

 <p>18º SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</p>	<p>06 a 10 de Outubro de 2008 Olinda - PE</p>
---	---

Monitoramento da Qualidade da Tensão através do indicador <i>CQT</i>	
José Luiz Ângelo Pereira	Luisa Rotsen Correa
CEMIG	UFMG
jluizp@cemig.com.br	luisarotsen@yahoo.com.br

PALAVRAS CHAVE:

Controle, Estatística, Qualidade,
Monitoramento, Tensão.

DADOS DA EMPRESA:

Nome: Companhia Energética de Minas Gerais
Endereço: Rua Itambé, 114. B.H. – M.G.
Telefone/fax: 3506 7339

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e tem como objetivo a construção de um aplicativo capaz de monitorar a qualidade de tensão nos barramentos de 13,8kV de subestações de distribuição de forma rápida e eficaz.

Atualmente esse monitoramento é realizado em tempo real através do software de supervisão e aquisição de dados da concessionária (*xOMNI*), que emite alarmes quando são detectados valores de tensão fora da faixa de especificação e oferece ao operador a possibilidade de gerar gráficos de tensão para todos os pontos supervisionados. O controle por alarmes é uma ferramenta de caráter corretivo e, portanto, não é capaz de assegurar a qualidade de tensão. E como a quantidade de pontos de medição a serem monitorados é muito grande – só na região metropolitana são 95 barramentos de 13,8kV – o acompanhamento diário demanda muito tempo e se torna inviável.

Esse estudo foi desenvolvido com orientação de professores do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e um grupo de estudo de controle estatístico de processos da União Brasileira para Qualidade (UBQ) e deu origem a um aplicativo de monitoramento da qualidade de tensão que será utilizado pelo Centro de Operação Metropolitano da CEMIG.

1. INTRODUÇÃO

O Centro de Operação Metropolitano (COD Metropolitano) da CEMIG é responsável pela supervisão e controle de 51 subestações, 92 linhas de transmissão, 390 alimentadores de distribuição, 111 transformadores e potência instalada de 2.441MVA.

Um dos principais produtos de uma concessionária de energia elétrica é a tensão fornecida aos seus consumidores. Além de influenciar na vida útil dos equipamentos em operação, ela também se relaciona diretamente com o faturamento da companhia. O controle do módulo de tensão permite o aumento da capacidade de transmissão de fluxo de potência ativa às cargas do sistema. Assim, para cargas do tipo impedância constante a aplicação de uma tensão mais baixa diminui a potência ativa e a energia consumidas, ocasionando perda de faturamento para a concessionária.

Além dessa preocupação, existe a necessidade de atender aos limites mínimos e máximos de tensão exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A ANEEL normatiza a qualidade de tensão através da Resolução número 505, cujo não cumprimento pode implicar em multa para a concessionária de energia.

Tabela 1 – Classificação de tensão de 13,8kV segundo a Resolução 505 da ANEEL

CLASSIFICAÇÃO DE TENSÃO DE ATENDIMENTO (TA)	FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE LEITURA (TL) EM RELAÇÃO À TENSÃO CONTRATADA
ADEQUADA	$0,93(TC) < TL < 1,05(TC)$
PRECÁRIA	$0,90(TC) < TL < 0,93(TC)$
CRÍTICA	$TL < 0,90TC$ OU $TL > 1,05$

Para os barramentos de 13,8kV a tensão deve permanecer entre 0,93 e 1,05 pu, como mostra a Tabela 1. Por medida de prevenção a CEMIG adota uma faixa de especificação um pouco mais estreita que a exigida pela ANEEL, admitindo valores entre 0,99 e 1,05 pu.

Este trabalho foi elaborado de acordo com as seguintes etapas:

- Definição: identificação do problema.
- Medição: preparação e teste de um sistema de medição capaz de medir a qualidade de tensão.
- Análise: etapa na qual se determinam as prováveis causas da tensão com qualidade ruim.
- Controle: monitoramento diário da qualidade de tensão a partir do índice desenvolvido.

