

# ANÁLISE COMPUTACIONAL DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO SIMULADOR SABER

José H. Vilela, MSc.  
Furnas Centrais Elétricas S.A  
DRB.O  
Usina Serra da Mesa - GO

Olívio C. N. Souto, MSc.                      José C. de Oliveira, PhD.  
Universidade Federal de Uberlândia  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Av. João Naves de Ávila, 2100 - Uberlândia - MG  
Telefone: (034) 236-5099 - email: jcoliveira@ufu.br

**Resumo** - Este artigo está voltado para o campo da modelagem computacional, enfocando a potencialidade de uma nova ferramenta para estudos de qualidade. Através do desenvolvimento e incorporação de diferentes modelos para os mais diversos componentes elétricos no denominado simulador SABER, obteve-se um programa no domínio do tempo que permite, dentre outras características, estudos de desempenho de um complexo elétrico sob a ação dos mais diferentes itens de definição da qualidade da energia elétrica. Através de um caso típico simulado, procede-se a investigações com vistas a análise das condições operativas de um complexo elétrico, dentro do enfoque aqui discutido. Empregando-se esta estratégia são então obtidos resultados e extraídas conclusões sobre o desempenho de componentes como transformadores, bancos de capacitores, motores, inversores estáticos, etc., inclusive reduções de carregamento com vistas a preservação da vida útil dos componentes individuais.

**Palavras-chave** - Qualidade da Energia Elétrica, Simulações Computacionais

**Abstract** - The present paper is directed towards the power quality area with emphasis to computational modelling. By developing different electrical components models and by including them into the SABER simulator, a powerful tool to deal with the subject was achieved. Using a typical industrial electrical system, several studies are carried out and the results fully discussed. Through these, many conclusions are drawn in relation to the components performance. The components are transformers, capacitor banks, motors, static converters, etc. Besides, equipment life expectancy as well as derating for life preservation is also considered.

**Keywords** - Power Quality, Computational Simulations

## 1. INTRODUÇÃO

O Conceito da “Qualidade da Energia” está relacionado com um conjunto de alterações que podem ocorrer para o suprimento elétrico oferecido aos consumidores. Estas anomalias podem originar-se e/ou manifestar-se em diferentes pontos da rede elétrica, as quais podem ser de natureza local, ou seja, uma perturbação que ocorre dentro da instalação do consumidor, ou de natureza externa ou remota. Em geral, os fenômenos envolvendo a qualidade da energia afetam a tensão de suprimento na forma de um ou mais dos itens que se segue:

- Distorções harmônicas;
- Transitórios de chaveamento;
- Sobreensões transitórias oriundas de descargas atmosféricas;
- Sobreensões temporárias causadas por curto-circuitos fase-terra;
- Subtensões temporárias causadas por partidas de motores e curto-circuitos;
- Desequilíbrios;
- Oscilações de tensão;
- Interrupções;
- Subtensões e sobreensões de regime permanente;

Reconhecendo estes aspectos, observa-se que os problemas se agravam à medida que os anos passam e os consumos elétricos se tornam maiores e mais exigentes. Muito embora se reconheça a existência de vários documentos dirigidos para a regulamentação do controle da qualidade da energia elétrica (1)(2)(3), as informações são dispersas e nem sempre concordantes. Assim, pode-se citar normas de diferentes origens, cada uma com seu enfoque e preocupações próprias. Neste particular, o Brasil também possui recomendações destinadas à preservação da qualidade da energia (4). Uma vez constatado que a qualidade da energia elétrica é passível de desvios em relação ao que se poderia denominar por padrão ideal, torna-se premente o estabelecimento de estratégias destinadas à preservação desta. Baseando nestes fatos, surge, junto aos consumidores e concessionárias de energia elétrica, a necessidade de se conduzir investigações num sistema elétrico com vistas a identificar os problemas de qualidade. Estas, requerem trabalhos de monitoração, simulações computacionais e, finalmente, a proposição das possíveis soluções. Uma estratégia para a análise da qualidade da energia deve obedecer a uma série de etapas,

conforme mostrado pelo diagrama de blocos da Figura 1, obtido da referência (5).

