.4, quando ocorre uma falta temporária ou permanente no ponto “A” do alimentador, o religador atua interrompendo o trecho a jusante do circuito por um certo intervalo de tempo, a fim de possibilitar que a falta seja cessada por eliminação do evento que a propiciou e, em seguida, volta religar o circuito. Se a falta persistir, o religador prossegue sua seqüência de operação podendo, até, promover a interrupção permanente do trecho do circuito à jusante do ponto “A”, no caso de um defeito permanente. Durante a seqüência de operação do religador, os consumidores C2 e C3 sentirão provavelmente afundamentos de tensão de curta duração.

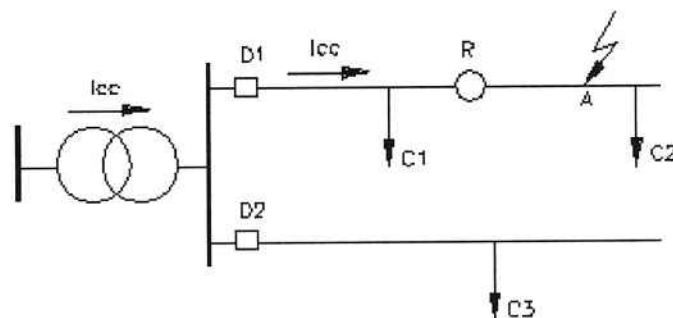


Figura 4.4 – Interrupção de Curta Duração

Na partida de grandes motores de indução, onde a corrente de partida pode chegar de 6 a 10 vezes da corrente nominal do motor. Isso provoca uma queda de tensão significativa no circuito podendo até ser observado como um afundamento de tensão.

4.3.1. Principais efeitos

As cargas industriais sensíveis, tais como: PLC's (Controladores Lógicos Programáveis) e ASD's (Acionamentos de velocidade variável) são vulneráveis à Flutuação de Tensão e as Variações de Tensão de Curta Duração. Assim, as VTCDs podem causar grandes prejuízos aos consumidores industriais, tornando-se assim imprescindível o seu controle para minimizar ou contornar as suas influências nos processos produtivos.

A influência das VTCDs nos equipamentos que compõem os processos produtivos, ou qualquer outro tipo de etapa de um determinado processo foi uma questão que preocupou inicialmente a indústria eletrônica, principalmente a de fabricação de componentes de computadores. Dessa forma, tentando averiguar a influência desses distúrbios nestes equipamentos sensíveis, desenvolvida experimentalmente uma curva de suportabilidade. Essa curva, proposta pela CBEMA - (*"Computer Business Equipment Manufacturers Association"*), mostra, estatisticamente, o comportamento dos equipamentos frente aos mais variados tipos de VTCDs (de diferentes amplitudes e de diferentes durações).

Essa curva foi a primeira forma eficiente de averiguar a influência das VTCDs e permitiu dimensionar uma ótima operação de equipamentos eletrônicos, quando coordenadas com as características do sistema de alimentação de energia elétrica em que estão instalados. A curva CBEMA é mostrada na Figura 4.5.

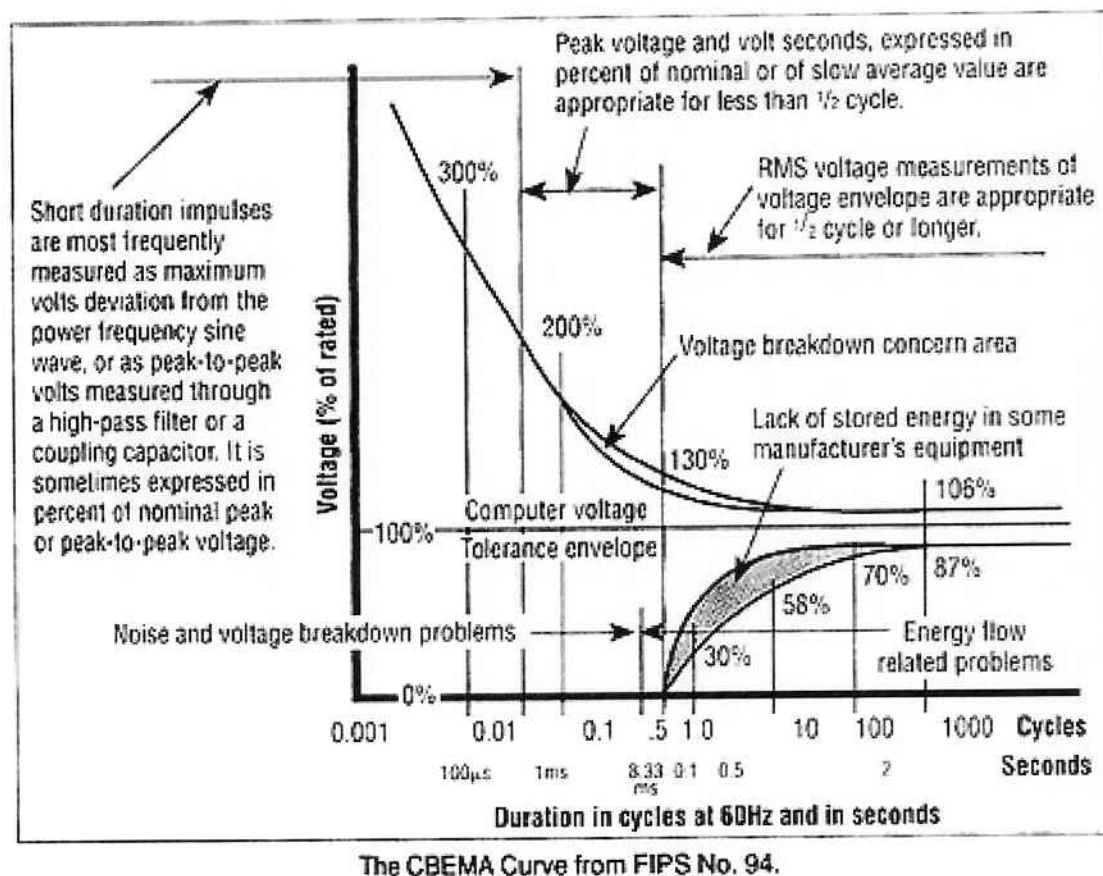


Figura 4.5 – Curva CBEMA

Depois desta curva, varias outras foram elaboradas de forma semelhante, uma para cada tipo de equipamento, como pode ser observado nas figuras que seguem (Figura 4.6 a 4.9).

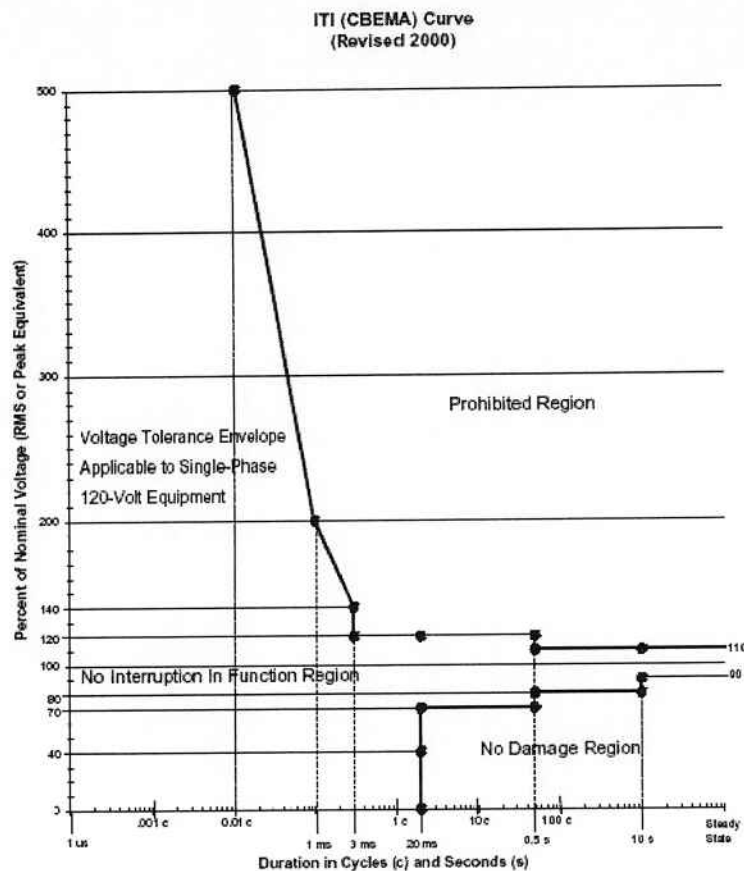


Figura 4.6 – Curva ITIC (Information Technology Industry Council)

A curva seguinte mostra a influência das VTCDs em ASDs (“Automatic Speed Drivers”). Ela exibe um outro grave efeito causado pelos fenômenos de VTCDs que é a falha de comutação em pontes de tiristores, afetando o disparo dos mesmos, o que pode vir a prejudicar o acionamento de máquinas.

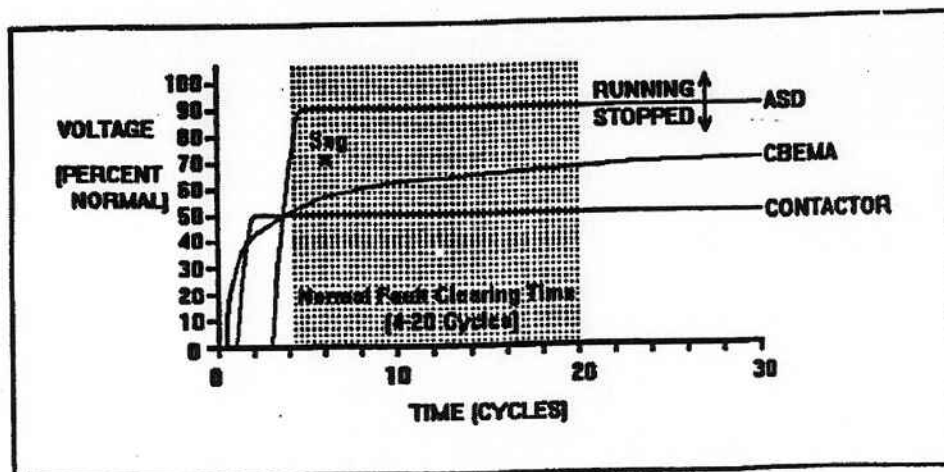


Figura 4.7 – Curva de influência em ASDs

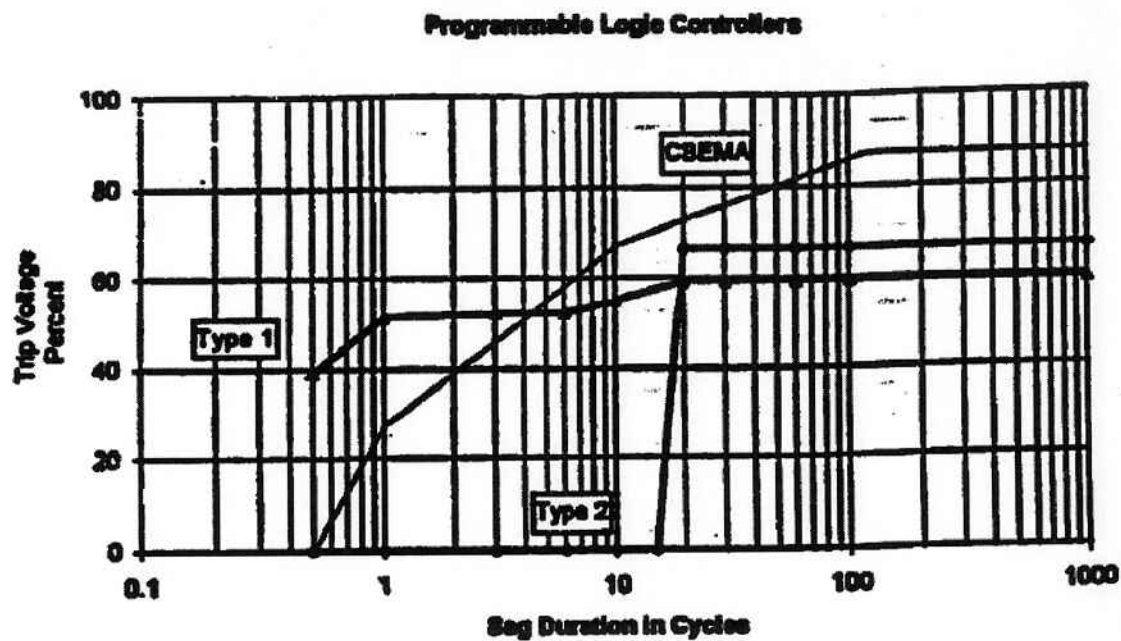


Figura 4.8 – Curva de influência em PLCs

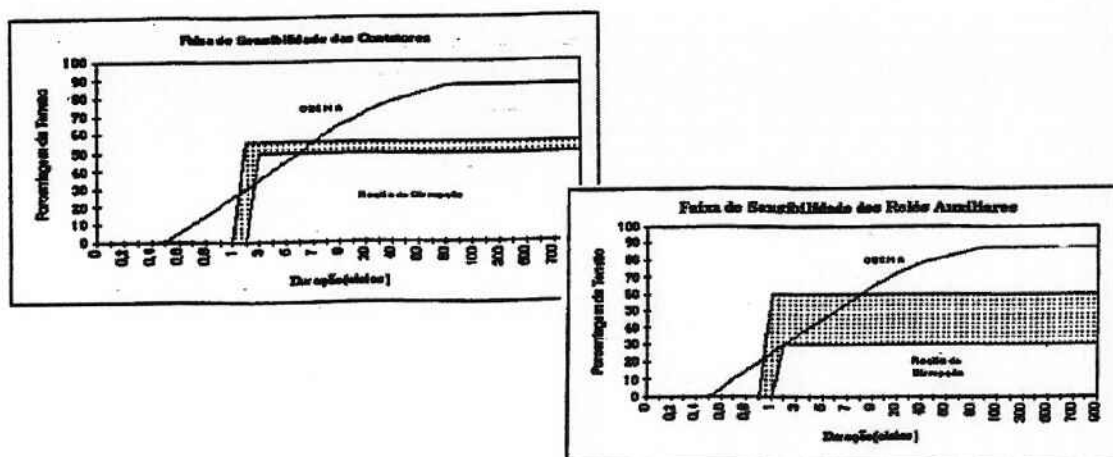


Figura 4.9 – Curva de influência em contadores e relés

Além destes efeitos uma Variação de Tensão de Curta Duração pode afetar equipamentos ou processos industriais mais tradicionais, tais como:

- variação na velocidade de motores e, dependendo do grau de severidade da variação, provocando até mesmo a parada dos mesmos;
- extinção de lâmpadas de descarga, que necessitam de uma tensão mínima para o seu funcionamento;
- a não mudança de estado em contadores e relés auxiliares, devido a falha de energização das bobina dos primeiro (Figura 4.9);
- perda de sincronismo de máquinas síncronas.

4.4. Indicadores de Qualidade de Energia

Para quantificar a Qualidade de Energia, o ideal seria definir e mensurar uma grandeza que poderia ser chamada de: indicador, índice, nível, fator, coeficiente ou grau de qualidade de energia. Esta grandeza variar-se-ia na faixa de 0 a 100%, de modo que:

100% corresponderia a uma condição ideal de Qualidade de Energia, 0% corresponderia a pior condição de Qualidade de Energia; enquanto que um número intermediário entre 0% e 100% que corresponderia a uma condição mínima necessária e suficiente para garantir o bom desempenho dos sistemas.

A grande variedade de distúrbios, sua complexidade e suas origens diversas já citadas impossibilitam a idéia de buscar uma grandeza única para quantificar a Qualidade de Energia Elétrica que englobe todos os distúrbios. Assim, analisar Qualidade de Energia diretamente é inviável, portanto, o que se vem fazendo é abordar este conceito indiretamente, identificando e medindo os fenômenos físicos que provocam a falha ou o mau funcionamento dos sistemas. Se estes fenômenos físicos, que causam distúrbios no sistema, forem controlados, minimizados ou até eliminados pode-se garantir um bom desempenho dos sistemas. Assim, quantificar Qualidade de Energia implica, atualmente, em quantificar as perturbações que causam a degradação da energia elétrica.

Vários indicadores estão sendo definidos pela comunidade científica ao longo dos últimos anos; cada um buscando medir e interpretar da melhor forma possível os distúrbios no sistema elétrico. Hoje, os indicadores tradicionais, em conformidade com a experiência nacional e internacional são temas de uma futura legislação brasileira no setor elétrico que se encontra em discussão.