2. DEFINIÇÃO

Vários fatores influenciam no comportamento da variação da tensão, como por exemplo: o relé, transformador de potencial e de corrente, medição, comutador do transformador, perfil de carga, horário de verão, bancos de capacitores, configuração do sistema, etc. Portanto é necessário um monitoramento eficaz do controle da tensão. Sendo assim, verificou-se a necessidade de elaborar um controle da qualidade da tensão mais efetivo, já que o controle em tempo real não é capaz de detectar situações como:

- Tensão permanecendo a maior parte do tempo próxima aos limites superior ou inferior;
- Medição interrompida, apresentando valor constante durante um longo período;
- Excesso de variação dentro dos limites especificados;

- Pouca variação dentro dos limites especificados;
- Medição errada, que não reflete a situação real.

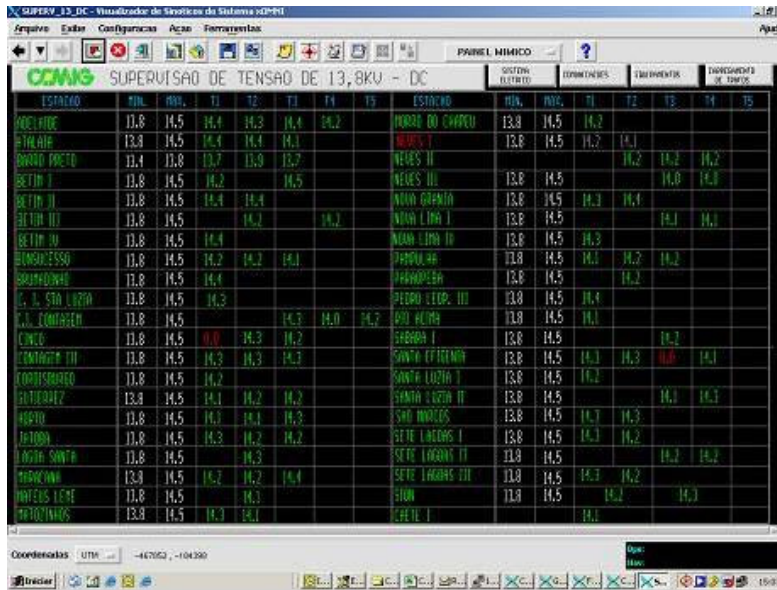


Figura 1 – Tela de Controle de tensão em tempo real, do software xOMNI

3. MEDIÇÃO

Como nem sempre é possível compreender o significado dos dados disponíveis por simples inspeção de seus valores numéricos, a estatística é uma ferramenta útil no auxílio às decisões. Quando existem coleções de dados, a estatística descritiva pode nos ajudar a classificar e analisá-las, fornecendo formas úteis de resumir suas características. Já frente a questões de parâmetros de populações, é a inferência estatística que pode nos auxiliar na obtenção dos dados necessários à solução de problemas.

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os conceitos da estratégia gerencial seis sigma, que tem como um dos aspectos fundamentais a redução da variabilidade de processos. De acordo com a filosofia de Controle Estatístico de Processos (CEP), o resultado de qualquer processo sofre variabilidade, seja ela esperada ou não. Sendo assim, para mantê-lo sob controle é necessário que a variação real não exceda a variação esperada.

O CEP nos permite controlar a qualidade envolvendo todos os elos de ligação do processo em estudo. Para medir a eficiência de um processo podemos utilizar os chamados índices estatísticos de capacidade – desenvolvidos na década de vinte por Dr. Walter Shewhart, nos Estados Unidos. Esses índices processam informações relevantes e avaliam se um processo é capaz de gerar produtos que atendam às especificações provenientes de um conjunto de dados.

