



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7611  
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

## ANÁLISE DO IMPACTO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD) NA ÁREA METROPOLITANA DE BELÉM – ESTUDO DE CASOS

JUCILENO S. E SILVA	J. M. MACHADO	GHENDY C. JUNIOR	JURANDYR N. GARCEZ	EDUARDO ESTEVES	GERALDO LEÃO	JURANDIR PINHEIRO
UFPA	UFPA	UFPA	UFPA	CELPA	CELPA	CELPA

### RESUMO

O trabalho apresenta um estudo para avaliação do impacto das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) no sistema de transmissão da CELPA, objetivando identificar áreas de vulnerabilidade e a expectativa anual de afundamentos de tensão em algumas barras de interesse. Foram utilizados para o desenvolvimento do estudo, resultados provenientes de um projeto piloto de monitoramento composto de equipamentos registradores de VTCDs instalados em algumas subestações da concessionária, e de simulações de curtos-circuitos deslizantes ao longo das linhas do sistema em estudo. Tais informações servirão de subsídios para o planejamento e operação do sistema elétrico da CELPA.

### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de Energia Elétrica, Variação de Tensão de Curta Duração, Afundamento de Tensão, Monitoramento, Simulações.

### 1.0 INTRODUÇÃO

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) representam atualmente eventos da maior importância na avaliação da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) do ponto de vista dos consumidores industriais, comerciais e

residenciais, como apontam levantamentos realizados em vários países.

Os problemas ocasionados pelas VTCDs vão desde a parada de processos produtivos em indústrias, até o incômodo causado pela

diminuição momentânea da intensidade luminosa de lâmpadas incandescentes e perda de memória de cargas como videocassete, microondas e relógios digitais dos consumidores residenciais. Para a indústria a ocorrência deste distúrbio pode resultar em um custo bastante elevado, da ordem de milhões de reais, consequência de perdas de produção, tempo de espera para reinício e retomada da produção, reparo de equipamentos danificados, entre outros. Isto se dá principalmente pelo uso cada vez mais intenso na indústria, de equipamentos de controle baseados em microprocessadores, os quais aumentam a produtividade, mas por outro lado, são bastante sensíveis a distúrbios que afetam o fornecimento de energia suprida pela concessionária.

As concessionárias de energia elétrica por sua vez estão sofrendo desgastes na sua imagem empresarial, além dos custos com pedidos de ressarcimento de prejuízos sofridos por consumidores, decorrentes da má qualidade de energia. Torna-se portanto imprescindível que as empresas de energia orientem esforços no sentido de implementar programas de diagnóstico e controle da qualidade de energia já que a mesma está se transformando num fator de competitividade [1, 2, 3].

Dentro deste contexto, A UFPA através do NESC – Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicações,

do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação está desenvolvendo em conjunto com a CELPA, dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, um Projeto que visa avaliar o impacto da presença de VTCDs, especificamente os afundamentos de tensão, no sistema de transmissão da concessionária, que abrange a área metropolitana da cidade de Belém - PA. Para realizar esta tarefa estão sendo utilizados dados provenientes de RDPs (Registradores Digitais de Perturbações) instalados em subestações de 69 e 13,8 kV da concessionária, e de simulações de curtos - circuitos ao longo das linhas do sistema elétrico sob análise [4, 5, 6, 7]. Nesse sentido, este trabalho objetiva apresentar os resultados até então obtidos.

## 2.0 PROJETO PILOTO DE MONITORAMENTO

A metodologia adotada para a execução do Projeto Piloto de Monitoramento, consta das seguintes etapas:

- Escolha das barras a monitorar;
- Especificação e instalação dos RDPs;
- Medição e coleta de dados;

O sistema elétrico da CELPA estudado é o da Área Metropolitana de Belém, compreendendo os subsistemas regionais de Guamá e Utinga, conforme os diagramas unifilares mostrados na Figura 1. Estes subsistemas são interligados através de SEs do sistema de transmissão da Eletronorte.