Uma idéia que se poderia pensar seria definir a QUALIDADE DE ENERGIA DE UM BARRAMENTO do sistema, por exemplo, o barramento onde se encontra ligado um consumidor.

A Qualidade de Energia ideal fornecida ao consumidor pode ser definida como uma tensão senoidal com amplitude e frequência constante (ou valor eficaz constante) durante um tempo infinito. Do ponto de vista de sistema elétrico, pode-se definir um barramento ideal como aquele que está ligado a uma fonte de tensão ideal. Evidentemente que tal barramento é utópico, mas, se tal barramento existisse, poder-se-ia definir um indicador de qualidade Q igual a 100% para caracterizar uma Qualidade de Energia ideal deste barramento. O que mais se aproxima na realidade deste

barramento seria uma barra de usina com equipamentos de taxas de falha nulas e potência de curto-circuito infinita.

Agora, imaginando que o barramento ideal seja o de número 1, e que entre ele e o barramento de número 2, do qual se deseja observar a Qualidade de Energia, exista um sistema elétrico e ainda, que o barramento 2 está em vazio, ou seja, não há nenhum cliente nela conectado como mostra a Figura 2.10. Se o indicador de qualidade do barramento 1 e barramento 2 for, respectivamente, $Q1$ e $Q2$, pode-se concluir que $Q2 < Q1$ por quatro motivos que pode-se chamar de fatores de degradação da qualidade de energia. Eles são:

- *fator do sistema (fs)*, pois o sistema entre as duas barras é constituído de equipamentos que podem falhar e pode causar modificação na tensão do barramento 2;
- *fator do meio ambiente (fm)*, pois o sistema pode falhar por distúrbios externos que tem sua origem no meio ambiente;
- *fator humano (fh)*, pois o sistema pode falhar por operação indevida de uma intervenção humana;
- *fator do cliente (fc)*, pois este barramento pode estar ligado com um ou mais consumidores que podem afetar a sua tensão, devido a forma da corrente que estes outros consumidores estão absorvendo do sistema.

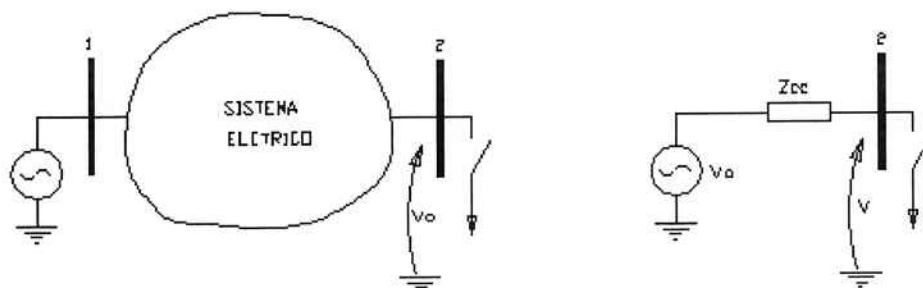


Figura 4.10 – Sistema Genérico e seu Equivalente

Assim o indicador de qualidade de energia do barramento 2 (**Q2**) observado é função de quatro fatores.

$$Q2 = Q(fs, fm, fh, fc) / 100 < 100\%$$

Buscar a função que relaciona estes fatores é o grande desafio. Sabe-se que esta função é probabilística, pois os fatores envolvidos são probabilísticos. E ainda, percebe-se que os fatores fs, fm e fh estão ligados com a disponibilidade da tensão na barra, ou seja, só se pode falar em qualidade de energia se há disponibilidade de energia na barra.

$$Q2 = D2(fs, fm, fh).fc / 100 < 100\%$$

Por outro lado, sabe-se, pelo teorema de Thevenin, que o sistema atrás do barramento 2 pode ser representado por uma tensão em série com uma impedância, conforme a Figura 4.10. Logo:

$$V = V_0 - Z_{cc}.I$$

Onde:

- V_0 é a tensão no barramento 2 em vazio;
- Z_{cc} é impedância de curto-circuito no barramento 2;
- I é a corrente nodal do barramento 2.

Com um registrador de tensão e com o barramento 2 em vazio ($I=0$) mede-se as tensões do sistema que são afetadas pelos quatro fatores acima definidos.

$$V = V_0 = V(fs, fc, fm, fh)$$

Mesmo que se tenha disponibilidade da tensão V_0 , ou seja, as influências do sistema, do meio ambiente e falha humana são desprezíveis, sabe-se que há influência das correntes dos outros clientes na tensão do barramento. Esta influência manifesta-se como uma queda de tensão muito bem conhecida pelo produto da linha da matriz $[Z_{BUS}]$

do sistema, referente ao barramento em pauta, e o vetor de correntes nodais. As equações e a Figura 4.11 abaixo ilustram o que foi dito para um sistema simples radial.

$$V_3 = 1 - Z_0 \cdot (I_1 + I_2 + I_4) - Z_3 \cdot I_4, \text{ quando o cliente em 3 está desligado}$$

$$V_3 = 1 - Z_0 \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) - Z_3 \cdot (I_3 + I_4), \text{ quando o cliente 3 está ligado}$$

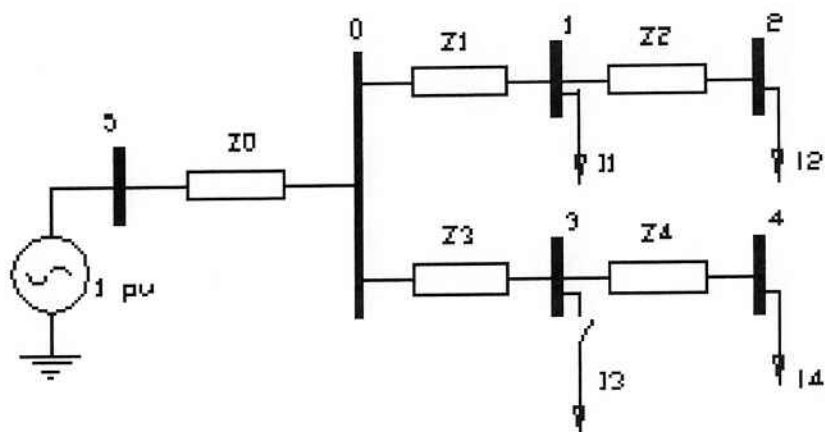


Figura 4.11 – Efeito nos demais consumidores devido a um defeito na barra 3

5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ESTIMAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

A estrutura básica do **Sistema de Estimação de Variações de Tensão de Curta Duração** está ilustrada na Figura 5.1 a seguir:

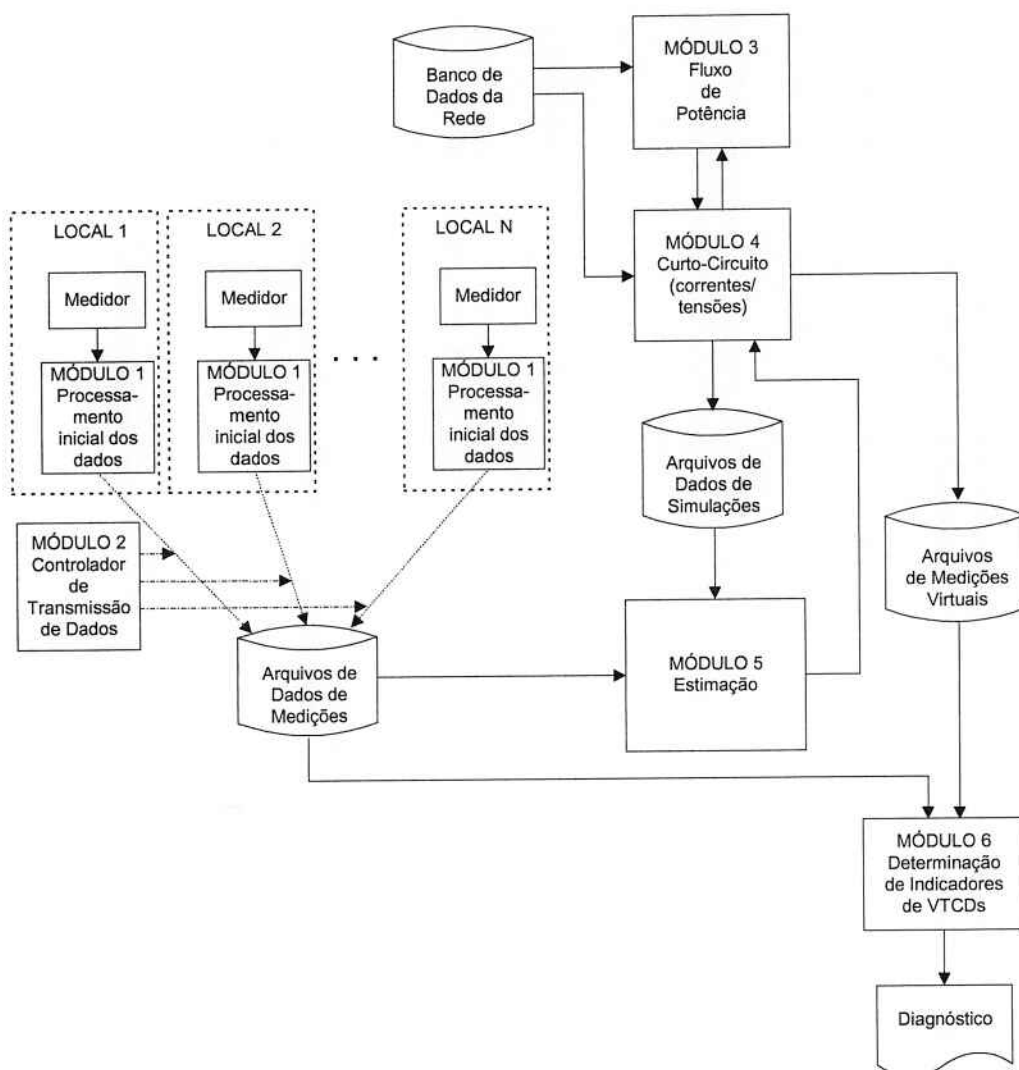


Figura 5.1 – Estrutura do Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração

5.1. Medidores de Qualidade de Energia

São os equipamentos utilizados para detecção e medição de VTCDs, destinados a fornecer as informações que serão utilizadas pelo **Estimador de VTCDs**.

Assim, um **Medidor de Qualidade de Energia** instalado em um ponto estratégico do sistema elétrico em avaliação (barra física), tem como entradas as tensões e correntes de fase desse ponto. Ele monitorará continuamente os valores eficazes das tensões e correntes de cada uma das fases. Quando ocorrer um fenômeno de VTCD nesse ponto do sistema, devido a um determinado tipo de falta, o **Medidor** o detectará e iniciará a medição dos sinais monitorados. Dessa forma, na sua saída será disponibilizado um registro dos valores instantâneos das tensões e correntes de fase que permitirá o futuro processamento desses dados.

Para realizar tal tarefa, os **Medidores** devem ter pelo menos as seguintes especificações:

- captura de formas de onda de tensão e de corrente de todas as fases pela monitoração contínua dos valores eficazes dessas grandezas, que deverão ser calculados considerando janela de 1 ciclo e atualização a cada 0,5 ciclo (com opção para atualização a cada 1 ciclo);
- registro de valores eficazes de tensão e de corrente de todas as fases junto com a captura de formas de onda; registro durante período ajustável de até 1,5 minuto contado a partir do instante de detecção das condições para a captura, sem reinício da contagem caso ocorram novas condições de detecção durante esse período;
- tensão de referência para captura pelo valor eficaz de tensão: prever possibilidade de escolha entre:
 - valor fixo ajustável;
 - valor flutuante, baseado no último valor V_{TM} (valor de 10 minutos) da medição do nível de tensão;
- valores limites de tensão de disparo pelo valor eficaz de tensão: ajustáveis, com os seguintes valores padrão: 90% da tensão de referência (para detecção) no caso de

afundamento (*SAG*) e 110% da tensão de referência (para detecção) no caso de elevação (*SWELL*);

- valores limites de corrente para disparo pelo valor eficaz de corrente: ajustáveis de forma independente para as correntes de fase e de neutro;
- registro da forma de onda com resolução reduzida até a taxa mínima de 16 amostras/ciclo, mas preferencialmente de 64 amostras/ciclo, de forma a possibilitar que:
 - no início da ocorrência: registro de 30 ciclos, sendo 4 ciclos antes do instante de detecção da VTCD e 26 ciclos após;
 - no final da ocorrência: registro de 10 ciclos, caso a duração for superior a 30 ciclos, sendo 2 ciclos antes do instante do término da VTCD e 8 ciclos após;
- registro de todas as tensões fase-neutro, independentemente da fase onde se detectou a ocorrência de VTCD.

5.2. Processamento Inicial dos Dados (Módulo 1)

Esse módulo serve de interface para acesso aos dados produzidos por um determinado **Medidor** do sistema e efetua o tratamento dos mesmos, de modo a reduzir a quantidade de informação necessária para caracterizar os eventos de VTCDs a ser transmitida para o computador central. Ele está localizado em um computador local, junto a um **Medidor**.

O processamento realizado neste módulo produzirá informações que servirão para classificar os eventos (determinar se foi um afundamento ou uma elevação de tensão) e para realizar a estimação. As principais informações fornecidas serão:

- fasores das tensões e correntes nos períodos pré-falta, durante falta e no fim do registro;
- componentes de sequência positiva, negativa e zero;
- variação da tensão eficaz entre as situações pré-falta e durante falta;
- fases envolvidas na falta;

- horário de ocorrência da falta;
- informações quanto à duração do evento;
- informações quanto à operação de disjuntor(es), se disponíveis;
- etc.

Assim, em cada computador local, instalado próximo a um **Medidor**, será desenvolvido um **Processamento Inicial dos Dados** que tem como entrada os registros de valores instantâneos de tensões e correntes de cada fase daquele ponto (formas de onda), produzidos pelo seu respectivo **Medidor** na detecção de uma VTCD devido à ocorrência de um determinado tipo de falta.

O **Módulo 1** processará esses dados, formatando-os adequadamente nas informações que serão utilizadas diretamente pelo **Estimador de VTCD's** (fasores de tensões de fase, fasores de correntes de fase, componentes seqüenciais, etc.) e disponibilizando-os, na sua saída, de forma organizada em um **Arquivo de Dados de Medições** que será enviado a um computador central (cada conjunto **Medidor-Módulo 1** produzirá um **Arquivo de Dados de Medições**).

5.3. Arquivos de Dados de Medições

Correspondem as saídas dos módulos de **Processamento Inicial dos Dados**, ou seja, são arquivos com as informações produzidas pelo **Processamento Inicial dos Dados** de cada **Medidor** instalado no sistema elétrico em avaliação, gerados a partir da detecção de uma VTCD no ponto em que o **Medidor** está instalado, devido à ocorrência de um determinado tipo de curto-circuito.

Nele as informações estão disponibilizadas e organizadas da forma que o **Estimador de VTCDs** as utilizará. Dessa maneira, eles correspondem a uma das entradas do módulo de **Estimação**.

5.4. Controlador de Transmissão de Dados (Módulo2)

Este módulo, localizado no computador central, é o responsável pela disponibilização dos arquivos produzidos nos computadores locais, pelos módulos de **Processamento inicial dos dados** de cada **Medidor** instalado no sistema em avaliação, ao computador central, onde se encontra o **Estimador de VTCDs**.

Dessa forma, na detecção de uma VTCD devido à ocorrência de uma falta (determinado tipo de curto-circuito), a medida que as informações produzidas pelos computadores locais de cada **Medidor** ficam prontas (**Arquivo de Dados de Medições**), este módulo simplesmente as transfere dos pontos de medição para o computador central; gerenciando, assim, o envio de cada um dos **Arquivos de dados de medições** produzidos em cada um dos computadores locais do sistema.

5.5. Banco de dados da rede

Podemos caracterizá-lo como uma entrada tanto para o módulo de **Fluxo de Potência** como para o de **Curto-circuito**.

O **Banco de dados da rede**, localizado no computador central, fornece as informações da rede como topologia, parâmetros dos trechos, parâmetros das cargas, parâmetros das fontes, etc., que são usadas nos processamentos relativos aos cálculos elétricos da rede, mais especificamente, nos módulos de cálculos de **Fluxo de Potência** e de **Curto-circuito**.

5.6. Fluxo de Potência (Módulo 3)

Este bloco está localizado no computador central do **Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração**.

Ele realiza os cálculos de fluxo de potência quando o aplicativo é solicitado, determinando as condições de tensão e de corrente na rede em regime permanente. Os resultados obtidos são utilizados no módulo de cálculo de **Curto-circuito** como valores pré-falta.