No nosso contexto, o processo em evidência é o controle de tensão. Sabemos que, em decorrência da dinâmica das cargas do sistema elétrico, é esperada certa variabilidade para os valores das amostras de tensão coletadas ao longo do dia. Para realizar um controle efetivo precisamos conhecer o comportamento dessa variabilidade – ou seja – conhecer a média, o desvio padrão e os limites naturais e de especificação dos valores amostrados. Com base nesses conceitos foi desenvolvido um indicador de controle de qualidade da tensão, denominado “CQT”.

Inicialmente foi realizado um teste de normalidade nos valores de tensão dos barramentos, uma vez que os índices de capacidade só são aplicáveis a processos que estejam sob controle estatístico e cuja variável de interesse tenha distribuição próxima da normal.. Depois de constatada a característica normal da distribuição de tensão, o CQT foi definido pela fórmula a seguir.

$$CQT = \frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma} , \quad (1)$$

onde LSE é o limite superior de especificação da CEMIG, \bar{X} é a tensão média e σ é o desvio padrão das medições.

Essa formulação foi executada para vários casos simulados e reais, até que sua eficiência fosse comprovada. Foram testados pontos com regulação de tensão normal e ruim para que pudéssemos observar como o resultado da equação se comportava em cada situação. A partir daí, foi possível estabelecer limites que traduzissem o significado do valor de CQT e facilitassem a tomada de decisões do operador do sistema.

4. ANÁLISE

Foi observada uma quantidade significativa de amostras para parametrizar os intervalos do índice desenvolvido. Verificamos que o indicador pode variar em uma ampla faixa, sendo que:

- Para valores de tensão dentro dos padrões de qualidade da CEMIG o CQT assume valores entre 0,5 à 2,2;
- O CQT é menor que 0,5 quando a tensão tende para seu limite superior;
- O CQT fica entre 2,2 e 3,0 quando a tensão tende para seu limite inferior;

Os valores de desvio padrão também foram testados, e verificou-se que eles variam entre 50 e 160 para a condição de regulação normal (essa variação é decorrente da forma como foi ajustado o relé de regulação de tensão). Assim, observamos também que valores de CQT maiores que 3,0 traduzem situações em que a medição apresenta desvio padrão muito baixo, e os nulos são característicos de pontos com alto desvio padrão. No caso de ocorrerem amostras de tensão constantes durante todo o dia, o desvio padrão é zero – o que faria o CQT tender ao infinito. Nesse caso, o valor de CQT não é determinado pelo aplicativo.

Foi elaborada uma macro no EXCEL que busca o histórico das medições no software supervisor da CEMIG – 96 valores diários de tensão para cada barramento – executa a equação 1 e compara os resultados com as referências pré-estabelecidas.

- Acima de 2,2: amarelo – tensão baixa ou problema de medição;
- De 0,1 a 0,4: vermelho – tensão alta ou problema de medição;
- Entre 0,5 e 2,2: verde – tensão dentro dos padrões de qualidade exigidos pela CEMIG;
- Igual a 0: vermelho – desvio padrão das amostras de tensão alto;
- Branco – medição está constante.

Abaixo está o modelo da Tela de Monitoramento do CQT.