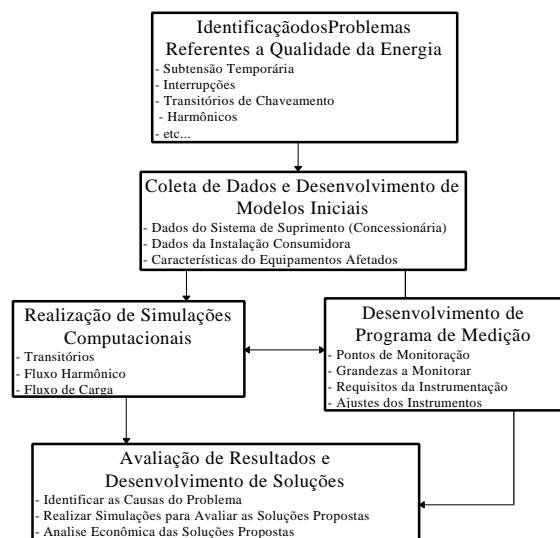


Figura 1 - Procedimentos para a avaliação dos problemas de qualidade da energia.

## 2. ITENS DE QUALIDADE

Do exposto, fica enfatizado a importância de uma análise detalhada da qualidade da energia, com vistas a determinar o nível dos desvios das grandezas elétricas e os impactos destes na operação do sistema elétrico. Dentro deste contexto, duas grandezas elétricas básicas podem ser empregadas para expressar o quanto o sistema elétrico está operando fora de suas especificações nominais. São elas:

- Tensão
- Frequência

Sendo a frequência uma grandeza elétrica associada diretamente ao controle de velocidade das unidades geradoras, apenas grandes distúrbios (perda de LT's, perda de geração, etc.) podem fazer com que esta desvie consideravelmente de seu valor base, no caso, de 60 Hz.

A Tabela I exemplifica os principais fatores que afetam a qualidade da energia, sobretudo sob o ponto de vista da qualidade da tensão, aqui definidos como Itens de Qualidade, conforme estabelecido na ref. (6).

Categorias	Duração típica	Magnitude da tensão
Voltage Sag	0,5s - 1 minuto	0,1 - 0,9 pu
Voltage Swel	0,5s - 1 minuto	1,1 - 1,8 pu
Subtensões	> 1 minuto	0,8 - 0,9 pu

Sobretensões	> 1 minuto	1,1 - 1,2 pu
Desequilíbrio	Regime Permanente	0,5 - 2 %
Harmônicos	Regime Permanente	0 - 20 %
Ruído	< 200 kHz	0 - 1 %
Flutuação de Tensão	< 25 Hz	0,1 - 7 %

TABELA I - Itens de Qualidade.

## 3. A NECESSIDADE DOS ESTUDOS COMPUTACIONAIS E O SIMULADOR SABER

A questão da qualidade de uma rede elétrica se aplica àquelas instalações já existentes e em operação e outras, ainda em fase de planejamento. Assim sendo, tem-se que os estudos conduzidos através da combinação de medições e simulações computacionais, somente se aplicam às instalações já em funcionamento, enquanto que, as simulações computacionais constituem-se em ferramentas de grande valia para os casos em que os sistemas elétricos encontram-se apenas concebidos. Na condução deste trabalho utilizou-se um simulador baseado nas técnicas do domínio do tempo, tendo em vista que, os itens de qualidade aqui enfocados são melhor visualizados neste tipo de processamento, pois estão intimamente ligados às variações da forma de onda no que tange ao seu aspecto senoidal e variações na amplitude. Desta forma, o "software", denominado por SABER, desenvolvido e distribuído pela empresa norte-americana ANALOGY Inc., foi utilizado para a implantação dos modelos dos diversos equipamentos constituintes de uma rede elétrica típica.