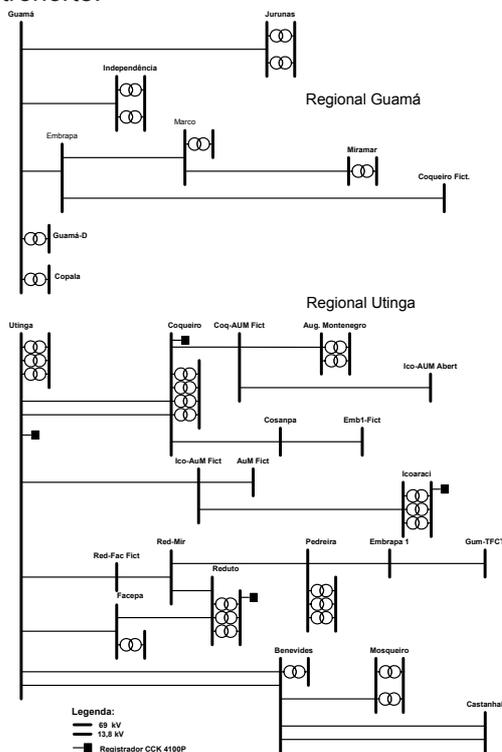


Figura 1 – Diagramas Unifilares do Sistema Celpa na Área Metropolitana de Belém

Quatro RDPs instalados nas SEs de Utinga e Coqueiro em 69 kV, Icoaraci e Reduto em 13,8 kV compõem o Sistema de Monitoramento implantado, conforme localização mostrada no diagrama unifilar da Figura 1. A escolha destas barras baseou-se nos critérios apresentados a seguir:

- I. Atendimento a carga sensível;
- II. Atendimento a áreas com alta densidade de cargas;
- III. Participação significativa de cargas dinâmicas (motores de indução e geradores) na composição total das cargas;
- IV. Áreas de interesse econômico / cargas especiais;
- V. Interligação com concessionárias ou consumidores especiais.

A Tabela 1 resume as barras selecionadas e os critérios utilizados para a escolha:

Tabela 1 – Barras Selecionadas para Monitoramento

SE	Nível de Tensão	Critérios
Utinga	69 kV	I, II, III, IV e V
Coqueiro	69 kV	II e III
Icoaraci	13,8 kV	I e II
Reduto	13,8 kV	I e IV

Para atender aos requisitos de monitoramento necessários para o desenvolvimento do estudo, foram adquiridos no mercado nacional, os instrumentos monitoradores de tensão CCK 4100P fabricados pela CCK – Automação [8].

Para a aquisição e manipulação dos dados registrados é necessário conectar o instrumento a um microcomputador através de comunicação serial RS 485, onde deve estar instalado o programa SW – CCK 4100, que disponibiliza ao usuário funções básicas, tipo: programar o equipamento; realizar a leitura dos dados registrados nas memórias do equipamento e gravar em disco um arquivo com extensão “.E41”.

## 3.0 SIMULAÇÕES

Outra etapa do estudo consistiu na determinação do impacto sobre o sistema elétrico da CELPA, da ocorrência de afundamentos de tensão, a partir da análise de dados provenientes de simulações de defeitos. O objetivo é estimar o número de ocorrências de afundamentos de tensão por ano e a extensão da área de

vulnerabilidade para as barras de interesse citadas anteriormente, comparando os resultados com aqueles provenientes das medições.

O programa utilizado nas simulações foi o ANAQUALI do Cepel [9]. Este programa baseia-se na simulação de curtos-circuitos deslizantes aplicados ao longo das linhas e barramentos existentes dentro da região elétrica estudada, e na monitoração das tensões (fase-neutro e/ou fase-fase) na barra de interesse.

Para obtenção da estimativa do número de ocorrências de afundamentos de tensão, é necessário considerar as taxas de falhas das linhas de transmissão do sistema, a composição dos diversos tipos de curtos-circuitos e a avaliação da área de vulnerabilidade.