CQT																																			
BARRA								BARRA																											
S/E	1	2	3	4	S/E	1	2	3	4	S/E	1	2	3	4																					
BETIM 2	0,7	0,5			MATEUS LEME	1,6				MORRO DO CHAPÉU	1,1																								
BETIM 3	1,4	1,5			MATOZINHOS	0,7	0,7			NOVA LIMA 4	1,8																								
BETIM 1	0,5	0,4			NOVA LIMA 1	2,4	2,4			NOVA GRANJA	1	0,7																							
ADELAIDE	0,5	1,1	0,7	1,3	PARAÓPEBA	2,4				P. LEOPOLDO 3	0,8																								
ATALAIA	0,7	0,8	1,5		NEVES 2	0,9	1,2		1	RIO ACIMA	1,6																								
BONSUCESSO	1	1,3			SABARÁ	1,7				SETE LAGOAS 2	1,2	1,1																							
BARRO PRETO	0	0	0,5		SETE LAGOAS 3	1,2	1			SETE LAGOAS 1	0,9	1,1																							
GUTIERREZ	2	1,2	1,2		SANTA LUZIA 2	1,8	0,9			SANTA LUZIA 1	1,4																								
HORTO	1,4	1,1	0,8		<table border="1"> <tr> <td rowspan="10">LEGENDA</td> <td>ENTRE 0,5 E 2,2</td> <td>TENSÃO DENTRO DA ESPECIFICAÇÃO</td> </tr> <tr> <td>ACIMA DE 2,2</td> <td>TENDÊNCIA PARA O L.I.E. OU D.P.BAIXO</td> </tr> <tr> <td>ABAIXO DE 0,5</td> <td>TENDÊNCIA PARA O L.S.E. OU D.P.ALTO</td> </tr> <tr> <td>SEM MEDIÇÃO</td> <td>MEDIÇÃO CONSTANTE</td> </tr> <tr> <td>L.I.E - LIMITE INFERIOR DE ESPECIFICAÇÃO</td> <td></td> </tr> <tr> <td>L.S.E - LIMITE SUPERIOR DE ESPECIFICAÇÃO</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D.P - DESVIO PADRÃO</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>										LEGENDA	ENTRE 0,5 E 2,2	TENSÃO DENTRO DA ESPECIFICAÇÃO	ACIMA DE 2,2	TENDÊNCIA PARA O L.I.E. OU D.P.BAIXO	ABAIXO DE 0,5	TENDÊNCIA PARA O L.S.E. OU D.P.ALTO	SEM MEDIÇÃO	MEDIÇÃO CONSTANTE	L.I.E - LIMITE INFERIOR DE ESPECIFICAÇÃO		L.S.E - LIMITE SUPERIOR DE ESPECIFICAÇÃO		D.P - DESVIO PADRÃO							
LEGENDA	ENTRE 0,5 E 2,2	TENSÃO DENTRO DA ESPECIFICAÇÃO																																	
	ACIMA DE 2,2	TENDÊNCIA PARA O L.I.E. OU D.P.BAIXO																																	
	ABAIXO DE 0,5	TENDÊNCIA PARA O L.S.E. OU D.P.ALTO																																	
	SEM MEDIÇÃO	MEDIÇÃO CONSTANTE																																	
	L.I.E - LIMITE INFERIOR DE ESPECIFICAÇÃO																																		
	L.S.E - LIMITE SUPERIOR DE ESPECIFICAÇÃO																																		
	D.P - DESVIO PADRÃO																																		
JATOBÁ	1,2	1,3	1,9																																
MARACANÃ	1,2	1,4	0,9																																
PAMPULHA	1,1	1,2	1,7																																
SANTA EFIGÊNIA	1	0,7		2,2																															
SKN	1,3	1																																	
SÃO MARCOS	0,6	1																																	
BRUMADINHO	0,4																																		
CONTAGEM 3	1,4	1,1	0,8																																
CAETÉ	1,9																																		
CID. INDUSTRIAL		0,9	1,2	0,9																															
CINCO		1,4																																	
C.J. SANTA LUZIA	1,2																																		
LAGOA SANTA	1																																		

Figura 2 - Interface do CQT

O resultado do cálculo mostrado na equação 1 sinaliza o comportamento da variação da tensão, fazendo com que o técnico de operação tome basicamente duas ações: uma de bloqueio e outra corretiva, eliminando a causa do problema e não apenas o seu efeito – através do acionamento da engenharia de operação, proteção e controle e o técnico da operação. A partir da análise da indicação de cores descrita acima é possível fazer um levantamento das possíveis causas do problema. Um ponto amarelo, branco ou vermelho pode representar uma situação na qual:

- O relé de regulação está desajustado;
- O relé de regulação está com defeito;
- O transdutor de medição está com defeito;
- Existe falha no canal de comunicação com a remota;
- A medição indicada pelo Centro de Operação está incorreta;
- A medição na subestação está incorreta por algum motivo;
- A placa de saída analógica da remota está com defeito;
- O motor do comutador de TAP's do transformador apresenta defeito;

Essas sinalizações indicam alterações do comportamento da tensão, por exemplo: transferências de carga entre subestações, entrada ou saída indevida de bancos de capacitores, etc. A diversidade de causas dessas alterações faz com que seja necessário investigar cada caso separadamente e também acompanhar os resultados de forma constante.