## 4. EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO

Com vistas a analisar os problemas de qualidade da energia elétrica, num âmbito geral, utilizou-se de um sistema elétrico hipotético sem que suas características, no que tange às topologias e parâmetros dos componentes, se distanciassem de um sistema real. Dentro deste contexto, buscou-se analisar as consequências diretas de problemas de qualidade, oriundos das instalações consumidoras, sobre a concessionária e consumidores vizinhos, bem como os efeitos sobre os consumidores quando os problemas têm suas origens no sistema supridor. A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar do sistema simulado com os diversos equipamentos (motores, retificadores, inversores de frequência, bancos de capacitores, etc.) conectados aos barramentos de baixa, média e alta tensão. A Figura mostra claramente a existência de quatro áreas distintas, uma caracterizada pela concessionária e suas linhas de suprimento, e três outras, representadas na forma de consumidores A, B e C.

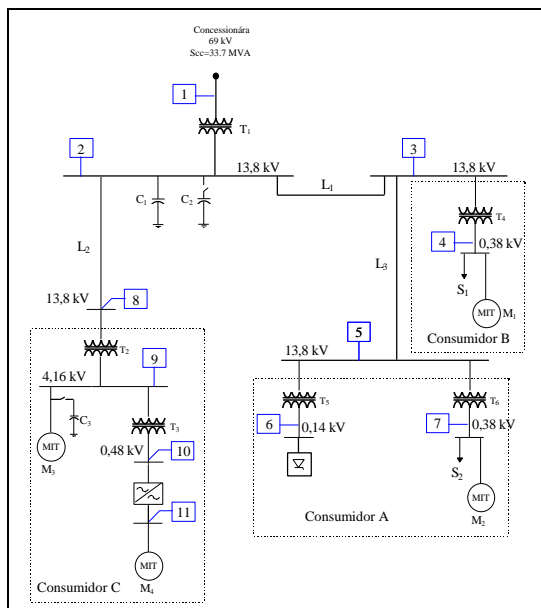


Figura 2 - Diagrama Unifilar

Nas tabelas II, III e IV encontram-se descritos os dados de alguns equipamentos que perfazem o sistema:

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S <sub>n</sub> [MVA]	15	2,5	0,15	0,75	1,8	0,3
V <sub>p</sub> [kV]	69	13,8	4,16	13,8	13,8	13,8
V <sub>s</sub> [kV]	13,8	4,16	0,48	0,38	0,14	0,38
R[%]	0,6	0,6	0,6	0,76	1,17	0,6
X[%]	4,96	5,96	5,96	4,8	6,2	4,96
conexão	Δ-Y	Δ-Y	Δ-Y	Δ-Y	Δ-Y	Δ-Y

TABELA II - Dados dos Transformadores.

Motor	P[cv]	V <sub>n</sub> [kV]	f[Hz]	np
M <sub>1</sub>	150	0,38	60	4
M <sub>2</sub>	50	0,38	60	4
M <sub>3</sub>	800	4,16	60	4
M <sub>4</sub>	100	0,44	60	4

TABELA III - Dados dos Motores.

Capacitor	Q[kVAr]	V <sub>n</sub> [kV]	f[Hz]
C <sub>1</sub>	600	13,8	60
C <sub>2</sub>	600	13,8	60
C <sub>3</sub>	250	4,16	60

TABELA IV - Dados dos Bancos de Capacitores.

### Injeção de Correntes Harmônicas no Sistema

Esta análise objetivou verificar as consequências das injeções de correntes harmônicas no sistema através do retificador instalado na barra 6. A Figura 3 mostra a tensão de suprimento do retificador, enquanto que a Figura 4 indica a corrente no primário do correspondente transformador.

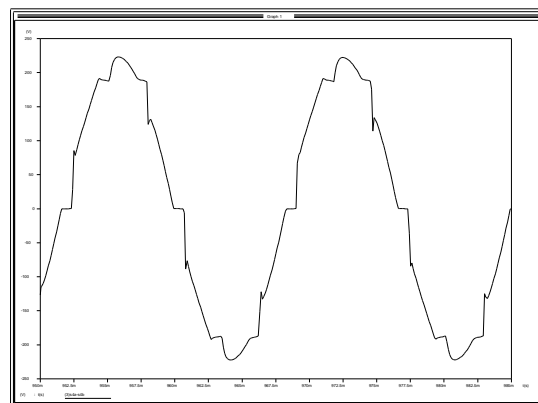


Figura 3 - Tensão na entrada do retificador.