Sendo assim, podemos dizer que a **Banco de dados da rede** é a entrada desse módulo, e a sua saída são os valores de tensão e corrente em regime permanente dos pontos do sistema em avaliação que são utilizados pelo **Curto-circuito (Módulo 4)** como valores pré-falta.

5.7. Curto-circuito (Módulo 4)

Este módulo também está localizado no computador central do **Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração**.

Ele realiza os cálculos de curto-circuito, permitindo obter valores de correntes de falta e tensões no sistema durante falta. É relevante ressaltar que essa avaliação leva em consideração as condições de tensão pré-falta obtidas do cálculo de fluxo de potência, portanto esse bloco tem como entrada os valores de regime permanente, produzidos pelo bloco de **Fluxo de Potência**.

O **Módulo 4** é utilizado no processo de estimação em dois momentos distintos:

- quando o aplicativo é solicitado, este bloco é utilizado para o *cálculo de pré-estimação*, isto é, para calcular os valores de tensões nos pontos do sistema elétrico em avaliação em que existem **Medidores de Qualidade de Energia** instalados. Para tanto, são considerados diversos tipos de curto-circuito, em todos os pontos do sistema (barras reais da rede), e em pontos intermediários das linhas de transmissão do sistema (neste caso, são determinadas barras fictícias, uma vez que geralmente as faltas em um sistema elétrico – principalmente quando se trata de subtransmissão – ocorre em pontos da linha que ficam entre as barras físicas do sistema). Considerando que uma condição de curto-circuito refere-se a um determinado tipo de curto-circuito ocorrido em um determinado ponto do sistema (por exemplo, curto-circuito trifásico na k-ésima barra do sistema), temos que os valores de tensões obtidos somente para os pontos do sistema onde os **Medidores de Qualidade de Energia** estão instalados para essa determinada condição de curto-circuito. Esses valores de tensão de fase calculados são armazenados nas linhas de um **Arquivo de Dados de Simulações**;
- o segundo momento de utilização do **Curto-circuito** se dá após a detecção de VTCD devido à ocorrência de uma falta no sistema (curto-circuito). Neste momento, é realizado o *cálculo de pós-estimação*, isto é, tendo como entrada informações providas da **Estimação** que determinam qual foi o tipo de curto-circuito que ocorreu no sistema elétrico em avaliação e o ponto em que ele ocorreu. Executa-se novamente o **Curto-circuito** para a condição de contingência especificada (tipo e local do curto-circuito). Obtém-se, assim, qual os valores das tensões de fase para os pontos onde não existe **Medidores de Qualidade de Energia** instalados. Pode-se, também, calcular as correntes nos trechos do sistema. Para as barras que têm **Medidores de Qualidade de Energia** instalados, atribuem-se os valores medidos de tensões. Os valores de tensões de fase em cada ponto do sistema agrupados para a contingência determinada (valores medidos e valores calculados) são armazenados no **Arquivo de Medições Virtuais**.

Dessa forma, ao saídas deste bloco são os **Arquivo de Dados de Simulações** e o **Arquivo de Medições Virtuais**.

Os tipos de faltas considerados são:

- trifásico;
- dupla fase;
- fase-terra franco;
- dupla-fase terra franco;
- fase-terra com impedância de defeito de 1 Ohm;
- dupla fase-terra com impedância de defeito de 1 Ohm;
- fase-terra com impedância de defeito de 10 Ohms;
- dupla fase-terra com impedância de defeito de 10 Ohms;
- fase-terra com impedância de defeito de 100 Ohms;
- dupla fase-terra com impedância de defeito de 100 Ohms.

5.8. Arquivo de Dados de Simulações

Corresponde a uma das entradas do módulo de **Estimação** e a uma das saídas do módulo de **Curto-circuito**.

É o arquivo que armazena os valores das tensões nos pontos (barras reais) do sistema elétrico em avaliação em que existem **Medidores de Qualidade de Energia** instalados, para cada tipo possível de contingência nos pontos considerados do sistema, obtidos pelo *cálculo de pré-estimação*.

Cada linha desse arquivo refere-se a um determinado tipo de curto-circuito, ocorrido em um determinado ponto do sistema. Assim, elas têm registros dos valores das tensões de cada fase nos pontos do sistema em avaliação que têm **Medidores de Qualidade de Energia** instalados, para cada um dos tipos de curto-circuito, ocorrido em cada um dos locais possíveis considerados. Lembrando que o cálculo das tensões de fase e correntes de fase durante a falta em um determinado ponto do sistema em avaliação é executado, para cada um dos dez tipos de curto-circuito citados no item anterior. E, com relação ao ponto de ocorrência da falta, o mesmo cálculo é feito para

todos os pontos do sistema em avaliação (barras reais) e para pontos intermediários das linhas de transmissão (barras fictícias).

Assim, o número de linhas no **Arquivo de Dados de Simulações** é igual ao produto da soma do número de barras reais do sistema em avaliação com o número de barras fictícias geradas (que depende da extensão das linhas de transmissão do sistema em avaliação) com o número de tipos de curto-circuito considerados (dez). E o número de registros em cada linha é o produto do número de fases (três) como número de barras físicas que têm **Medidores de Qualidade de Energia** instalados.

5.9. Estimação (Módulo 5)

Este módulo está localizado no computador central do **Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração** e tem como uma das suas duas entradas o **Arquivo de Dados de Medições**. Com essas informações, ele executa, utilizando um algoritmo de estimação baseado no **método dos mínimos quadrados**, uma triagem entre as linhas do **Arquivo de Dados Simulações** (a outra entrada desse módulo), a fim de encontrar a condição de curto-circuito que corresponde à contingência detectada e medida.

A menor soma de desvios quadráticos calculada pelo algoritmo entre os valores de tensão de cada fase dos medidores e dos valores de tensão de cada fase das simulações, determinará a falta mais provável de ter ocorrido, caracterizando, assim, o local de ocorrência da falta e o seu tipo.

Após a determinação do tipo e local da falta, o módulo de **Estimação** interage com o módulo de **Curto-circuito** enviando para esse a condição de curto-circuito determinada (o que corresponderia a saída do **Módulo 5**). O **Módulo 4**, por sua vez, executa, agora, o *cálculo de pós-estimação*, isto é, determina as tensões em todos os

pontos do sistema (ou para apenas os pontos que possam vir a ser de interesse do usuário).

5.10. Arquivo de Medições Virtuais

É o arquivo que contém os valores das tensões em todos os pontos de interesse do sistema em avaliação, para a condição de falta estimada.

É aquele que agrupa os valores de tensão de fase medidos nos pontos do sistema em avaliação onde existem **Medidores de Qualidade de Energia** instalados com os valores de tensão de fase para os pontos onde não existe **Medidores de Qualidade de Energia** instalados, para uma determinada condição de curto-circuito.

Este módulo corresponde, então, a uma das saídas do **Curto-circuito**, e servirá de entrada para o módulo de **Determinação dos Indicadores de VTCDs**.

5.11. Determinação dos Indicadores de VTCDs (Módulo 6)

Este módulo tem a tarefa de determinar indicadores que permitam avaliar o comportamento do sistema elétrico em estudo frente aos fenômenos de VTCDs. Isto é feito a partir do **Arquivo de Medições Virtuais** (entrada deste módulo), permitindo produzir relatórios de estatísticas para os pontos de interesse da rede. Com base nas informações obtidas pelo **Estimador de VTCDs**, torna-se viável a elaboração do **Diagnóstico** (saída deste módulo) de qualquer ponto de interesse do sistema para uma determinada contingência. Ele também está localizado no computador central do Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração.

6. O ESTIMADOR DE VTCDs

6.1. O método dos mínimos quadrados

O **método de mínimos quadrados** é comumente usado para obter curvas de aproximação para um conjunto de valores (geralmente dados medidos). Esse método ajusta equações de curvas de determinados tipos aos dados disponíveis, de forma a se obter o mínimo desvio considerando todos os pontos, admitindo que o melhor ajuste ocorre quando, para um conjunto de dados, a soma dos quadrados dos desvios assumir o mínimo valor.

Supondo que os pontos dados são (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , \dots , (x_n, y_n) onde x é uma variável independente e y é uma variável dependente. A curva ajustada tem um desvio (erro) d em relação a cada ponto, isto é, $d_1 = y_1 - f(x_1)$, \dots , $d_n = y_n - f(x_n)$. De acordo com o método de mínimos quadrados, o melhor ajuste ocorre quando:

$$d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \text{mínimo}$$

Equação 6.1 – Soma dos desvios quadráticos das variáveis consideradas

6.2. Localização da falta

Para o **Estimador de VTCDs**, o **método dos mínimos quadrados** será aplicado entre os módulos das tensões de fase medidas (disponíveis nos **Arquivos de Dados de Medições**) e as suas correspondentes tensões de fase calculadas (disponíveis no

Arquivo de Dados de Simulações) para pontos os do sistema elétrico em que há **Medidor de Qualidade de Energia** instalados.

Dessa forma, ocorrendo um determinado tipo de curto-circuito em algum ponto do sistema elétrico em avaliação, todos os pontos que têm **Medidores de Qualidade de Energia** instalados (ou apenas alguns desses pontos) são sensibilizados e passam a registrar as informações das grandezas monitoradas. Essas informações passam por um **Processamento Inicial** local, de forma a resultarem em dados que permitam o início do processo de determinação do tipo e da localização do curto-circuito captado (esses dados são armazenados nos **Arquivos de Dados de Medições**).

Em seguida, confrontam-se esses valores medidos nos pontos sensibilizados com os seus respectivos valores calculados (essas informações são obtidas pelo **Arquivo de Dados de Simulações**). Observe que os pontos que não perceberam a VTCD não são utilizados nessa confrontação de informações.

A confrontação das informações medidas com as simuladas para um ponto de medição i , consiste em realizar a soma dos quadrados dos desvios dos módulos das tensões de cada uma das três fases, para um dado tipo de falta f , e local de falta j :

$$[d_i]_{f,j}^2 = \left(|V_{a_i}^{med}| - |(V_{a_i}^{calc})_{f,j}| \right)^2 + \left(|V_{b_i}^{med}| - |(V_{b_i}^{calc})_{f,j}| \right)^2 + \left(|V_{c_i}^{med}| - |(V_{c_i}^{calc})_{f,j}| \right)^2$$

Equação 6.2 – Soma dos desvios quadráticos

Os índices podem assumir os seguintes valores ou situações:

- i (ponto de medição): 1 a NM (número total de pontos de medição);
- j (ponto de falta): 1 a NB (número total de barras representadas na simulação);
- f (tipo de falta): trifásica, fase-terra, fase-terra com impedância de defeito (1, 10 e 100 Ohms), dupla fase, dupla fase - terra e dupla fase - terra com impedância de defeito (1, 10 e 100 Ohms).

Tomando-se os valores das tensões medidas (**Arquivos de Dados de Medições**) e os valores resultantes dos cálculos (**Arquivo de Dados de Simulações**), verifica-se a condição de curto-circuito (tipo de falta e barra de ocorrência da falta) pelo menor valor da soma dos diversos valores de $[d_i]_{f,j}^2$ nos pontos de medição, isto é:

$$\text{Mínimo} \left(\sum_i^{N_M} [d_i]_{f,j}^2 \right)$$

Equação 6.3 –Determinação do tipo de falta e da barra de ocorrência da falta medida

Nessa triagem entre os casos armazenados no **Arquivo de Dados de Simulações**, o caso que satisfazer essa condição de mínima soma dos quadrados corresponderá à situação de falta que se admite ter ocorrido. Obtêm-se, assim, f (tipo de falta) e j (barra mais provável de ocorrência do defeito) correspondentes a essa condição.

Uma vez determinados j e f , isto é, obtidas as informações da localização e do tipo de falta (condição de curto-circuito mais provável de ter ocorrido), poderão ser determinadas as tensões de fase em quaisquer pontos do sistema elétrico em avaliação de interesse do usuário, através do módulo de **Curto-circuito do Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração**.

6.3. Descrição do Estimador de VTCDs

A Figura 6.1 localiza, na estrutura do **Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração**, os módulos correspondentes ao **Estimador de VTCDs**.

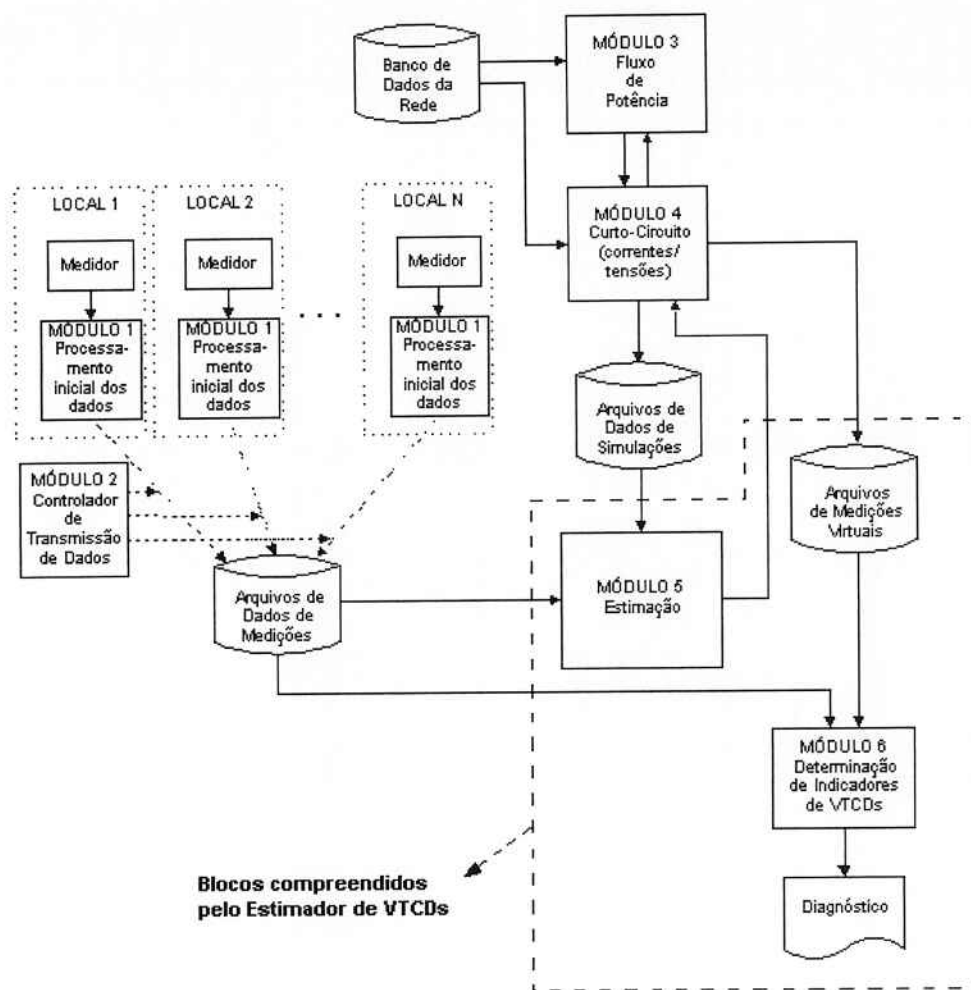


Figura 6.1– Localização do Estimador de VTCDs no Sistema de Estimação de Variações de Tensões de Curta Duração

Em linhas gerais, devido a implementação do método de localização da falta e posterior estimação das tensões nos pontos de interesse do sistema elétrico em avaliação; podemos estabelecer as seguintes diretrizes para a organização do **Estimador de VTCDs**:

6.3.1. Tabela de valores calculados nas simulações

Em cada linha da tabela que compõe o **Arquivo de Dados de Simulações**, serão armazenados os valores das tensões em nos pontos do sistema em avaliação em que existam **Medidores de Qualidade de Energia** instalados, nas condições de falta consideradas, obtidos no *cálculo de pré-estimação* nas simulações executadas pelo módulo de **Curto-circuito**.

Assim, uma nova linha da tabela será criada para cada condição de curto-circuito, isto é, para cada um dos tipos de falta (fase-terra com e sem impedância de defeito, dupla fase, dupla fase - terra com e sem impedância de defeito, trifásica) ocorrido em um determinado ponto do sistema.

6.3.2. Pontos contemplados nas tabelas

Os pontos do sistema onde se prevê a instalação de medidor serão contemplados nas linhas das tabelas que compõem **Arquivos de Dados de Simulações**, de forma que a permitir a comparação com as tensões medidas nesses pontos (linhas das tabelas que compõem os **Arquivos de Dados de Medições**).

6.3.3. Pontos a serem representados nas simulações

Para a definição dos pontos a serem representados nas simulações, além das barras reais do sistema em avaliação, deve ser levado em conta que representar uma linha extensa como um único trecho produz diferenças significativas na estimação dos valores das tensões nas suas barras extremas e correntes para durante as faltas. A negligência

desse fato pode prejudicar as estimações, principalmente em se tratando de sistema em malha.