5. CONTROLE

No EXCEL é digitada a data desejada e o programa executa os cálculos e sinaliza os pontos por cores, conforme descrito no item anterior. Os pontos que geraram sinalização vermelha, amarela ou branca são investigados separadamente.

Os dados são direcionados para uma planilha de teste que verifica os valores de tensão máximo, mínimo, médio e o desvio padrão das medições. Todos esses parâmetros são calculados para três diferentes faixas de horário: horário de carga leve, de carga média e de carga pesada. A partir daí, realiza-se um pré-diagnóstico do problema. Se o desvio padrão é nulo significa que a medição está “congelada” e, portanto, não é confiável. Se o desvio padrão está normal e o valor médio de tensão está próximo ao seu limite inferior ou superior, é provável que haja defeito no relé de regulação.

Com a análise dessas informações são tomadas ações como verificar medições, testar a remota, acionar técnico de manutenção para inspecionar no local e recalculer o ajuste do relé de regulação. Do dia 15/10/2007 a 19/12/2007 o monitoramento da qualidade de tensão através do CQT possibilitou a detecção de várias anormalidades e a tomada de vinte e duas ações corretivas. Seguem abaixo exemplos de alguns desses casos, ilustrados pelos gráficos de tendência do *xOMNI*.

Subestação 1

Data da ocorrência: 06/12/2007

Valor de CQT: não determinado (divisão por zero)

Cor sinalizada: branco

Através do CQT observamos que as medições de tensão da Subestação 1 estavam congeladas e dentro dos limites durante todo o dia, sinalizando a cor branca na tela (situação que jamais iria gerar alarmes). Após essa constatação foi solicitada ao Centro de Operação a realização de testes que comprovaram que a subestação não aceitava nenhum comando via telecontrole. A equipe de automação foi acionada para solucionar o problema, que não estava sendo detectado pelo *xOMNI*.

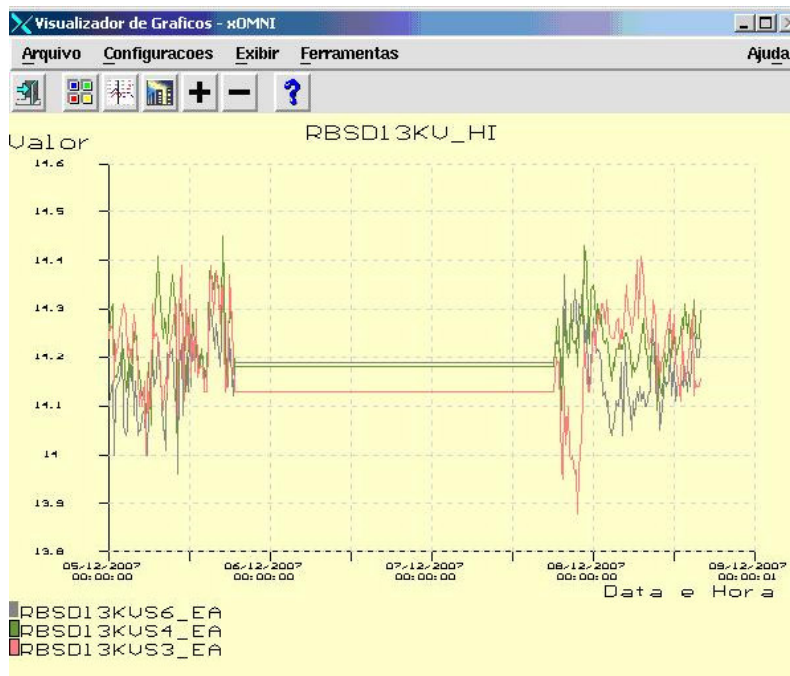


Figura 3 – Perfil de tensão nos barramentos de 13,8kV da Subestação 1

Essas ações possibilitaram a normalização dos comandos antes de um dia de chuvas fortes e incidência de descargas atmosféricas, evitando assim maiores problemas.