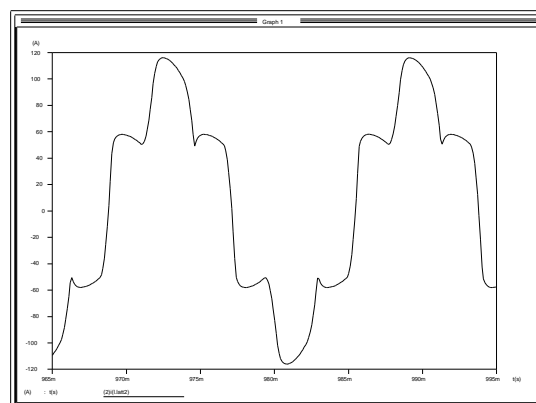


Figura 4 - Corrente Primária do Transformador T<sub>5</sub>.

A decomposição da corrente no primário do transformador T<sub>5</sub>, através da série de Fourier, mostra que as componentes harmônicas mais significativas são as de ordem 5, 7, 11 e 13 as quais, representam, respectivamente, 22,5%, 8,87%, 6,66% e 3,33% da componente fundamental. A Figura 5 mostra a corrente no banco de capacitores conectado à barra 2.

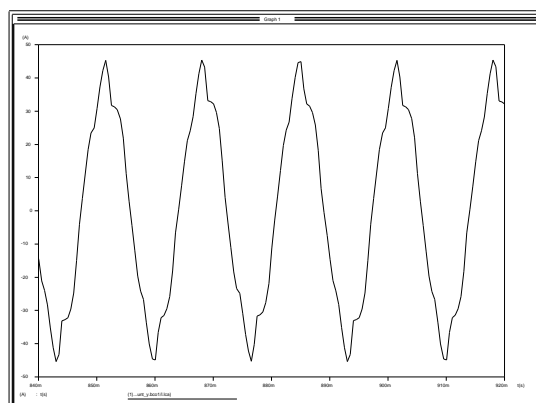


Figura 5 - Corrente nos bancos de capacitores.

Analisando a curva da corrente na fase dos bancos de capacitores da barra 2, a mesma apresenta-se consideravelmente distorcida, o que mostra a tendência natural dos bancos de capacitores de absorverem as correntes harmônicas.

## Energização do transformador T<sub>2</sub>

Esta etapa dos estudos teve por objetivo analisar o comportamento do sistema, frente ao estabelecimento de elevados valores da corrente de “inrush”, as quais, via de regra, possuem amplitudes elevadas e apreciável conteúdo harmônico. As Figuras 6 e 7 apresentam as tensões obtidas nas diversas barras do sistema da Figura 2, durante a energização do transformador T<sub>2</sub>.

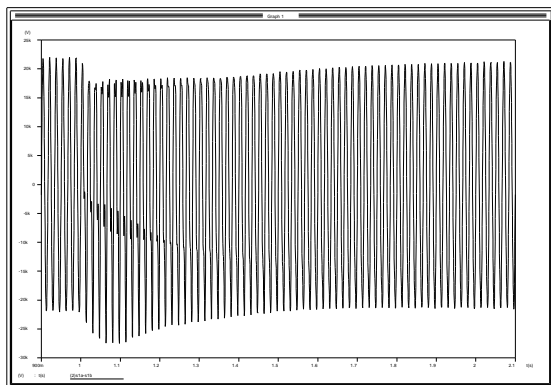


Figura 6 - Tensão na barra 2 (13,8 kV)

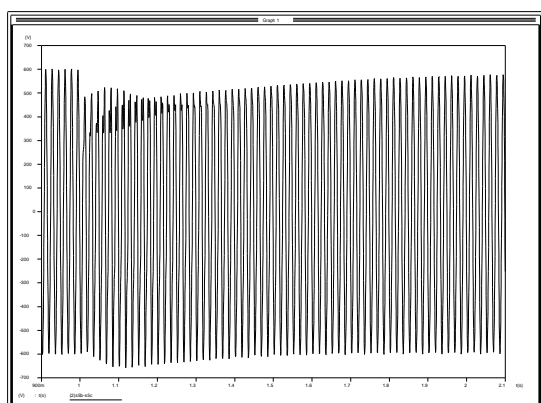


Figura 7 - Tensão na barra 7 (motor de 50 cv).