Para evitar esse inconveniente, as linhas de subtransmissão deverão ser representadas em trechos suficientemente curtos para possibilitar melhores estimações, isto é, uma linha extensa deverá ser subdividida em trechos menores através de barras fictícias, que são barras criadas apenas processo de localização das faltas de forma que a simulação dos defeitos produza resultados que se aproximem das situações reais.

Inicialmente será adotada uma distância máxima entre dois pontos de 1 a 2 km, podendo ser alterada caso análise de sensibilidade indique essa necessidade.

Serão consideradas faltas em todas as barras do sistema representadas na simulação (barras reais e fictícias).

As barras fictícias também serão utilizadas para possibilitar o **Diagnóstico** de pontos do sistema que não são barras reais do sistema, a fim de exibir ao usuário do aplicativo o comportamento desses pontos, possibilitando uma análise da viabilidade de ligação de novas instalações elétricas.

6.3.4. Impedâncias de falta

Nos casos de faltas que envolvem terra serão usadas as impedâncias de defeito de 1, 10 e 100 Ω .

6.3.5. Faltas a montante do ponto de suprimento

O **Estimador de VTCDs** identificará as condições de falta a montante do sistema em avaliação (faltas no sistema supridor) através de uma análise das diferenças de tensão entre a condição pré-falta e durante a falta nos pontos de medição.

Quando as diferenças de tensão para todos os pontos, fase a fase, forem próximas para os pontos monitorados, será identificado o caso de falta a montante.

6.3.6. Informações de correntes monitoradas

Informações dos pontos monitorados que forneçam valores de correntes de linha absorvidas pelos consumidores AT ou pelas Subestações de Distribuição poderão ser utilizadas para a identificação de defeitos nas instalações de consumidores ou no sistema de distribuição primária, permitindo limitar o universo de **Arquivo de Dados de Simulações** utilizados na triagem executada na localização da falta pelo **método dos mínimos quadrados**.

7. OS APLICATIVOS

Para desenvolver o **ESTIMADOR DE VTCDs** de três aplicativos foram elaborados:

- um aplicativo de edição de redes: que aqui será denominado de **EDITOR**;
- um aplicativo de cálculo: que será chamado de **ESTIMADOR**;
- um aplicativo de visualização de resultados: que aqui será denominado de **ESTATÍSTICAS**.

7.1. O Funcionamento

Inicialmente, é relevante colocar que os dados utilizados pelo módulo correspondente ao **ESTIMADOR DE VTCDs** estão todos armazenados no banco de dados do **Sistema de Estimação de Variações de Tensão de Curta Duração**, que abriga, também, os dados utilizados pelos outros módulos que fazem parte do mesmo **Sistema**. Esse banco de dados foi desenvolvido em ORACLE, e é comum a todos os aplicativos desenvolvidos para o **Sistema de Estimação**, isto é, todos os aplicativos podem acessá-los com algumas restrições, devido às características do projeto que não fazem parte do escopo desse trabalho.

Isto posto, podemos falar do aplicativo de edição de redes (**EDITOR**). A necessidade desse aplicativo veio do fato de que os sistemas de subtransmissão estão susceptíveis a alterações na sua configuração, ou seja, a fim de atender a demanda e garantir a continuidade do serviço, manobras de chaves podem ser executadas alterando, assim, o diagrama unifilar equivalente das mesmas.

Como o conhecimento da topologia de um sistema elétrico é fundamental para a execução dos cálculos elétricos (fluxo de potência, curtos-circuitos), tais alterações na

topologia do sistema em estudo devem ser informadas de alguma maneira, de forma que permita executar a metodologia de estimação adequadamente.

Assim, o **EDITOR** foi desenvolvido para permitir que as alterações no sistema elétrico em estudo pudessem ser registradas na base de dados do **Sistema**, de forma que o **ESTIMADOR DE VTCDs** pudesse averiguar a configuração do sistema elétrico em análise e executar os cálculos corretamente (mais especificamente, garante-se que os módulos de **Fluxo de potência** e **Curto-circuito** serão executados adequadamente, o que é fundamental para se poder realizar a estimação).

Toda a metodologia de estimação de VTCDs descrita nos itens anteriores foi desenvolvida, basicamente, no aplicativo de cálculo (**ESTIMADOR**). Esse aplicativo foi desenvolvido para ser executado automaticamente, sem que o usuário perceba-se, no acesso ao aplicativo **ESTATÍSTICAS**, pois foi assumido que o usuário estaria realmente interessado em analisar o sistema de subtransmissão como um todo, visualizando os resultados da estimação pelos indicadores, gráficos, tabelas, que o permitissem tirar conclusões sobre o sistema em estudo para um determinado período.

Assim, como, normalmente, o usuário não estaria interessado em verificar os valores de tensões de fase medidos, o acesso a esse aplicativo aconteceria apenas em situações especiais, como no acompanhamento de uma estimação específica por alguma razão especial, ou para a solicitação de um reprocessamento dos dados já estimados anteriormente, ou para configurar um aumento da precisão do cálculo.

O aplicativo de visualização dos resultados, basicamente lê do banco de dados os valores de tensões medidos e estimados (esses últimos gravados pelo **ESTIMADOR** no final da sua execução) e os manipula adequadamente, de forma a permitir que o usuário verifique o comportamento do sistema de subtransmissão em análise para um determinado período.

7.2. O EDITOR

7.2.1 Apresentação do Ambiente Computacional

Ao iniciar o aplicativo EDITOR, é necessário informar o diretório de instalação (“Diretório de instalação”) e o diretório que armazenará os arquivos que compõem a rede que se deseja editar (“Diretório da Rede”), conforme ilustrado na Figura 7.2.1.

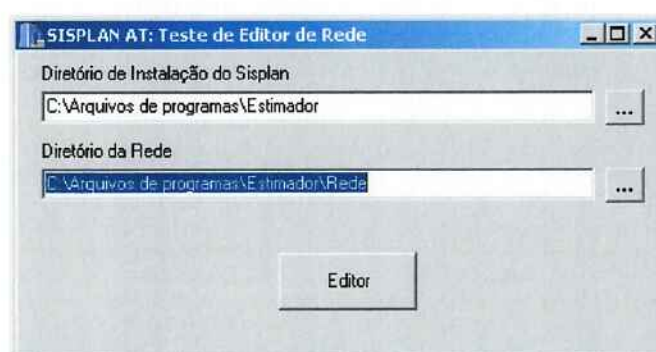


Figura 7.2.1 – Tela de Seleção de diretórios

Selecionando-se os diretórios adequados e clicando-se em “EDITOR”, a tela principal do aplicativo é exibida. Inicialmente, ela é sobreposta por uma outra tela de confirmação da Seleção de Rede, que permite ao usuário alternar entre outras redes de transmissão existentes (Figura 7.2.2).



Figura 7.2.2 – Tela de Confirmação de Seleção de Rede

Caso for o caso, pode-se alternar para o diretório da rede que se deseja editar. O botão “Cancela” fecha o aplicativo e o botão “Confirma” inicia o aplicativo levando para a tela principal (Figura 7.2.3).

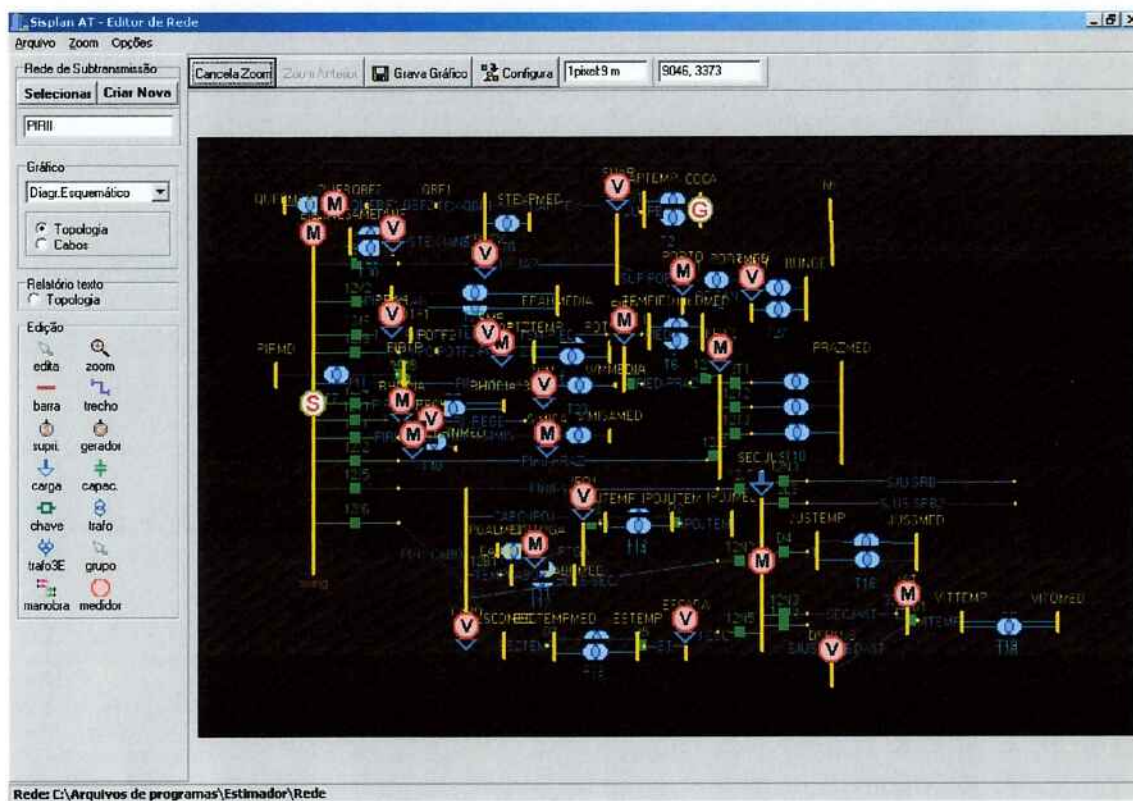


Figura 7.2.3 – Tela Principal

Na figura anterior é exibida a tela principal do EDITOR. Nela está representada a rede piloto da Regional de Pirapama II do sistema de subtransmissão da CELPE. Foi essa a rede utilizada nas simulações e testes do aplicativo. Uma melhor visualização dela pode ser observada no ANEXO I.

7.2.2. Editando a rede.

Na rede selecionada, pode-se acrescentar ou retirar os elementos agrupados na opção “*Edição*” (Figura 7.2.4).



Figura 7.2.4 – Opções de edição

Para acrescentar algum elemento, basta clicar sobre o botão correspondente e, em seguida, sobre o ponto que se deseja inseri-lo no sistema. Então, uma tela de configuração do elemento aparece, de forma que se possível configurar os parâmetros do mesmo. Essa tela varia de elemento para elemento. Para ilustrar o que foi explicado, na sequência é exibida a tela de configuração de um gerador (Figura 7.2.5).

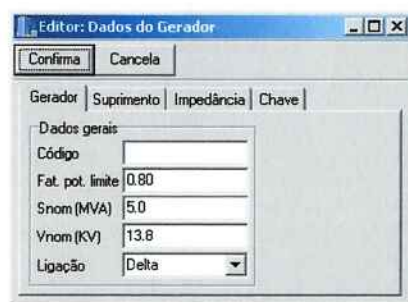


Figura 7.2.5 – Tela de configuração dos parâmetros de um gerador.

O botão com a opção “*Edita*”, permite selecionar um determinado elemento da rede em avaliação para edição de seus parâmetros ou, até mesmo a sua eliminação da rede.

No menu “*Arquivo*”, existe a opção “*Atualiza base de dados*”, que permite atualizar os arquivos que compõem a rede em edição. (As demais opções nesse aplicativo não merecem uma maior atenção por não serem relevantes ao desenvolvimento do projeto.)

7.3. O ESTIMADOR

7.3.1. Apresentação do ambiente computacional

Ao iniciar o aplicativo ESTIMADOR, assim como acontece com o EDITOR, é necessário informar o diretório de instalação (“*Diretório de instalação*”) e o diretório que armazenará os arquivos que compõem a rede com a qual se deseja trabalhar (“*Diretório da Rede*”), conforme ilustrado na Figura 7.3.1.

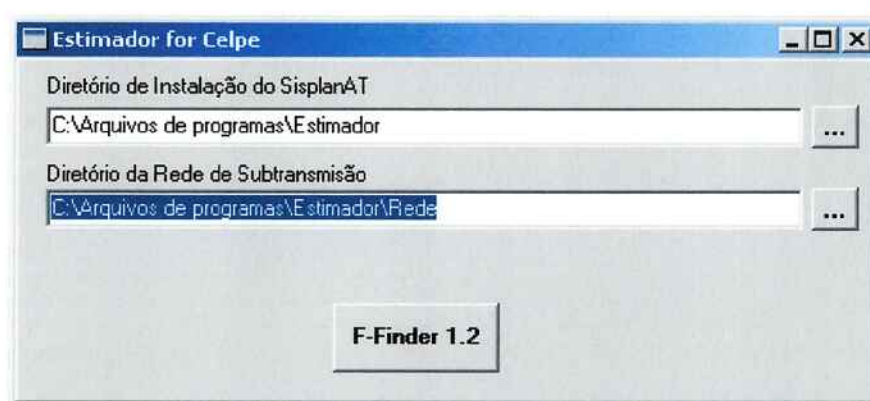


Figura 7.3.1 – Tela de Seleção de diretórios

Selecionando-se os diretórios adequados e clicando-se em “F-Finder 1.2”, a tela principal do aplicativo é exibida (Figura 7.3.2).



Figura 7.3.2 – Tela Principal

7.3.2. Navegando pelas contingências registradas na base de dados

Para visualizar as tensões de fase das barras monitoradas pelos **Medidores de Qualidade de Energia**, inicialmente é necessário clicar no botão verde no canto superior direito da tela, para que o aplicativo realize a conexão com a base de dados.

Automaticamente, o número de contingências registradas serão exibidas e os valores de tensão medidos na primeira contingência registrada serão exibidos, conforme pode ser observado nas Figuras 7.3.3 e 7.3.4:



Figura 7.3.3 – Primeira contingência registrada

Pode-se perceber que em algumas das contingências existem barras com medidores desabilitados. No caso da figura anterior, a barra "PORTOGALINHAS" está desabilitada. Isso acontece quando a tensão medida nas três fases apresenta valor inferior a 0,1 pu, caracterizando uma interrupção do fornecimento no ponto onde esse **Medidor** está instalado. Esta barra é automaticamente descartada do processo de

localização da falta, ou seja, ela não é considerada no **métodos dos mínimos quadrados**.



Figura 7.3.4 – Última contingência registrada

Na tela principal deste aplicativo, a navegação pelas contingências é feita através das setas que ficam na parte superior. As duas mais à esquerda permitem visualizar contingência por contingência e a localização do defeito e processamento da estimação são feitos através do botão "Localizar Defeito". A seta mais à direita serve para processar todas as contingências registradas no banco. (As demais opções nesse aplicativo não merecem uma maior atenção por não serem relevantes ao desenvolvimento do projeto.)

7.4. O ESTATÍSTICAS

7.4.1. Apresentação do ambiente computacional

Cada sessão do aplicativo ESTATÍSTICAS é iniciada com a seguinte tela de login e senha do usuário (Figura 7.4.1):

A screenshot of a 'Database Login' dialog box. The title bar is blue with the text 'Database Login' and a close button (X). The dialog has a light gray background. It contains three labels: 'Database:' followed by the text 'DBOracle', 'User Name:' followed by a text input field, and 'Password:' followed by a text input field. At the bottom, there are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

Figura 7.4.1 - Tela de login

Para que o aplicativo funcione, é necessário inserir primeiramente estes dois dados do banco de dados Oracle. No campo User Name digita-se o nome do usuário, enquanto que no campo Password a senha.