A fim de se verificar a extensão da área de vulnerabilidade foram simulados os quatro tipos de curtos-circuitos: FT, FF, FFT e FFF, a cada 10% do comprimento das linhas que compõe o sistema, contabilizando-se os trechos onde a incidência de faltas leva a tensões abaixo de 0,9 pu nas barras monitoradas. O produto da extensão em km da área de vulnerabilidade, pela taxa de falha das linhas fornece o valor estimado de afundamentos de tensão.

Para este estudo, as taxas de falhas para as linhas que compõe o sistema estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Taxas de Falhas em Linhas de Transmissão por Tipo de Defeito

Tensão (kV)	Falhas/100 km/ano	Falhas/Tipo de Defeito (%)			
		FT	FF	FFT	FFF
69	12	58	11	25	6

Na contabilização da área de vulnerabilidade, a amplitude do afundamento de tensão considerada pelo ANAQUALI é obtida por meio de agregação de fases, ou seja, para um mesmo evento, o programa escolhe a menor entre as tensões fase-neutro e fase-fase.

#### 4.0 ANÁLISE DE RESULTADOS MONITORADOS E SIMULADOS

Apresenta-se a título ilustrativo, os resultados de monitoramento e simulação na SE Utinga 69 kV. Esta barra foi escolhida, devido sua importância topológica no sistema elétrico da Celpa, além de ser um ponto de interligação da Celpa com a Eletronorte, conforme os critérios apresentados no item 2.1.

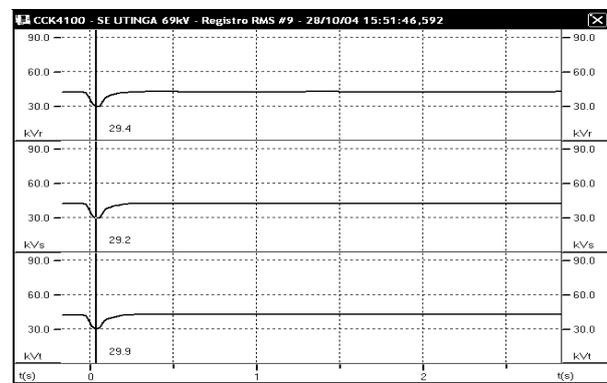
#### 4.1 Resultados de monitoramento

Os resultados apresentados correspondem aos registros de afundamentos de tensão obtidos até o momento, por meio do RDP instalado na SE Utinga, com um período de monitoramento de aproximadamente quatro meses.

As Figuras 2a e 2b mostram, respectivamente, detalhes da instalação do instrumento de monitoramento e o registro RMS de um afundamento de tensão capturado pelo instrumento.



(a)



(b)

Figura 2 – (a) Detalhes do RDP Instalado na SE Utinga; (b) Registro RMS de um Afundamento de Tensão Capturado

Com a base de dados de registros obtida no período de monitoramento, foi confeccionada a tabela de frequência de afundamentos de tensão e a curva correspondente a distribuição de frequência acumulada de afundamentos de tensão, mostrados, respectivamente, na Tabela 3 e Figura 4.

Tabela 3 – Freqüência de Ocorrências de Afundamentos de Tensão por Faixas de Amplitude e Duração

Amplitude (pu)	Duração (seg)					
	0 < 0,2	0,2 < 0,4	0,4 < 0,6	0,6 < 0,8	0,8 < 1,0	≥ 1,0
>0,8- 0,9	20	3	0	2	0	8
>0,7- 0,8	6	0	1	0	0	2
>0,6- 0,7	2	0	0	0	0	0
>0,5- 0,6	0	0	0	0	0	0
>0,4- 0,5	0	0	0	0	0	0
>0,3- 0,4	0	0	0	0	0	0
>0,2- 0,3	0	0	0	0	0	0
>0,1- 0,2	0	0	0	0	0	0