Os oscilogramas ilustram a principal consequência deste fenômeno sobre a rede elétrica, ou seja, o surgimento de subtensões temporárias para todas as barras do sistema.

Paralelamente às subtensões pôde-se verificar o efeito das correntes harmônicas no sistema. Observou-se que na barra 2 estabeleceu-se uma condição de ressonância, haja visto os picos de tensão verificados neste ponto, e a elevação das correntes nos bancos de capacitores da respectiva barra, conforme ilustra a Figura 8.

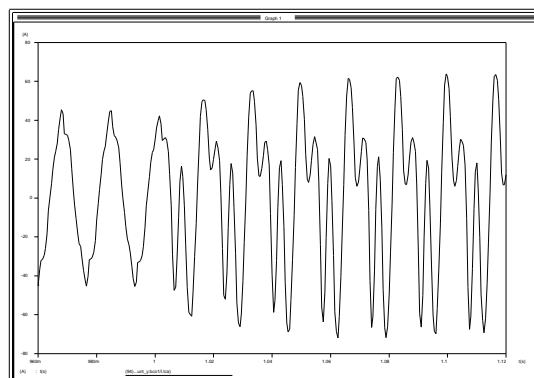


Figura 8 - Corrente no banco de capacitores.

Outros equipamentos, como os motores de indução, também sofrem influência direta deste fenômeno. Este fato é exemplificado pela Figura 9, associada a corrente de alimentação do motor M1 localizado na barra 4.

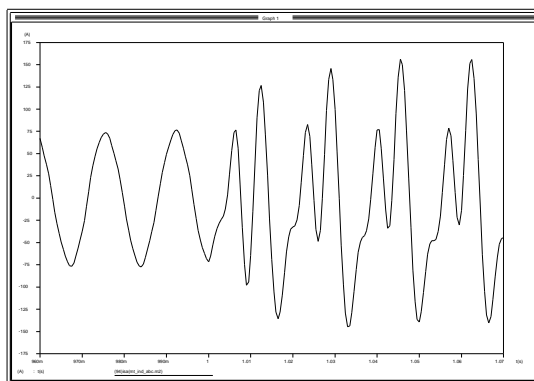


Figura 9 - Corrente na fase do motor M1 - barra 4.

## Curto-circuito e Subsequente Interrupção

Durante a ocorrência do curto-circuito, os consumidores interligados ao ramal defeituoso experimentarão, via de regra, uma queda de tensão acentuada em suas respectivas alimentações juntamente com os consumidores de alimentações vizinhos. Caso a falta seja de natureza temporária, os consumidores sentirão os efeitos apenas da subtensão temporária. Todavia, na maioria dos casos, antes da extinção da falta tem-se a operação do dispositivo de proteção na subestação, e desta forma tem-se estabelecido uma interrupção no fornecimento de energia aos consumidores do alimentador defeituoso. Dentro deste contexto, a simulação de um curto-circuito na barra 8 foi realizada com vistas a evidenciar tais afirmativas. Os resultados obtidos encontram-se na série de curvas apresentadas a seguir. A Figura 10 mostra o comportamento da corrente na fase de aplicação do curto-circuito para quatro estágios diferentes, a saber:

- operação normal;
- curto-circuito aplicado;
- interrupção no fornecimento e

- reenergização do circuito.