Com isso feito, a tela principal do ESTATÍSTICAS é apresentada (Figura 7.4.2):

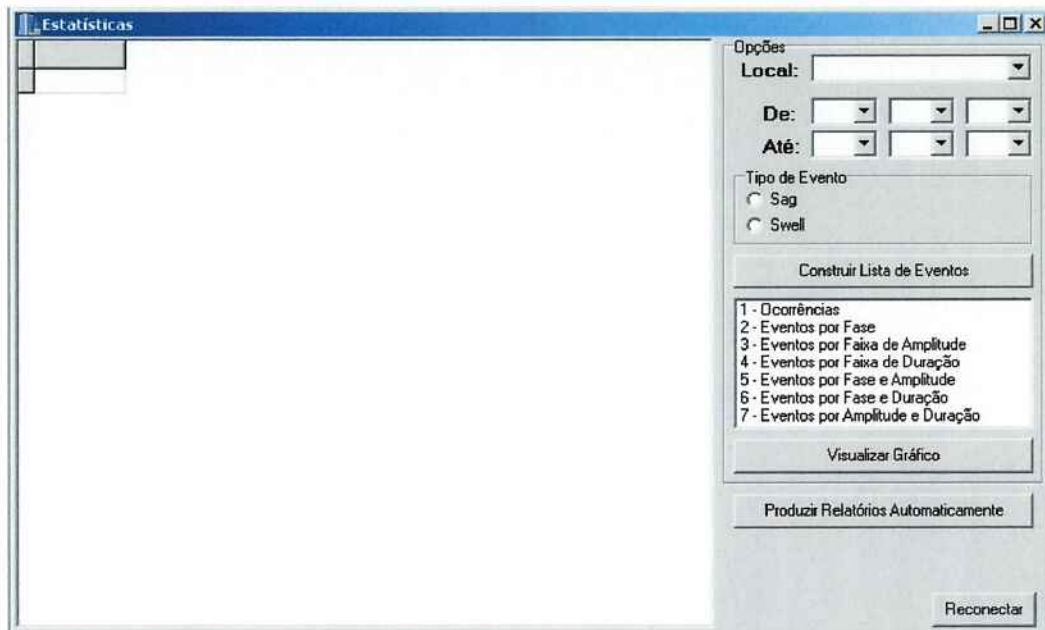


Figura 7.4.2 - Tela de principal do ESTATÍSTICAS

Caso a conexão com o banco de dados não tenha sido corretamente efetuada, o programa pode ser devidamente conectado através do botão RECONECTAR.

Partindo da tela principal, o usuário pode basicamente realizar três funções diferentes:

- construir uma Lista de Eventos tipo VTCD;
- visualizar sete diferentes tipos de histogramas para eventos de VTCDs compreendidos por um período arbitrário;
- produzir automaticamente relatórios, imprimindo-os ou exportando-os ao Microsoft Excel 2000.

Uma descrição mais detalhada encontra-se nos itens subsequentes.

7.4.2. Eventos e Lista de Eventos

Neste aplicativo, um evento é considerado um fenômeno de VTCD (tipo SAG, para Afundamento de Tensão; tipo SWELL, para Elevação de Tensão) registrado por um **Medidor de Qualidade de Energia** instalado em algum ponto do sistema elétrico em avaliação.

A Lista de Eventos é uma tabela em que estão todos os eventos do tipo SAG ou SWELL compreendidos por um certo período de tempo e registrados num local da rede. Essa tabela possui os seguintes campos:

- INICIO: data em que o evento foi registrado pelo medidor (DD/MM/AA hh:mm:ss);
- FASE: fases envolvidas neste evento (A, B, C, AB, AC, BC ou ABC);
- MAGNITUDE: tensão eficaz durante o defeito registrado (kV);
- DURAÇÃO: tempo total de registro do evento (ciclos);
- LOCAL: nome do local em que o evento foi registrado; só aparece se o usuário desejar uma tabela com todos os locais disponíveis

Como construir uma Lista de Eventos

É necessário o fornecimento dos seguintes dados para a elaboração de uma Lista de Eventos:

- local de interesse;
- período de análise desejado (dia/mês/ano);
- tipo de evento VTCD a ser analisado.

Os locais disponíveis podem ser visualizados clicando-se à direita do campo denominado LOCAL, no qual serão mostrados apenas os nomes das barras que têm **Medidor de Qualidade de Energia** instalado e estão cadastradas no banco de dados, além da opção TODOS, que seleciona todos os locais ao mesmo tempo. Para selecionar um local, basta clicar uma vez sobre o local desejado.

O período de interesse deve ser selecionado através do mesmo procedimento que o local, através dos campos DE e ATÉ, que correspondem às datas inicial e final desejadas, constituídas por dia, mês e ano, da esquerda para a direita, como ilustrado na Figura 7.4.3. Apenas estão disponíveis os anos em que há no mínimo um evento registrado no banco de dados do programa.

Opções

Local: []

De: [] [] []

Até: [] [] []

Tipo de Evento

☐ Sag

☐ Swell

dia mês ano

Figura 7.4.3 - Local, Período e Tipo de Evento VTCD

O tipo de evento VTCD pode ser escolhido no campo TIPO DE EVENTO. As opções, SAG ou SWELL são mutuamente excludentes.

Com estas opções já devidamente selecionadas, a Lista de Eventos pode ser construída através do botão CONSTRUIR LISTA DE EVENTOS. A lista é então apresentada na forma de tabela. Um exemplo de uma LISTA DE EVENTOS para fenômenos do tipo SAG encontra-se na Figura 7.4.4, para o local SE PORTO, no período compreendido de 01/01/2003 até 31/12/2003.

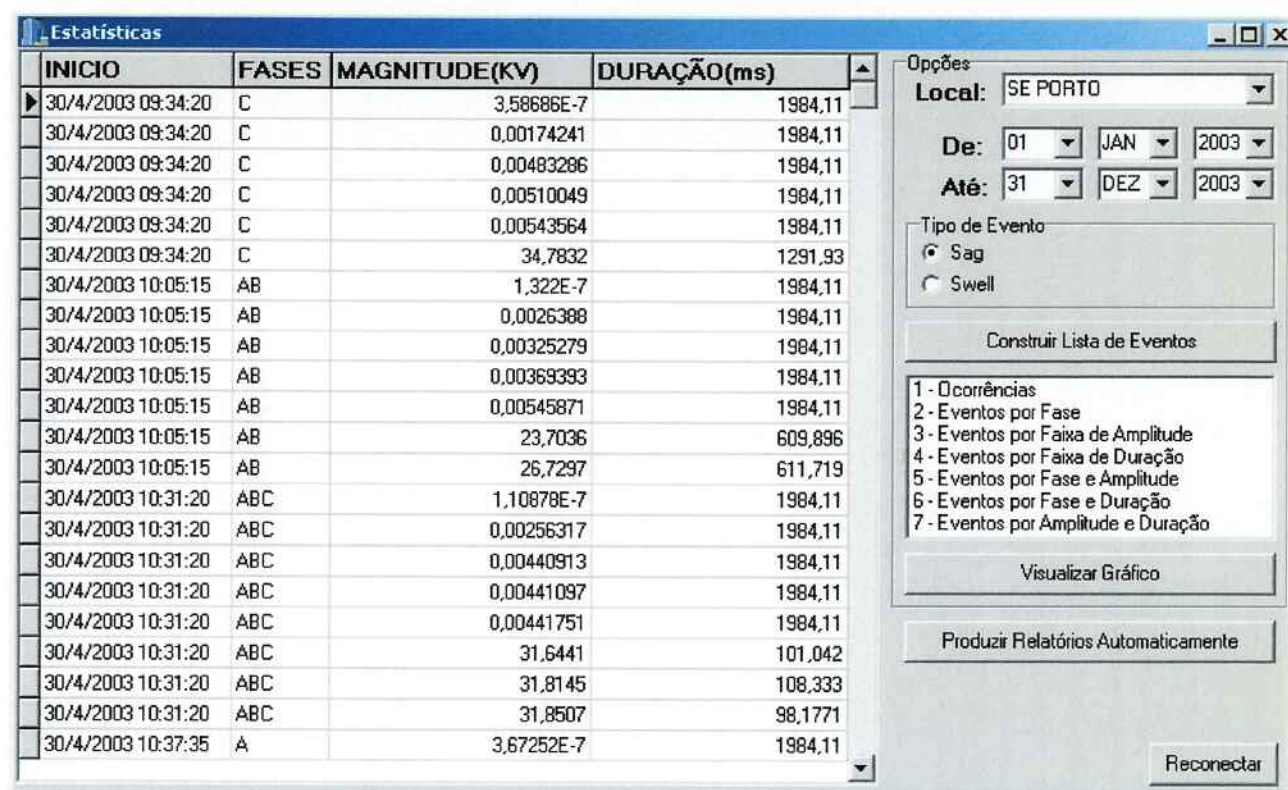


Figura 7.4.4. - Lista de Eventos

7.4.3. Histogramas

Os eventos selecionados podem ser também visualizados graficamente na forma de histogramas.

Existem sete tipos diferentes de histogramas:

1 - Ocorrências: diferentemente dos eventos, são considerados como ocorrências todo fenômeno de VTCD independentemente de sua origem, SAG ou SWELL, e de quantas ou quais fases e canais foram envolvidas na ocorrência. Neste histograma, têm-se o número de ocorrências registradas no eixo vertical e os meses no eixo horizontal;

2 - Eventos por Fase: este histograma dispõe os eventos discretizados por fase, A, B e C. O eixo vertical contém o número de eventos enquanto que o eixo horizontal mostra

os meses em questão. Para cada mês, há três barras com cores diferentes, cada uma relativa a uma fase;

3 - *Eventos por Faixa de Amplitude*: nesta forma de visualização, os eventos foram distribuídos entre as seguintes faixas de amplitude (pu):

- 0.0 – 0.1;
- 0.1 – 0.2;
- 0.2 – 0.3;
- 0.3 – 0.4;
- 0.4 – 0.5;
- 0.5 – 0.6;
- 0.6 – 0.7;
- 0.7 – 0.8;
- 0.8 – 0.9;
- 0.9 – 1.0.

O eixo vertical compreende o número de eventos registrados. As faixas de amplitude estão no eixo horizontal;

4 - *Eventos por Faixa de Duração*: neste histograma os eventos são divididos entre as faixas de duração mostradas a seguir (ciclos):

- 0,5 – 3;
- 3 – 6;
- 6 – 12;
- 12 – 30;
- 30 – 60;
- 60 – 180;
- > 180.

No eixo vertical encontra-se o número de eventos VTCD e no eixo horizontal as respectivas faixas de duração;

5 - *Eventos por Fase e Amplitude*: este histograma é igual ao de número 3, contudo ele discretiza os eventos em três fases, A, B e C. No eixo vertical é disponibilizado o número de eventos enquanto que o eixo horizontal ilustra as mesmas faixas de amplitude do item 3. Para cada faixa de amplitude, três barras de cores diferentes podem ser visualizadas, uma para cada fase;

6 - *Eventos por Fase e Faixa de Duração*: este histograma é o mesmo que o do item 4, sendo que os eventos estão distribuídos entre as três fases. No eixo vertical tem-se o número de eventos e no eixo horizontal as mesmas faixas de duração do histograma 4. Para cada faixa de duração, existem 3 barras de cores diferentes relativas às fases A, B e C;

7 - *Eventos por Amplitude e Duração*: este histograma se diferencia dos outros por ser em 3 dimensões. No eixo vertical encontra-se o número de eventos, no eixo horizontal as faixas de amplitude do item 3 e no eixo em profundidade as faixas de duração do item 4.

Logo abaixo (Figuras 7.4.5 a 7.4.11) são ilustrados os histogramas de 1 a 7, para SE PORTO, eventos tipo SAG, de 01/01/2003 a 31/12/2003.

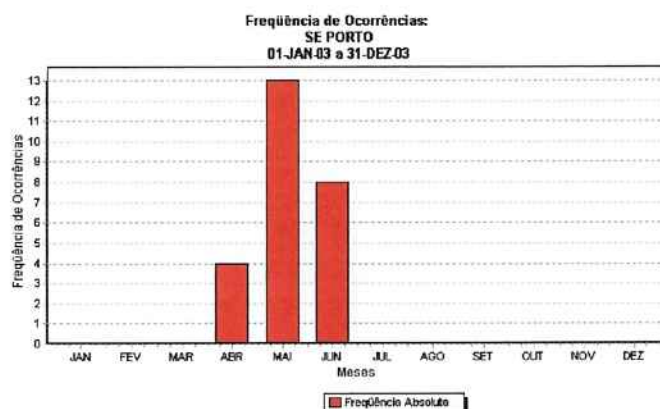


Figura 7.4.5 - Histograma de Ocorrências

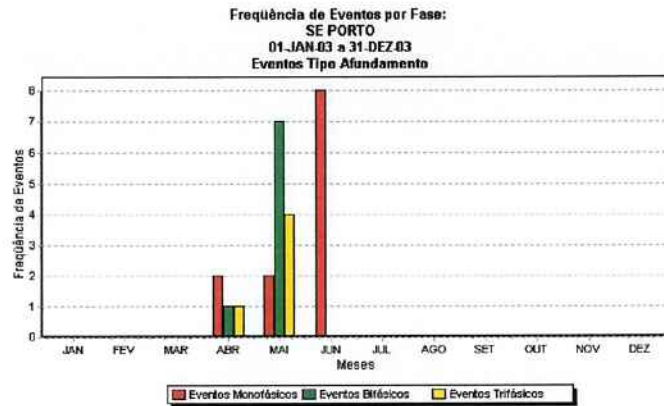


Figura 7.4.6 - Histograma de Eventos por Fase

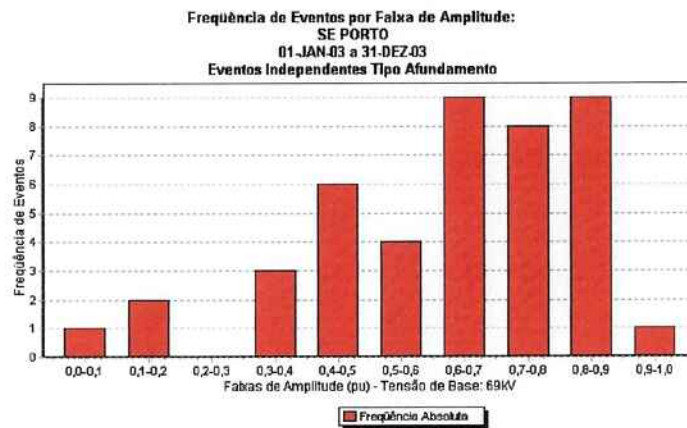


Figura 7.4.7 - Histograma de Eventos por Amplitude



Figura 7.4.8 - Histograma de Eventos por Duração

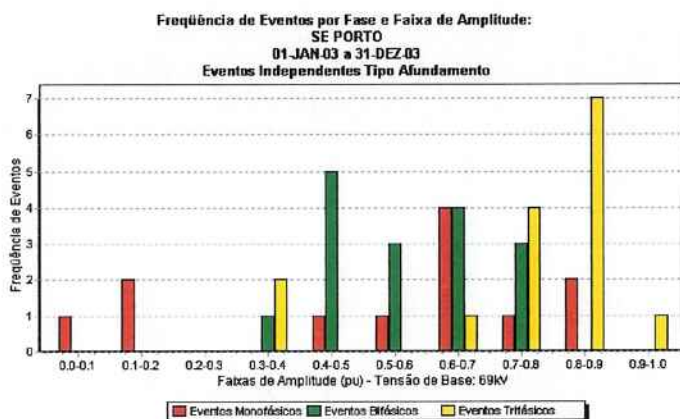


Figura 7.4.9 - Histograma de Eventos por Fase e Amplitude

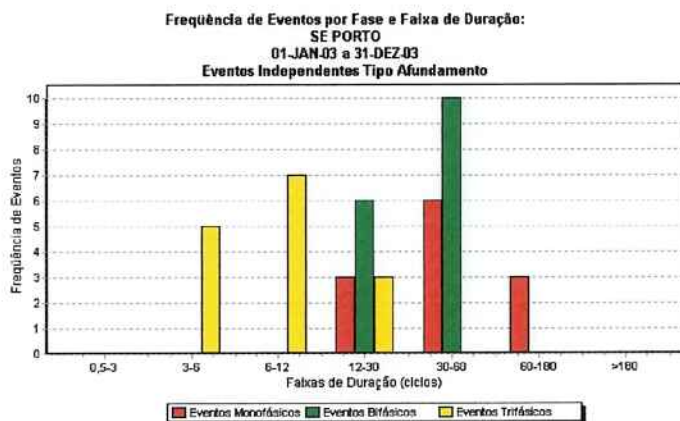


Figura 7.4.10 - Histograma de Eventos por Fase e Duração

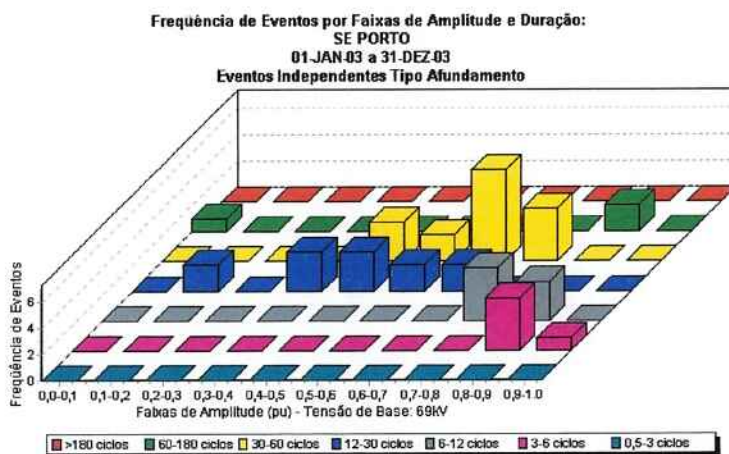


Figura 7.4.11 - Histograma de Eventos por Amplitude e Duração

Como Visualizar um Histograma

Para que um histograma possa ser exibido na tela, primeiramente devem ser preenchidos os campos referentes ao local de interesse e o período desejado, seguindo o mesmo procedimento utilizado para a obtenção da Lista de Eventos.