Subestação 2

Data da ocorrência: 16/10/2007

Valor de CQT: 0,0

Cor sinalizada: vermelho

O CQT ficou igual a zero, sinalizando desvio padrão alto nas medições de tensão do barramento do trafo número quatro. Após a execução da planilha de teste e inspeção de um técnico no local, concluiu-se que o transdutor de tensão do transformador 4 estava com defeito. Sua troca foi solicitada, solucionando o problema.

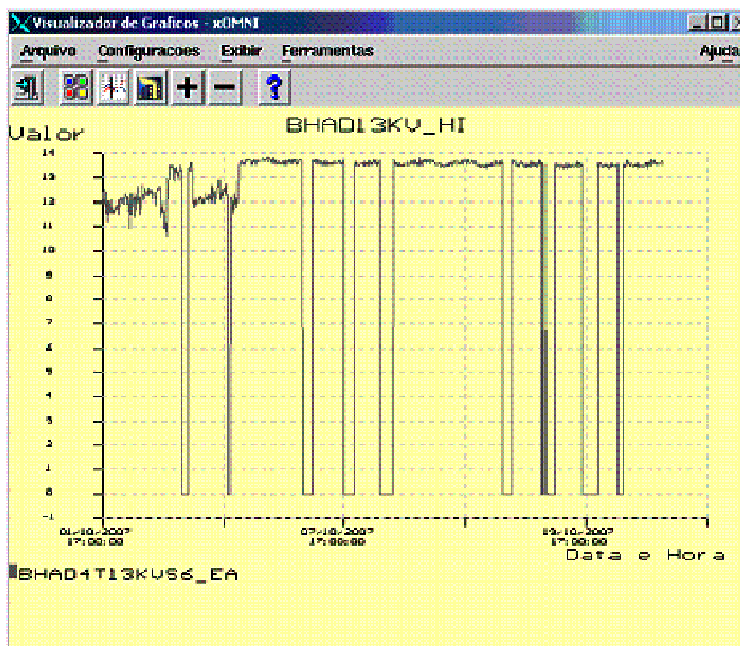


Figura 4 – Perfil de tensão no barramento de 13,8kV do trafo T4 da Subestação 2, do dia 01/10/2007 a 15/10/2007