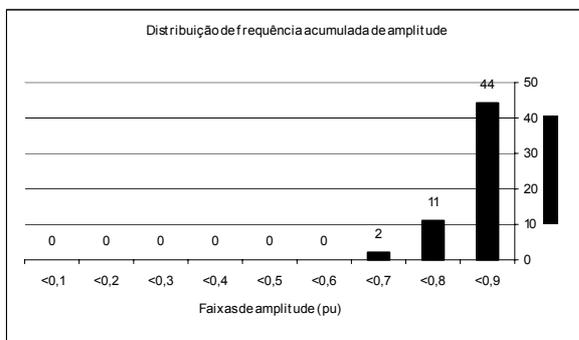


Figura 3 – Distribuição de Freqüência Acumulada de Afundamentos de Tensão por faixa de Amplitude

A Figura 3 mostra que houve a ocorrência de 44 afundamentos de tensão com amplitude menor que 0,9 pu da tensão nominal, na SE Utinga. Observa-se ainda, pela Tabela 3 que a maioria dos afundamentos de tensão encontra-se na faixa de 0,8 a 0,9 pu, e duração inferior a 0,2 segundos, o que os caracterizam como eventos não severos. Portanto, estes resultados são uma indicação de que esta barra apresenta uma boa qualidade de energia, uma vez que a grande maioria dos afundamentos de tensão registrados, provavelmente não ocasionariam problemas em consumidores com cargas sensíveis supridos por esta SE.

#### 4.2 Resultados das simulações

Para facilitar a execução dos estudos e a visualização de resultados, os subsistemas regionais de Guamá e Utinga, que compõe o sistema elétrico da Celpa de interesse, conforme diagramas unifilares apresentados na Figura 1,

foram designados como áreas elétricas 2 e 3, respectivamente.

Os resultados das simulações tendo como barra de interesse a SE Utinga, foram analisados sob duas perspectivas de afundamentos de tensão: Área de vulnerabilidade relativa à faltas, desagregada por área e tipo de defeito; e a freqüência anual de afundamentos de tensão, desagregada da mesma maneira.

##### 4.2.1 Áreas de vulnerabilidade

Uma área de vulnerabilidade representa uma região do sistema elétrico na qual a ocorrência de faltas submete uma barra de interesse a afundamentos de tensão abaixo de um valor predefinido. Por isso, o tamanho de uma área de vulnerabilidade depende da localização da barra monitorada dentro do sistema elétrico.

As áreas de vulnerabilidade são apresentadas neste trabalho através de um gráfico que mostra a extensão total, em km, dos trechos de linhas do sistema elétrico, que submete uma barra de interesse a afundamentos abaixo de um valor pré-determinado.

A Tabela 4 apresenta a extensão total das linhas para os subsistemas regionais de Guamá e Utinga.

Tabela 4 – Extensão das Linhas para os Subsistemas Celpa

Subsistema	Extensão (km)
Guamá	30
Utinga	276

Nos estudos realizados para a barra de Utinga 69 kV, identificou-se a Área 3 (regional de Utinga) como a mais exposta a defeitos com 90,05% ou aproximadamente 1038 km, e portanto, a que mais contribui para afundamentos de tensão nessa barra. A Área 2 (regional de Guamá) contribui com 9,95% do total, correspondente a extensão muito maior das linhas do subsistema Utinga e da posição relativa da barra de interesse.

Na análise por tipo de defeito, verifica-se uma igual contribuição entre os defeitos que envolvem mais de uma fase, ou seja, as faltas FFF, FF e FFT, com 25,6% cada, ficando os 23,2% restantes para a falta FT. Estas considerações podem ser visualizadas nas Figuras 4 e 5.

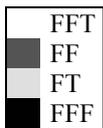
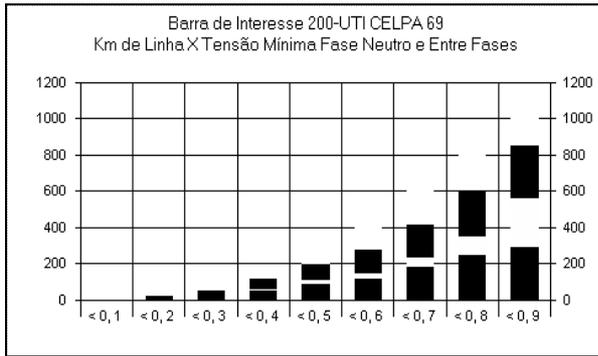