Além disso, um tipo de histograma deve ser selecionado através da escolha de um dos sete itens descritos dentro da caixa de texto presente na tela principal de abertura. Para que esta escolha seja efetivada, o nome do histograma desejado deve ser destacado com um clique do mouse, como exemplificado na Figura 5.4.12, em que o histograma do tipo 4 - *Eventos por Faixa de Duração* é escolhido.

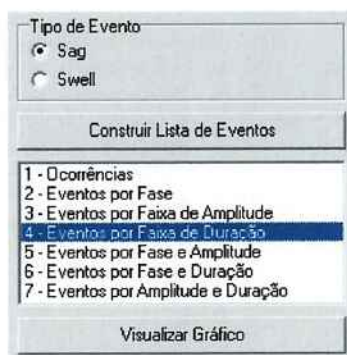


Figura 7.4.12 - Selecionando um Tipo de Gráfico

Contudo, faz-se ainda necessário selecionar um tipo de Evento VTCD (SAG ou SWELL) caso o histograma escolhido não seja 1 - *Ocorrências*. Este último é o único histograma que não necessita desta especificação.

Finalmente, através do botão VISUALIZAR GRÁFICO, obtém-se uma tela semelhante à Figura 7.4.13.

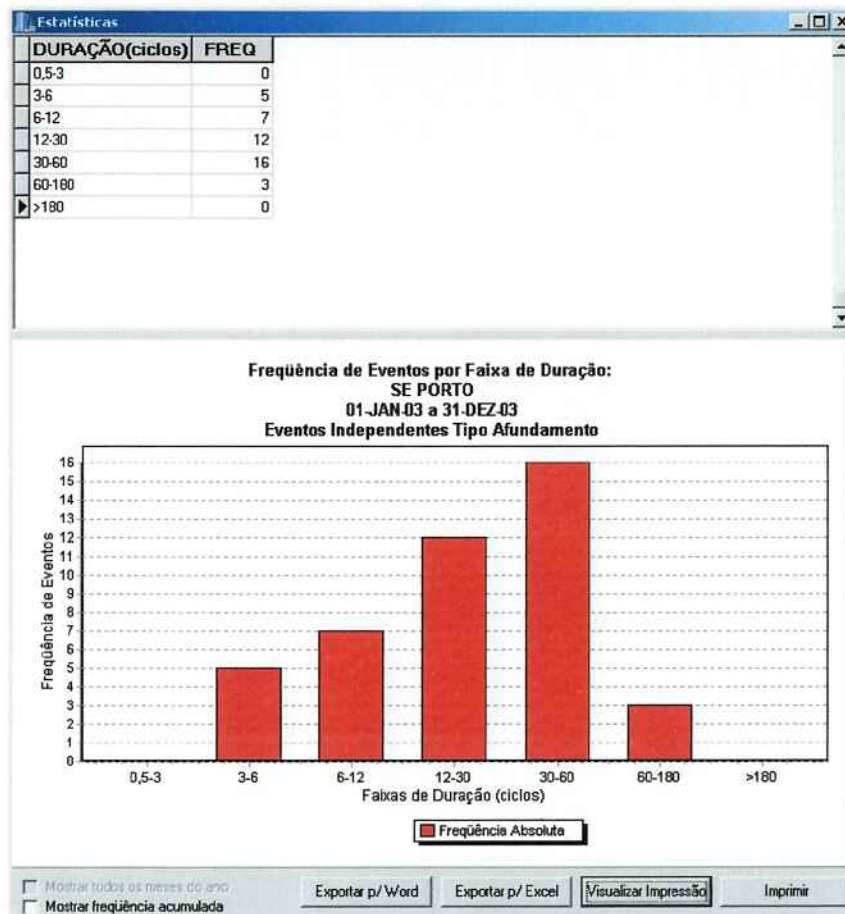


Figura 7.4.13 - Tela de Visualização do Histograma

Observa-se uma tabela acima do histograma. Esta tabela representa o próprio histograma em outro formato.

Frequência Acumulada

Para os histograma de 1 a 6 é possível visualizar-se também a trajetória da curva de frequência acumulada de eventos à medida em que o eixo "x" vai crescendo.

Para os itens 1 e 2, ela representa sua trajetória em relação ao tempo; no caso deste programa, em meses. Para os itens 3 e 5, sua trajetória evolui em relação ao aumento gradual das faixas de amplitude. Para os itens 4 e 6, ocorre o mesmo, entretanto em relação às faixas de duração.

Como Visualizar a Curva de Frequência Acumulada

Na tela apresentada na Figura 7.4.13, basta marcar o “check-box” MOSTRAR FREQUÊNCIA ACUMULADA. É bom ressaltar que, para o histograma 7 - *Eventos por Amplitude e Duração*, esta opção é desabilitada.

A Opção “Mostrar Todos os Meses do Ano”

Esta opção só está habilitada para os gráficos que representem os meses no eixo x, ou seja, para os histogramas 1 – *Ocorrências* e 2 – *Eventos por Fase*. Sempre que os eventos solicitados estiverem dentro do mesmo ano, ou seja, sempre que o ano escolhido em DE e o ano escolhido em ATÉ forem os mesmos, a opção estará habilitada e o usuário poderá escolher entre mostrar todos os meses do ano ou apenas aqueles dentro do período selecionado.

Como Mostrar Todos os Meses do Ano

Para que todos os meses do ano sejam representados graficamente, basta marcar o “check-box” MOSTRAR TODOS OS MESES DO ANO. Esta opção só está habilitada para os gráficos 1 e 2, sob as condições descritas acima.

Um exemplo destas duas representações estão nas Figuras 7.4.14 e 7.4.15.

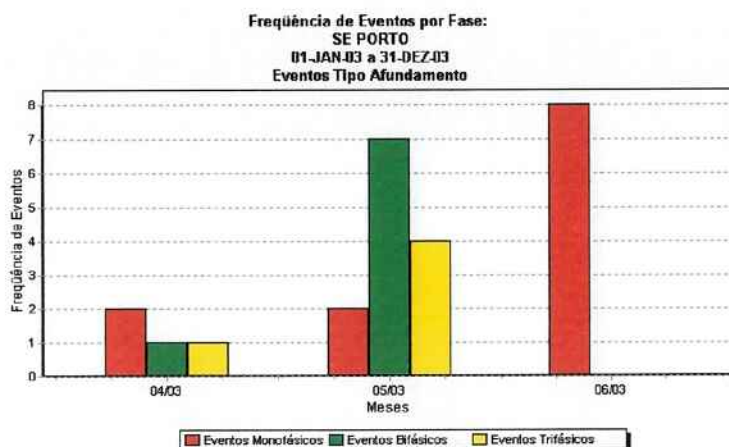


Figura 7.4.14 - Histograma só com os Meses Seleccionados

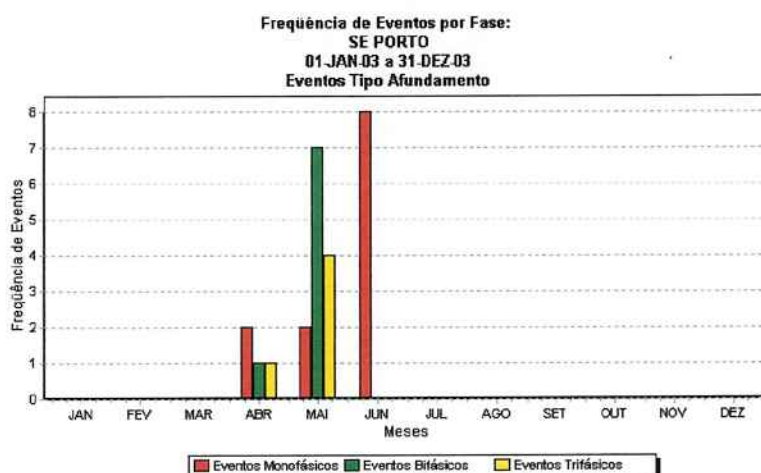


Figura 7.4.15 - Histograma com Todos os Meses

Relatório

O aplicativo ESTATÍSTICAS permite ao usuário imprimir um relatório padronizado como na Figura 7.4.16:

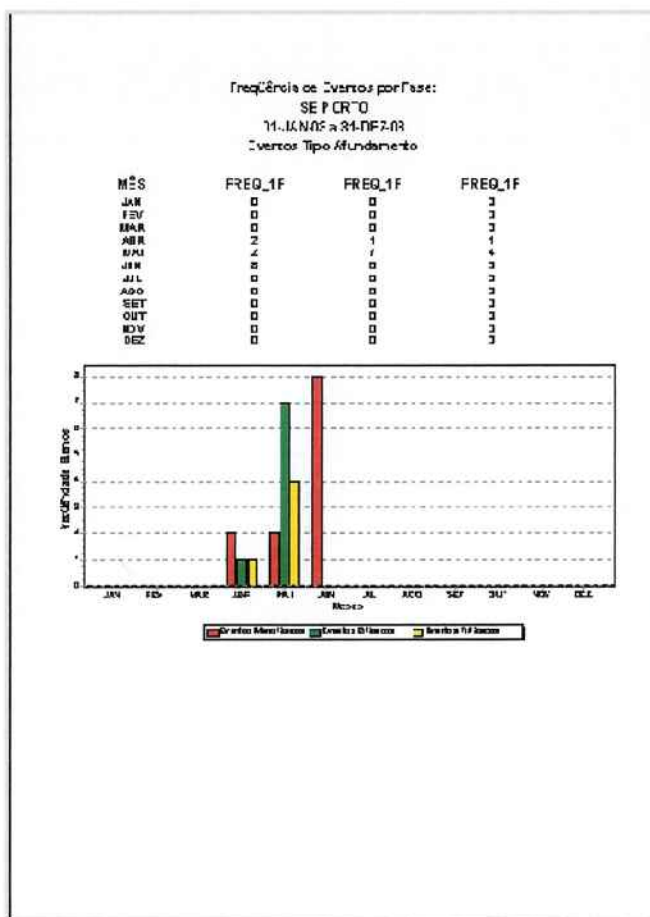


Figura 7.4.16 - Exemplo de relatório padrão

Como Visualizar e Imprimir um Relatório

Existem três maneiras diferentes de se imprimir um relatório com este programa. Nesta seção serão explicadas apenas duas delas, pois a terceira é explicada em detalhes no item “Automação de Relatórios”.

Uma maneira direta de se obter um relatório específico consiste em visualizar um histograma seguindo o método descrito no item “Como Visualizar um Histograma” e, na tela obtida como na Figura 7.4.13, simplesmente clicar sobre o botão IMPRIMIR.

A segunda maneira possui um passo intermediário a mais, porém, o qual possibilita a visualização do relatório a ser impresso. Após seguir-se o mesmo método contido em “Como Visualizar um Histograma”, clica-se sobre o botão VISUALIZAR IMPRESSÃO. Um relatório como o da Figura 7.4.16 será apresentado, além da barra de ferramentas da Figura 7.4.17.

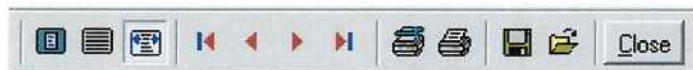


Figura 7.4.17 - Barra de Ferramentas da Tela de Visualização de Relatório

As funções dos botões estão descritas a seguir, seguindo a barra da esquerda para a direita:

- visualizar o relatório por inteiro;
- visualizar o relatório em tamanho real;
- ajustar o relatório ao tamanho da tela;
- voltar para primeira página;
- voltar para página anterior;
- ir para próxima página;
- ir para última página;
- configurar impressora;
- imprimir;
- salvar (*.QRP);
- abrir (*.QRP);
- fechar visualização de relatório.

Exportação para o Excel

A atual versão do aplicativo ESTATÍSTICAS permite ao usuário exportar a tabela que representa o histograma obtido (Figura 7.4.13) para o Microsoft Excel 2000, caso o usuário queira fazer gráficos e relatórios personalizados com essa ferramenta. É importante ressaltar que para que esse recurso funcione, o usuário precisa já ter previamente instalado o Microsoft Excel 2000.

Como Exportar Dados de um Histograma para o Excel

A partir da tela da Figura 7.4.13 (obtida seguindo-se o método “Como Visualizar um Histograma”), a tabela mostrada é exportada para o Microsoft Excel 2000 através do botão "EXPORTAR P/ EXCEL".

Automação de Relatórios

Sob o botão "PRODUZIR RELATÓRIOS AUTOMATICAMENTE" da tela da Figura 7.4.2 é possível automatizar tanto a exportação para o Excel como a impressão de relatórios. A tela obtida encontra-se na Figura 7.4.18.

Figura 7.4.18 - Tela para Produção Automática de Relatórios

Como Imprimir Relatórios Automaticamente

Primeiramente, é necessário seleccionar quais tipos de gráficos e de quais locais serão impressos. Isso é feito deslocando-se os itens de RELATÓRIOS DISPONÍVEIS e LOCAIS DISPONÍVEIS para RELATÓRIOS SELECIONADOS e LOCAIS SELECIONADOS, respectivamente. Somente os relatórios correspondentes às opções contidas nestes dois últimos blocos serão impressos.

Para que um item seja deslocado da direita para a esquerda, isto é, de “disponível” para “seleccionado”, pode-se clicar uma vez sobre o item, deixando-o destacado e, logo em seguida, pressionar o botão “>”. Uma outra alternativa é clicar duas vezes sobre o item desejado; o efeito produzido é o mesmo. O botão “>>” transfere todo o conteúdo do bloco esquerdo para a direita. (Dica: mais de um item pode ser seleccionado numa única vez; basta destacar os itens desejados e clicar o botão “>”). Analogamente, os botões “<” e “<<” transferem os itens da direita para esquerda.

Escolhidos locais e relatórios desejados, faz-se necessário escolher o tipo de evento VTCD (SAG ou SWELL) e o período desejado. As opções FREQUÊNCIA ACUMULADA E TODOS OS MESES DO ANO são opcionais e funcionam sob as mesmas condições já descritas nos itens anteriores.

Finalmente, os relatórios serão produzidos e impressos pressionando-se o botão "IMPRIMIR".

Como Exportar Dados de um Gráfico para o Excel Automaticamente

Para automatizar a exportação ao Excel, devem ser seguidos os passos exatamente como descritos no item anterior, todavia pressiona-se EXPORTAR PARA O EXCEL no lugar de IMPRIMIR.

8. RESULTADOS OBTIDOS

8.1. Procedimentos usados para avaliação

A verificação dos resultados da metodologia de estimação foi feita utilizando dados obtidos de simulações de faltas na rede piloto, da região de Pirapama II, realizadas por meio do programa ATP (Alternative Transients Program).

Nas simulações consideradas, as diferenças entre os valores do ATP e os do **Estimador** são provocadas pela diferença no modelamento da rede e das cargas e diferença nas condições de carga.

8.2. Contingências consideradas

As seguintes situações de contingência foram consideradas:

- Refinações de Milho: falta dupla fase – terra, simulação ATP sem carga;
- Refinações de Milho: falta dupla fase – terra, simulação ATP com carga representada pelo modelo de impedância constante;
- Piedade: falta fase terra, simulação ATP sem carga;
- Suape: falta fase terra, simulação ATP em carga;
- Trecho entre as barras de Pirapama II e Recife II: falta fase terra, simulação ATP sem carga;
- Trecho entre as barras Sec. Jussaral e Der. UJB: falta dupla fase – terra com impedância de defeito de $10\ \Omega$, a 5 km de Sec. Jussaral, simulação ATP com carga representada pelo modelo de impedância constante;
- Pontezinha: falta dupla fase – terra, simulação ATP com carga representada pelo modelo de impedância constante;

O **Estimador** considerou a situação de carga leve.