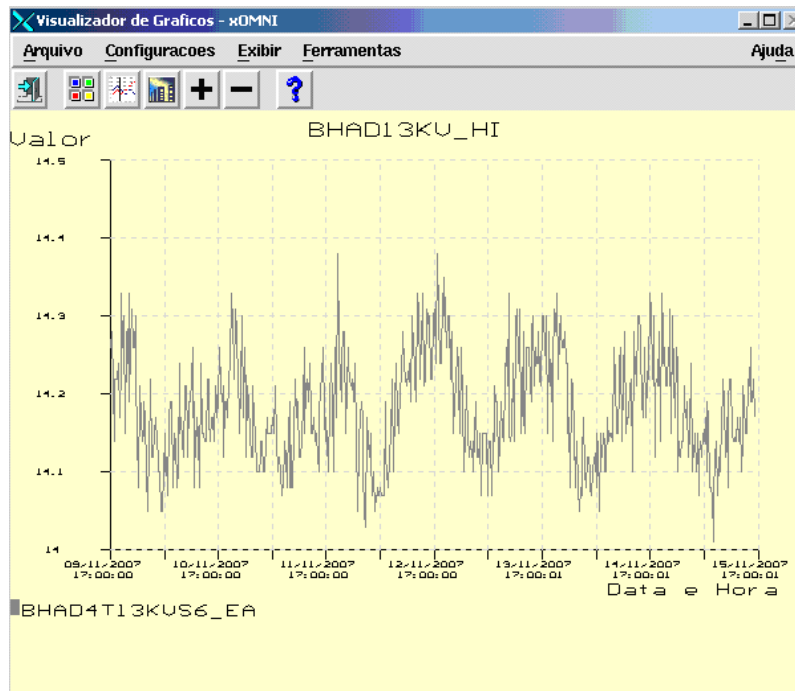


Figura 5 – Perfil de tensão no barramento de 13,8kV do trafo T4 da Subestação 2 após a detecção do problema pelo CQT e intervenção da equipe de manutenção.

Subestação 3

Data da ocorrência: 06/11/2007

Valor de CQT: 2,5

Cor sinalizada: amarelo

O CQT ficou acima de 2,2, indicando tensão baixa ou problema de medição no único transformador dessa subestação. A execução da planilha de teste mostrou que o desvio padrão das amostras do dia estava dentro dos limites de especificação descritos no item 3 – entre 50 e 160. Após inspeção do técnico na subestação constatamos que a medição estava realmente confiável. Sendo assim, foi emitido um pedido de serviço para reajuste do relé de regulação de tensão do trafo.

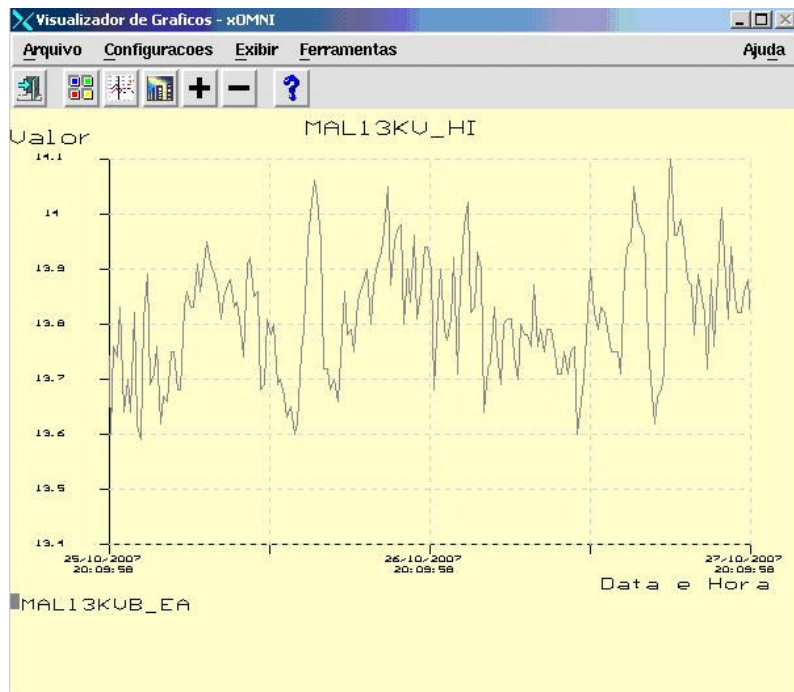


Figura 6 – Perfil de tensão no barramento de 13,8kV da Subestação 3, do dia 26/10/07 a 27/10/2007