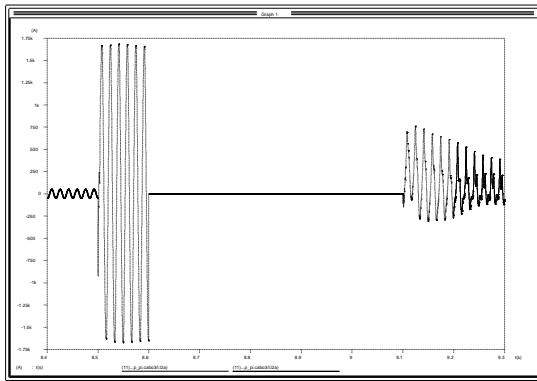


Figura 10 - Corrente na fase durante o curto-circuito e a interrupção.

Após o religamento do alimentador tem-se um novo “inrush” do transformador  $T_2$ . A Figura 11 mostra o comportamento da tensão na barra 2 de 13,8 kV durante os quatro estágios. Através da forma de onda verifica-se uma subtensão temporária durante o período de ocorrência do curto-circuito, ou seja, de 9,5 a 9,6 s, e o aparecimento das componentes harmônicas na tensão devido ao “inrush” do transformador  $T_2$ .

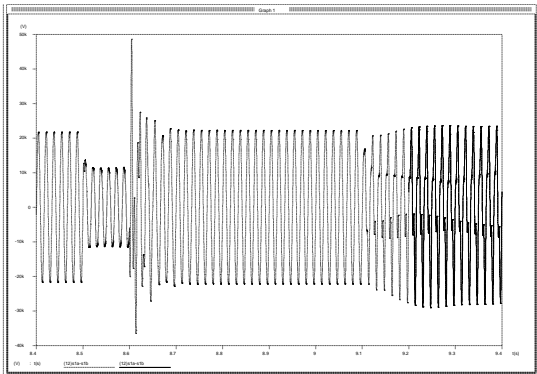


Figura 11 - Tensão na barra 2 - 13,8 kV.

A Figura 12 apresenta a corrente no banco de capacitores da barra 2 durante o curto-circuito, interrupção e após o religamento. Durante o período de permanência do curto-circuito tem-se uma subtensão nos terminais do banco de capacitores consequentemente diminuindo o reativo injetado no sistema. Após a eliminação da falta para a terra tem-se a reenergização do circuito juntamente com o transformador  $T_2$ , resultando desta forma numa sobrecarga no banco de capacitores  $C_1$ , pois este, passa a absorver uma corrente com um elevado conteúdo harmônico.

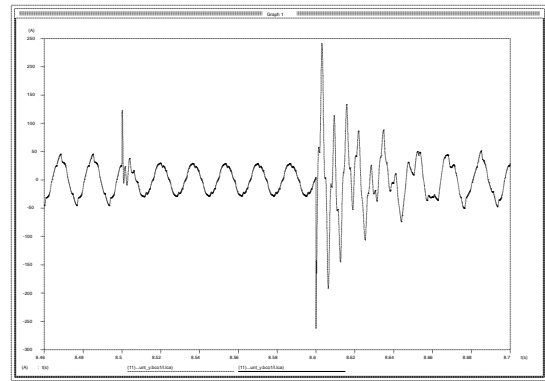


Figura 12 - Corrente no banco de capacitores.

O desempenho do motor M1, no tocante a sua velocidade angular, encontra-se mostrado na Figura 13.

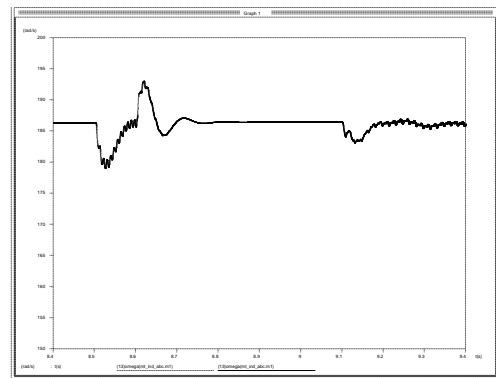


Figura 13 - Velocidade angular do motor M1.