Para pronta referência, o Anexo I apresenta o diagrama unifilar da rede piloto, com indicações dos pontos de medição previstos.

8.3. Exemplos de formas de onda de tensão e corrente obtidas das simulações com ATP

As Figuras 8.1 à 8.3 apresentam exemplos de formas de onda de tensão e de corrente durante falta na rede de subtransmissão avaliada. Essas formas de onda são traçadas a partir de valores instantâneos de tensão e de corrente que são capturados pelos medidores ou obtidos de simulações computacionais (como são os casos aqui apresentados). Nas simulações realizadas, os valores das grandezas foram obtidos considerando uma taxa aquisição de 64 amostras por ciclo, a mesma a ser usada pelos medidores reais.

As formas de onda da Figura 8.1 mostram a ocorrência de afundamentos e elevações de tensão percebidos na barra de 69 kV de Pirapama II, causados por um defeito na barra Refinações de Milho.

Na figura 8.2, que mostra as tensões na barra Simisa para a mesma falta, verifica-se que no final do evento as tensões se anulam, o que indica a ocorrência de uma interrupção no local, que é devida à abertura do disjuntor 12J1 da linha que alimenta as barras Refinações de Milho e Simisa.

Na figura 8.3 são mostradas as formas de onda de correntes passantes na SE Prazeres, para uma situação de defeito na linha Pirapama-Prazeres.

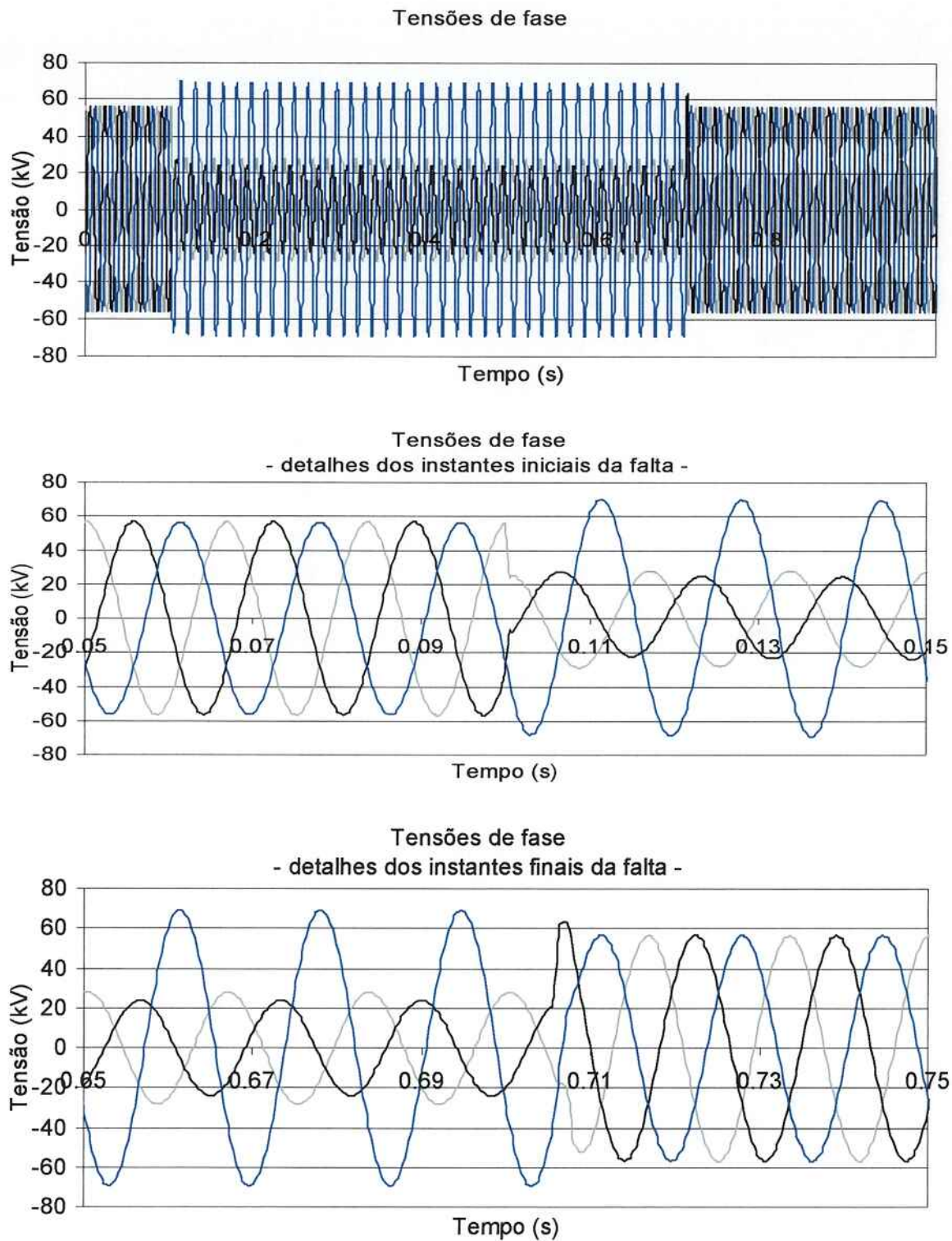


Figura 8.1 - Gráficos da forma de onda de tensão na barra Pirapama II durante a ocorrência de uma falta (dupla fase - terra) na barra Refinações de Milho (simulação).

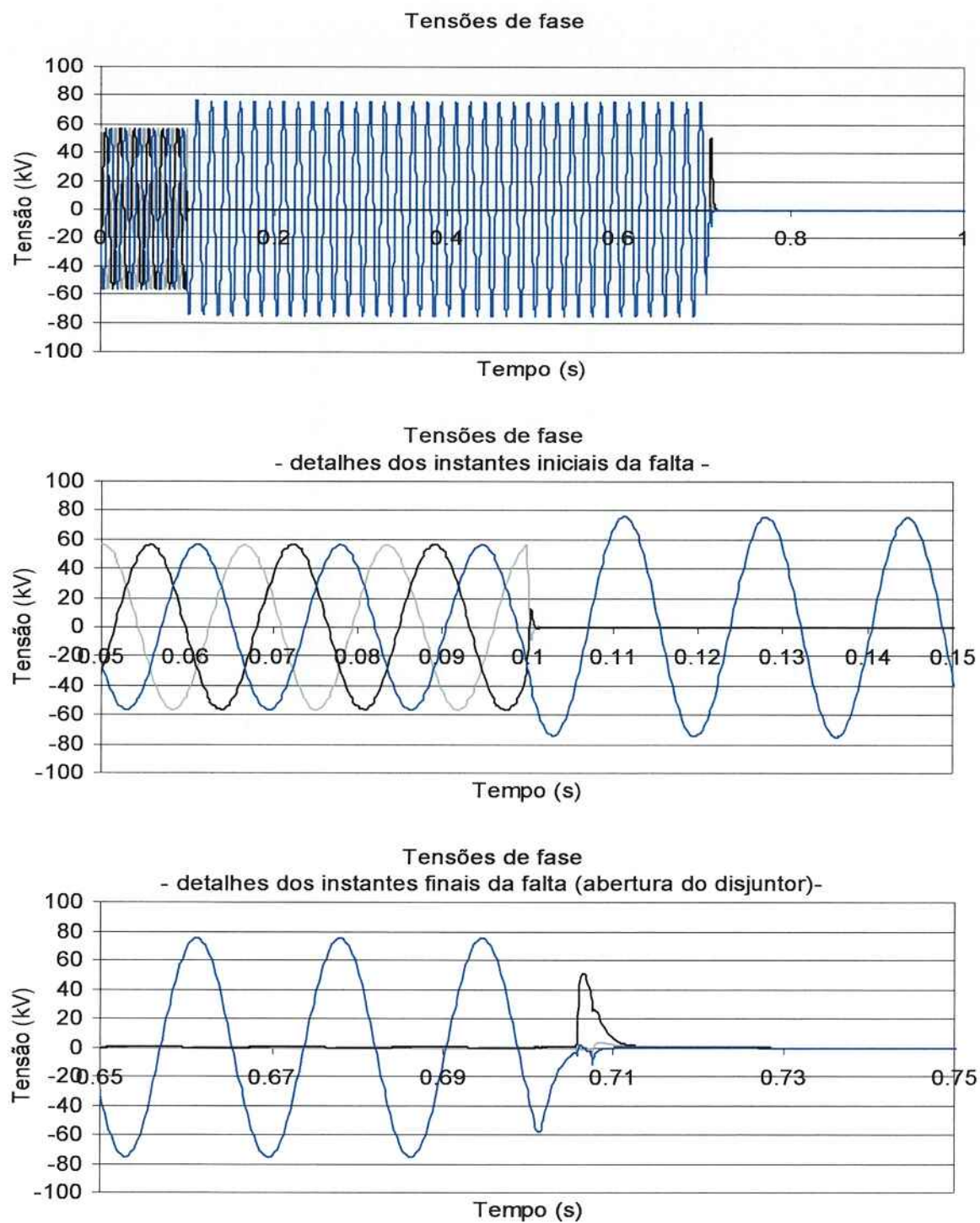


Figura 8.2 - Gráficos da forma de onda de tensão na barra Simisa durante a ocorrência de uma falta (dupla fase - terra) na mesma barra (simulação).

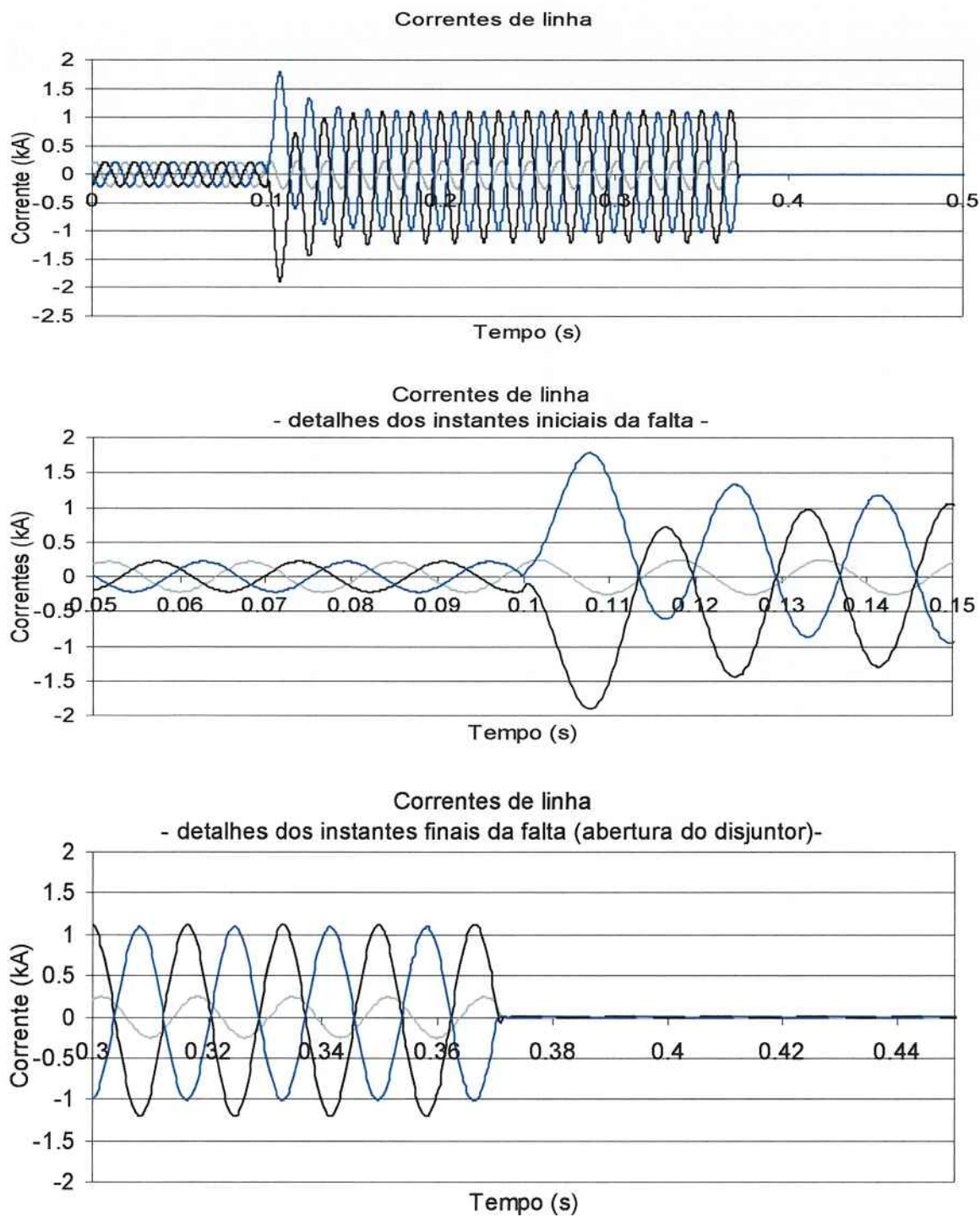


Figura 8.3 - Gráficos da forma de onda das correntes passantes na SE Prazeres durante a ocorrência de uma falta (fase - terra) na linha Pirapama-Prazeres (simulação).

8.4. Valores de tensões obtidos com o ATP

Os dados de medição são processados de forma a fornecer os dados de entrada para realizar a estimação.

A leitura dos dados processados é feita automaticamente pelo **Estimador**, gerando uma tela como a que aparece a seguir na Figura 8.4. Essa tela apresenta os valores de tensões (em pu) durante a falta registrados pelos medidores em cada um dos sites monitorados, para uma simulação de falta dupla fase em Refinações de Milho.



Figura 8.4 - Valores de Tensão (em pu) nos Pontos de Medição para uma Falta Dupla Fase em Refinações de Milho.

Na figura 8.4, os registros dos Sites de "Refinações de Milho" e "SIMISA" apresentam valores nulos de tensão devido à interrupção ocorrida no trecho em consequência do defeito (abertura do disjuntor do ramal). Esses valores não são considerados no algoritmo de mínimos quadrados, pois, não são tensões durante o defeito, sendo desabilitados automaticamente pelo software.

A informação sobre essa interrupção é usada para definir área de pesquisa de falta, no algoritmo de localização pelo método de mínimos quadrados.