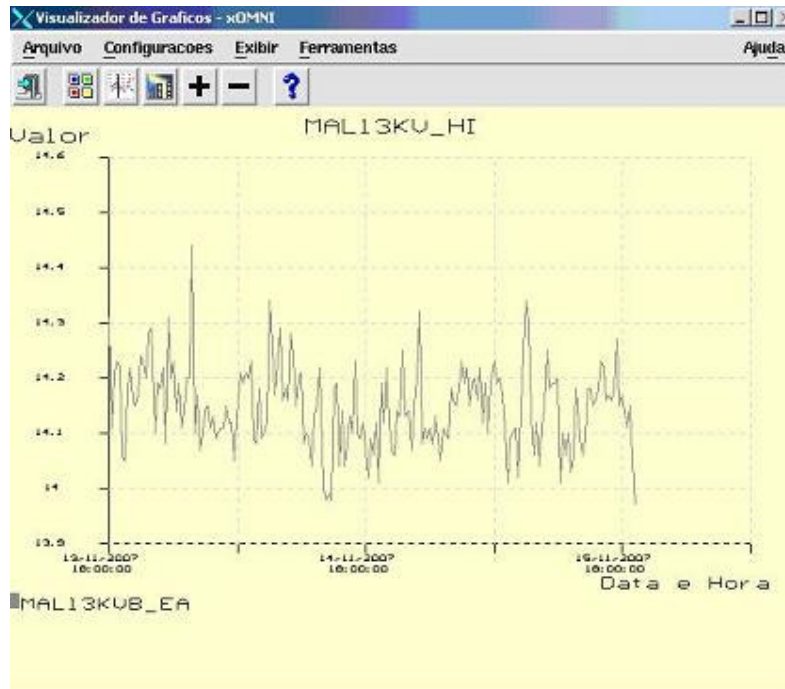


Figura 7 – Perfil de tensão nos barramentos de 13,8kV da Subestação 3, após a intervenção da equipe de manutenção.

6. CONCLUSÕES

Num processo sob controle, a variabilidade é conhecida e ajustada. Baseado nesta premissa é que foi desenvolvido o indicador CQT. Os benefícios, já comprovados, que se obtém com esse monitoramento são vários, como por exemplo:

- Atender às especificações da CEMIG, já que um conceito básico de qualidade é não infringir os limites estabelecidos;
- Evitar multa da ANEEL, que varia em função dos valores extrapolados e da demanda do consumidor;
- Preservar os equipamentos elétricos do consumidor, uma vez que sua vida útil e desempenho dependem diretamente da tensão aplicada;
- Evitar despesas com ressarcimento por queima de equipamentos;
- Identificar as causas da deficiência do controle de tensão, possibilitando a atuação preventiva e não apenas corretiva;
- Maximizar o faturamento da concessionária.

Com relação ao último item, cálculos simples podem comprovar a relevância do monitoramento de tensão. A tensão tem impacto direto na potência ativa de cargas de impedância constante. Teoricamente este impacto está na razão direta do quadrado da tensão ($P=V^2/R$). Sendo assim, se diminuirmos 1% da tensão aplicada nas cargas a diminuição de potência ativa fica em torno de 1,96%. Porém, após fazer medições em um conjunto de transformadores da malha metropolitana de Belo Horizonte, conclui-se que este impacto está na razão direta – provavelmente devido ao perfil heterogêneo das cargas do sistema. Verificamos que, hipoteticamente, se 10% de um montante de carga de 800MW estiver recebendo tensão 1% abaixo do valor nominal a concessionária terá uma perda de faturamento da ordem R\$ 8.640.000,00 em três meses¹.

O resultado do trabalho foi altamente satisfatório, provando que o monitoramento da tensão através do indicador CQT é eficiente. Houve uma melhoria do monitoramento da qualidade da tensão nos barramentos de distribuição da malha metropolitana da CEMIG.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAMPOS, Falconi. *Gerenciamento da Rotina*. Belo Horizonte, MG: FDG, 1998.
2. WERKEMA, Maria Cristina. *Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. Belo Horizonte, MG: FCO, 1995.
3. WHEELER, Donald. *Entendendo a variação: a chave para administrar o caos*. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2001.
4. ANEEL – Resolução nº 505 / 2001. *Conformidade dos níveis de tensão*. Brasília, 2001.

¹ Para esse cálculo consideramos a tarifa da concessionária como R\$ 0,50 por kW/h consumido.