Figura 4 – Extensão das Áreas de Vulnerabilidade para a SE Utinga Desagregada por Tipo de Defeito

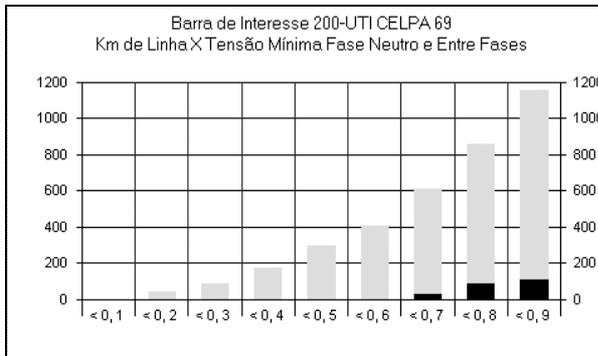


Figura 5 – Extensão das Áreas de Vulnerabilidade para a SE Utinga Desagregada por Área Elétrica

#### 4.2.2 Expectativa anual de afundamentos de tensão

A predição da frequência anual de afundamentos de tensão para a barra de Utinga foi obtida a partir do produto das taxas de falhas das linhas de transmissão do sistema elétrico, pela área de vulnerabilidade calculada anteriormente.

Na análise dos resultados verificou-se que a frequência de afundamentos de tensão, por tipo de defeito, é dominada pelos defeitos FT, que na média contribuiu duas vezes mais que os defeitos FFT, o segundo em expectativa de afundamentos, como mostra a Figura 6.

Quando a análise é direcionada para área elétrica, observa-se que 90,9% das ocorrências dos afundamentos de tensão na barra de

interesse é proveniente da incidência de faltas sobre a área 3, conforme mostra a Figura 7. Este resultado é devido diretamente a sua maior participação na composição da área de vulnerabilidade da SE Utinga.

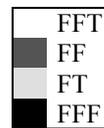
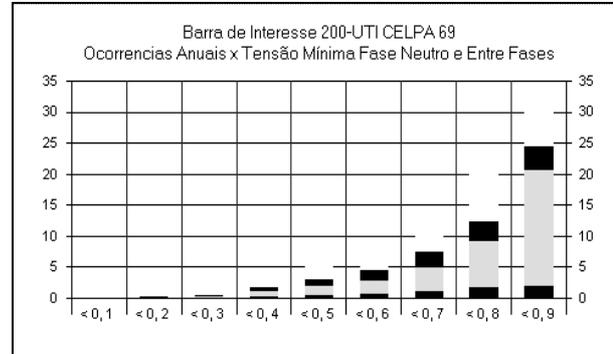


Figura 6 – Número Esperado de Afundamentos de Tensão para a SE Utinga Desagregado por Tipo de Defeito

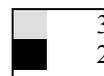
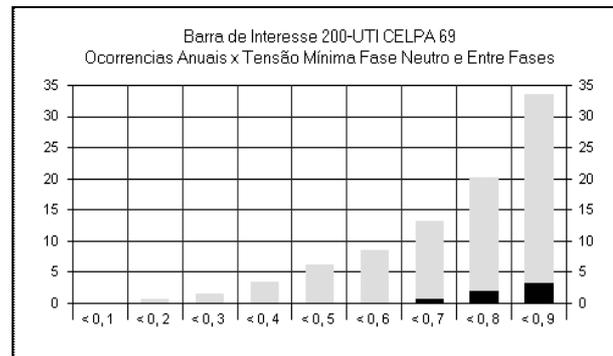


Figura 7 – Número Esperado de Afundamentos de Tensão para a SE Utinga Desagregado por Área Elétrica

Quando se comparam os resultados de ocorrências de afundamentos obtidos de monitoramento com o de simulações, verifica-se um registro de ocorrências 25% maior nas medições (44 contra 33 ocorrências de simulações). Isto decorre de fatores como [10]:

- Os afundamentos de tensão são distúrbios aleatórios, cujo processo de estimação não é trivial;
- Os resultados de simulação dependem fundamentalmente da precisão dos dados estatísticos de falta no sistema. Utilizar

valores típicos médios de taxas poderá resultar em erros apreciáveis;

- As ocorrências de faltas no sistema elétrico variam de ano para ano e dependem de um conjunto de variáveis aleatórias, como por exemplo, das incidências de descargas atmosféricas.