A título de ilustração a Figura 14 mostra a tensão no barramento CC da ponte retificadora localizada na barra de baixa tensão do consumidor A.

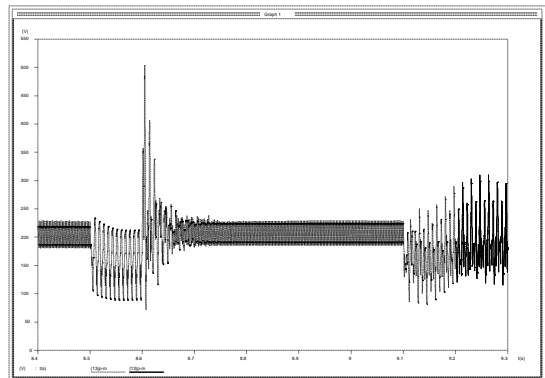


Figura 14 - Tensão de saída da ponte retificadora.

A análise da Figura anterior permite observar que durante a ocorrência do curto-circuito, uma sobretensão da ordem de 2 pu ocorre na saída do retificador.

Finalmente, é conveniente lembrar que os resultados computacionais apresentados são uma amostra da potencialidade desta importante ferramenta destinada a simulação de redes elétricas, às quais aplicando-se diferentes distúrbios foi possível

constatar as consequências sobre alguns itens de qualidade.

## 5. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS DIVERSOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO

### Capacitores

A partir das injeções de correntes harmônicas no sistema, através da operação do retificador de 6 pulsos, verificou-se que os limites estabelecidos pelas normas (7) à operação de banco de capacitores, não foram superados.

### Transformadores

A recomendação ANSI/IEEE C57.110-1986 (5) estabelece os procedimentos necessários para a redução do carregamento de transformadores quando os mesmos encontram-se alimentando cargas elétricas não lineares de forma que sua vida útil seja preservada. Desta maneira, procedeu-se à análise do transformador T5 com objetivo de verificar possíveis condições de sobrecarga devido as correntes harmônicas oriundas da ponte retificadora da barra 6. Os resultados mostram que nestas condições, o transformador deverá ter seu carregamento reduzido para 95% de sua potência nominal de forma que sua vida útil seja preservada.

### Ponte Retificadora

Conforme anteriormente observado, na ocorrência do curto-circuito, a tensão no barramento CC do retificador conectado a barra 6 atinge valores da ordem de 2 pu. Este valor é suficiente para atuar o sistema de proteção das chaves semicondutoras do conversor e conseqüentemente, interromper a operação do equipamento.

## 6. CONCLUSÕES

Este artigo teve por objetivo principal apresentar a utilização de uma ferramenta computacional destinada a simulação de redes elétricas, às quais aplicando-se diferentes distúrbios foi possível constatar as consequências sobre alguns itens de qualidade enumerados qualitativa e quantitativamente. Assim, estudos de distorções harmônicas, curto-circuitos, energização de transformadores entre outros, foram processados com vistas a avaliar o comportamento de um sistema elétrico típico.

Adicionalmente, a partir dos resultados, pode-se também verificar o desempenho de alguns dispositivos elétricos no tocante às questões de

sobrecarga, níveis máximo de tensão admissíveis, etc.

Finalmente, ficou evidenciado ao longo do artigo a importância de se utilizar as simulações computacionais, no domínio do tempo, como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de programas de qualidade, sobretudo na fase final, onde busca-se apresentar soluções para os problemas existentes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE Std C57.110-1986, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
- (2) IEEE Std 519-1992, IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters.
- (3) POULSEN, S. "Monitoring Voltage Quality European Standard, Equipment and the Danish Monitoring Programme".
- (4) RELATÓRIO SCEL - GTEE, "Critérios e Metodologias para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais".
- (5) DUGAN, R. C. et all. "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill.
- (6) GUNTHER, E. W and SAMOTYJ, M. "Overview of Voltage Quality from a Global Approach in Terms of Power Systems".
- (7) NBR 5282 - Capacitores de Potência em Derivação para Sistema de Tensão Nominal acima de 1000 V.