A seguir são apresentados, para as faltas consideradas, os valores das tensões resultantes do processamento dos resultados do ATP comparados aos valores calculados pelo estimador. As diferenças entre os valores de tensão calculados pelo ATP e os valores de tensão do calculados pelo estimador, nos casos considerados, são de até 12,5 %.

a) Falta dupla fase terra na barra Refinações de Milho, simulação ATP sem carga

Barra	ATP			ESTIMADOR			% DIFERENÇA		
	VA	VB	VC	VA	VB	VC	VA	VB	VC
IN5-	18,043	17,151	50,658	18,126	17,449	50,475	-0,465	-1,738	0,360
PORT	18,468	17,476	50,865	18,565	17,927	50,555	-0,525	-2,580	0,610
QBCR	18,462	17,517	50,805	18,565	17,927	50,555	-0,556	-2,342	0,493
PTZH	18,182	17,415	50,707	18,126	17,449	50,475	0,303	-0,198	0,458
PIED	18,082	17,022	50,820	18,126	17,449	50,475	-0,243	-2,510	0,678
RHOD	18,043	17,156	50,652	18,126	17,449	50,475	-0,460	-1,710	0,350
REFM	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SIMI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PRZ1	18,083	17,021	50,821	18,126	17,449	50,475	-0,238	-2,517	0,681
SEJU	18,243	17,344	50,744	18,126	17,449	50,475	0,639	-0,609	0,530
PORG	18,222	17,376	50,712	18,126	17,449	50,475	0,524	-0,424	0,466
VIT2	18,198	17,437	50,834	18,126	17,449	50,475	0,395	-0,069	0,707

Tabela 8.1 - Tensões nas barras Monitoradas

b) Falta dupla fase terra na barra Refinações de Milho, simulação ATP com carga representada pelo modelo de impedância constante

Barra	ATP			ESTIMADOR			% DE ERRO		
	VA	VB	VC	VA	VB	VC	VA	VB	VC
IN5-	19,866	16,641	49,077	18,126	17,449	50,475	8,758	-4,859	-2,850
PORT	20,593	16,412	47,999	18,565	17,927	50,555	9,850	-9,230	-5,325
QBCR	20,527	16,562	48,219	18,565	17,927	50,555	9,560	-8,245	-4,844
PTZH	20,015	16,233	48,309	18,126	17,449	50,475	9,434	-7,491	-4,484
PIED	20,244	15,651	47,068	18,126	17,449	50,475	10,458	-11,489	-7,238
RHOD	19,869	16,525	48,865	18,126	17,449	50,475	8,769	-5,594	-3,295
REFM	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SIMI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PRZ1	20,261	15,600	46,970	18,126	17,449	50,475	10,536	-11,856	-7,463
SEJU	20,041	16,132	48,076	18,126	17,449	50,475	9,554	-8,167	-4,991
PORG	20,015	15,796	47,379	18,126	17,449	50,475	9,436	-10,466	-6,534
VIT2	20,276	15,510	46,833	18,126	17,449	50,475	10,603	-12,504	-7,778

Tabela 8.2 - Tensões nas barras Monitoradas

c) Falta fase-terra na barra Piedade, simulação ATP sem carga

Barra	ATP			ESTIMADOR			% DIFERENÇA		
	VA	VB	VC	VA	VB	VC	VA	VB	VC
IN5-	20,088	48,855	46,182	20,636	48,603	45,854	-0,467	0,298	0,453
PORT	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
QBCR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PTZH	20,086	48,864	46,192	20,636	48,603	45,854	-0,478	0,314	0,474
PIED	0,022	55,592	53,246	20,636	48,603	45,854	-0,434	0,358	0,462
RHOD	20,088	48,856	46,183	20,636	48,603	45,854	-0,468	0,300	0,455
REFM	20,088	48,859	46,187	20,636	48,603	45,854	-0,471	0,306	0,464
SIMI	20,087	48,861	46,188	20,636	48,603	45,854	-0,472	0,310	0,466
PRZ1	3,141	54,439	52,064	20,636	48,603	45,854	-0,433	0,359	0,462
SEJU	20,107	48,930	46,241	20,636	48,603	45,854	-0,354	0,448	0,583
PORG	20,092	48,948	46,223	20,636	48,603	45,854	-0,314	0,399	0,515

VIT2	20,100	48,959	46,272	20,636	48,603	45,854	-0,383	0,503	0,649
------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------

Tabela 8.3 - Tensões nas barras Monitoradas

d) Falta fase-terra na barra Suape, simulação ATP sem carga

Barra	ATP			ESTIMADOR			% DIFERENÇA		
	VA	VB	VC	VA	VB	VC	VA	VB	VC
IN5-	20,540	48,748	46,063	20,636	48,603	45,854	-0,467	0,298	0,453
PORT	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
QBCR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PTZH	20,538	48,756	46,072	20,636	48,603	45,854	-0,478	0,314	0,474
PIED	20,547	48,777	46,067	20,636	48,603	45,854	-0,434	0,358	0,462
RHOD	20,540	48,749	46,064	20,636	48,603	45,854	-0,468	0,300	0,455
REFM	20,540	48,752	46,067	20,636	48,603	45,854	-0,471	0,306	0,464
SIMI	20,539	48,754	46,069	20,636	48,603	45,854	-0,472	0,310	0,466
PRZ1	20,547	48,778	46,067	20,636	48,603	45,854	-0,433	0,359	0,462
SEJU	20,564	48,822	46,123	20,636	48,603	45,854	-0,354	0,448	0,583
PORG	20,572	48,798	46,091	20,636	48,603	45,854	-0,314	0,399	0,515
VIT2	20,558	48,848	46,154	20,636	48,603	45,854	-0,383	0,503	0,649

Tabela 8.4 - Tensões nas barras Monitoradas

e) Falta fase-terra no trecho entre as barras de Pirapama II e Recife I, simulação ATP sem carga

Barra	ATP			ESTIMADOR			% DIFERENÇA		
	VA	VB	VC	VA	VB	VC	VA	VB	VC
IN5-	24,528	47,207	44,036	24,445	47,098	43,927	0,336	0,231	0,247
PORT	24,622	47,247	44,093	24,522	47,125	43,973	0,405	0,258	0,271
QBCR	24,621	47,243	44,089	24,524	47,124	43,972	0,394	0,251	0,264
PTZH	24,529	47,213	44,042	24,442	47,099	43,929	0,355	0,242	0,256
PIED	24,532	47,226	44,054	24,435	47,103	43,932	0,393	0,262	0,275

RHOD	24,528	47,207	44,036	24,445	47,098	43,927	0,338	0,232	0,248
REFM	24,529	47,210	44,039	24,444	47,098	43,928	0,346	0,236	0,252
SIMI	24,529	47,211	44,040	24,443	47,098	43,928	0,350	0,239	0,254
PRZ1	24,532	47,226	44,054	24,435	47,103	43,932	0,393	0,262	0,275
SEJU	24,549	47,291	44,111	24,368	47,135	43,968	0,738	0,330	0,325
PORG	24,543	47,273	44,094	24,408	47,115	43,947	0,551	0,334	0,333
VIT2	24,554	47,314	44,132	24,355	47,142	43,975	0,811	0,363	0,356

Tabela 8.5 - Tensões nas barras Monitoradas

f) Falta dupla fase - terra no trecho entre as barras de Sec. Jussaral – Der. UJB, a 5 km, situação com carga representada pelo modelo de impedância constante

Barra	ATP			ESTIMADOR			% DE ERRO		
	VA	VB	VC	VA	VB	VC	VA	VB	VC
IN5-	43,33	28,88	30,68	44,25	27,24	31,27	-2,123	5,679	-1,923
PORT	42,61	28,87	30,2	44,28	27,43	31,47	-3,919	4,988	-4,205
QBCR	42,76	28,92	30,34	44,28	27,43	31,47	-3,555	5,152	-3,724
PTZH	42,81	28,7	30,24	44,25	27,23	31,27	-3,364	5,122	-3,406
PIED	41,97	28,43	29,57	44,25	27,23	31,26	-5,432	4,221	-5,715
RHOD	43,17	28,81	30,54	44,25	27,24	31,27	-2,502	5,449	-2,390
REFM	43,28	28,87	30,65	44,25	27,24	31,27	-2,241	5,646	-2,023
SIMI	43,27	28,86	30,64	44,25	27,23	31,27	-2,265	5,648	-2,056
PRZ1	41,91	28,4	29,52	44,25	27,23	31,26	-5,583	4,120	-5,894
SEJU	46,42	9,44	14,55	48,27	8,54	15,24	-3,985	9,534	-4,742
PORG	42,64	25,57	27,67	44,88	24,34	29,08	-5,253	4,810	-5,096
VIT2	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000

Tabela 8.6 - Tensões nas barras Monitoradas

8.5. Análise dos resultados

Nesta seção é feita a avaliação do comportamento do **Estimador** para os casos simulados com o ATP.

a) falta dupla fase terra na barra Refinações de Milho, simulação ATP sem carga

O **Estimador** indicou corretamente o local e o tipo de falta.

O **Estimador** foi processado considerando e sem considerar as informações sobre blocos interrompidos pela falta.

A Figura 8.5 apresenta o resultado deste processo de localização, onde se tem como ponto de ocorrência da falta a barra de Refinações de Milho.

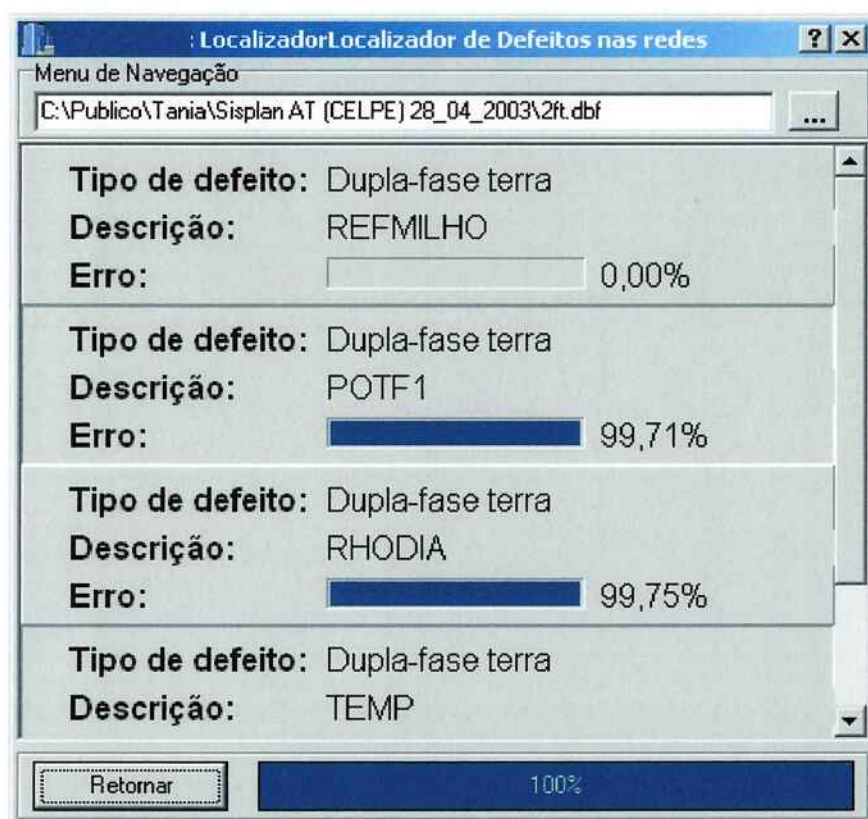


Figura 8.5 - Resultados da aplicação do método de mínimos quadrados

b) falta dupla fase terra na barra Refinações de Milho, simulação ATP com carga representada pelo modelo com impedância constante

O **Estimador** indicou o seguinte:

- local de falta: barra Refinações de Milho (indicação correta);
- tipo de falta: dupla fase - terra (indicação correta).

Neste caso, houve indicação correta do tipo de falta e também do local onde ocorreu a falta.

Verificou-se neste caso que uma melhoria na estimação foi possível devido ao fato de existir um medidor na parte afetada pela interrupção causada pela falta, fornecendo a informação da interrupção nessa parte do sistema.

c) falta fase-terra na barra Piedade, simulação ATP sem carga

O **Estimador** indicou corretamente o local e o tipo de falta.

d) falta fase-terra na barra Suape, simulação ATP sem carga

O **Estimador** indicou corretamente o local e o tipo de falta.

e) falta fase-terra no trecho entre as barras de Pirapama II e Recife II, simulação ATP sem carga

O **Estimador** indicou corretamente o local e o tipo de falta.

f) falta dupla fase – terra com impedância de defeito de 10Ω no trecho entre as barras de Sec. Jussaral – Der. UJB, a 5 km, simulação ATP com carga representada pelo modelo de impedância constante

O **Estimador** indicou corretamente o tipo de falta. O local da falta foi indicado com uma diferença de 1 km.

9. CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Os processamentos apresentados mostraram que melhoria na estimação é possível devido ao fato de existir **Medidor** na parte afetada pela interrupção causada pela falta, fornecendo a informação da interrupção nessa parte do sistema.

No método de estimação desenvolvido, os medidores suprem informações não apenas quanto aos valores das tensões durante as faltas, mas também para a identificação da área afetada pela interrupção, através da detecção de tensões nulas onde os medidores se encontram. O monitoramento do estado de disjuntores também poderia indicar a área de ocorrência de defeito, mas não é utilizado inicialmente, tendo em vista requerer obras adicionais na sua implementação.

Cabe observar que mesmo a falta seja localizada em local diferente daquele onde ocorreu a falta, as tensões de VTCDs estimadas em pontos localizados em outras partes da rede podem ser satisfatórias, dependendo da situação, pois diferentes pontos de falta podem resultar em mesmas tensões no ponto de avaliação.

Estimação das Tensões de VTCDs

Uma vez que a localização e o tipo de falta são obtidos, o **Estimador** pode fornecer as tensões estimadas, para qualquer ponto do sistema.

Através de simulações verificou-se que a exatidão na localização de falta e estimação das tensões de VTCDs depende da proximidade entre os valores das tensões calculadas pelo **Estimador** para as condições de falta consideradas e as tensões que realmente são verificadas na rede real durante as faltas ocorridas.

Na prática podem ocorrer situações em que o **Estimador** forneça indicações que não correspondam exatamente à realidade.

Pode ocorrer, também, que, embora a localização de falta não seja realizada com precisão, a estimação das tensões de VTCDs em pontos específicos da rede seja satisfatória, o que já poderia ser considerado um bom resultado para o objetivo de avaliar as tensões de VTCDs. Contudo, é desejável que o **Estimador** realize tanto a localização de falta como a estimação das tensões de forma mais exata possível.

A precisão na localização de falta e na estimação das tensões de VTCDs depende também de alguns outros fatores como a disponibilidade de todas as informações de medição previstas na metodologia, suprimento de dados corretos da rede ao **Estimador** e comportamento real das tensões e correntes no sistema durante as ocorrências de faltas em relação ao estimado através de modelos de cálculo adotados para a implementação do estimador (embora tenha sido usados modelos de cálculo bastante consagrados não se dispõe, hoje, de informações suficientes para prever todas as situações em que os comportamentos dos modelos possam se afastar da realidade).

Os seguintes fatores, que podem causar imprecisões na localização de falta e na estimação das tensões de VTCDs, podem ser enumerados:

- imprecisão nos parâmetros da rede utilizados para a modelagem da rede, como impedâncias, valores das cargas, configuração, etc.;
- possibilidade de faltas em diferentes trechos de linha levarem a condições de tensão de VTCD semelhantes nos pontos de medição, causando a uma indeterminação quanto à localização do ponto de falta (na prática, esse fato pode fazer com que o estimador indique um ponto de falta em um trecho de rede que não corresponda à realidade);
- dificuldade prática de obter informações adicionais necessárias para eliminar essa indeterminação;
- eventual influência de fatores não previstos nos modelos de cálculo utilizados para a determinação das tensões de VTCDs;
- eventual possibilidade de que em algumas situações os resultados obtidos do processamento dos dados de medição sejam afetados por fatores não contemplados na metodologia, como ocorrência de transitórios.

O desempenho do estimador de VTCDs deve ser avaliado ao longo do tempo, utilizando dados de medições reais e dados operativos. A obtenção dos dados

necessários para essa avaliação (medições e dados operativos) pode levar um tempo considerável. É comum que a obtenção de um conjunto de dados que permita uma avaliação adequada leve vários meses, dada a natureza aleatória da ocorrência dos eventos de VTCDs.

10. BIBLIOGRAFIA

- 10.1.** Bollen, M. H. J. – Understanding Power Quality Problems; Voltages Sags and Interruptions – IEE Press Series on Power Engineering – 1999.
- 10.2.** Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W. – Electric power Systems Quality – McGraw Hill, NY – 1966.
- 10.3.** Kagan, N.; Matsuo, N. M.; Ferrari, E. L.; Duarte, S. X.; Rocco, A.; Rosa, P.; Arango, T. P. L.; Santos, W. B.; Marinho, S.; Cavaretti, J. L.; Tenório, A.; Souza, L. R. – Estimadores de Variações de Tensão de Curta Duração para Redes de Distribuição e Subtransmissão – XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI 2002.
- 10.4.** Kagan, N.; Ferrari, E. L.; Matsuo, N. M.; Duarte, S. X.; Sanommiya, A.; Cavaretti, J. L.; Castellano, U. F.; Tenório, A. – Influence of RMS Variation Measurement Protocols on Electrical System Performance Indices for Voltage Sags and Swells – Proceedings of the “Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power” – Florida – USA – 2000.
- 10.5.** Silva, J. E.; Alves, L. C. F. – Apostila “Introdução a Qualidade de Energia em Sistemas Elétricos de Potência” – Cursos TARGET – São Paulo – 2001.
- 10.6.** Kagan, N.; Rocco, A.; Ferrari, E. L.; Matsuo, N. M.; Duarte, S. X.; Arango, T. P. L.; Rosa, P.; Santos, W. B.; Marinho, S. – Relatório “Caracterização do Fenômeno de VMT’s em Sistemas de Subtransmissão, Causas, Efeitos e Impactos Operacionais Sobre Processos Produtivos” – ENERQ/CELPE – São Paulo – 2003.
- 10.7.** Kagan, N.; Rocco, A.; Ferrari, E. L.; Matsuo, N. M.; Duarte, S. X.; Arango, T. P. L.; Rosa, P.; Santos, W. B.; Marinho, S. – Relatório

“Desenvolvimento do Aplicativo de Estimação de Estado para VTCD’s” – ENERQ/CELPE – São Paulo – 2003.

- 10.8.** Kagan, N.; Rocco, A.; Ferrari, E. L.; Matsuo, N. M.; Duarte, S. X.; Arango, T. P. L.; Rosa, P.; Santos, W. B.; Marinho, S. – Relatório “Ajustes da Metodologia de Estimação de VTCD’s” – ENERQ/CELPE – São Paulo – 2002.

ANEXO I

Diagrama Unifilar da Rede Piloto de Pirapama II