## 5.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou resultados parciais obtidos de um projeto de pesquisa que se encontra em fase de conclusão, desenvolvido para as Centrais Elétricas do Pará - CELPA. Como estudo de caso, foram relatados os resultados de monitoramento e simulação obtidos para a SE Utinga, mostrando que a mesma apresenta um bom desempenho, com relação à incidência de afundamentos de tensão, sendo a grande maioria eventos superficiais e de curta duração.

Estudos desta natureza, disponibilizarão para a CELPA informações sobre o desempenho de suas barras, com relação à qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores industriais com cargas sensíveis. Outro benefício está relacionado ao estabelecimento de diretrizes para atribuição de responsabilidades por danos em instalações consumidoras devido a ocorrência de VTCDs no sistema de distribuição.

Essas informações podem ser usadas para orientar futuros investimentos, correspondentes a obras de reforço no sistema ou instalação de equipamentos específicos para a mitigação dos problemas e garantir um nível de qualidade adequado, de vital importância para a concessionária, especialmente em um mercado aberto e competitivo.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Garcez, J. N.; Oliveira, R. C. L.; Oliveira, L. A. H. G. et al. "Módulo de Consulta Inteligente para Apoio a Decisão sobre Ressarcimento de Danos ao Consumidor em Rede de Distribuição de Energia Elétrica". XIV CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Setembro, Natal – RN.
- [2] Garcez, J. N.; Oliveira, R. C. L.; Tostes, M. E. et al. "Rede Neural de Ativação Interativa Competitiva – IAC para Auxílio à Tomada de Decisão sobre Responsabilidade por Danos em Consumidores de Energia Elétrica". II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Novembro, 2003, Salvador – BA.
- [3] Garcez, J. N.; Bezerra, U. H.; Oliveira, R. C. L.. "Intelligent Decision Support System for an Electric Energy Distribution Utility". Proc. 4º IASTED International Conference – Power and Energy Systems, June, 2004, Rhode, Greece.
- [4] Bezerra, U. H.; Garcez, J. N.; Moscoso, M. N. A. et al. "Sistema para Monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica de Um Grupo de Consumidores em Baixa Tensão". I CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2001, Brasília - DF.
- [5] Bezerra, U. H.; Alves, R. N. C.; Garcez, J. N. et al. "Instrumento para Monitoramento da Qualidade de Energia em Rede de Distribuição Elétrica". IV SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, 2001, Porto Alegre – RS.
- [6] Bezerra, U. H.; Alves, R. N. C.; Garcez, J. N. et al. "Power Quality Monitoring Instrument for Energy Distribution Feeder". 11<sup>th</sup> IMEKO TC – 4 Symposium – Trends in Electrical Measurements and Instrumentation, 2001, Lisboa – PT.
- [7] Bezerra, U. H.; Alves, R. N. C.; Garcez, J. N. et al. "Integrating a Power Quality Monitoring System in a Distribution Control Center". IEEE Porto Power Tech, 2001, Porto - PT.
- [8] Monitor de Tensão CCK 4100, "Manual de Instalação e Operação do Programa SW CCK 4100", Versão 3.0, 2000.
- [9] Cepel, "ANAQUALI – Manual do Usuário", Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Versão 2.0, 2003.
- [10] M. O. B. Medeiros, J. M. C. Filho, J. P. G. Abreu, F. P. Montezuma, "Monitoração da Qualidade de Energia de Um Sistema de Distribuição", V SBQEE, 17 a 20/08/2003, Aracaju – SE.