

Qualidade da Energia Elétrica

Ewaldo L. M. Mehl^(*)

1. Apresentação

A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a constar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores possibilidades de emprego e produção.

À medida que os benefícios da energia elétrica passam a fazer parte do dia-a-dia das pessoas, é natural que inicie-se um processo de discussão quanto à qualidade daquele produto. Numa análise inicial preocupa-se com a **continuidade** do serviço, já que fica evidente que qualquer interrupção do fornecimento implicará em transtornos de toda ordem. Não tão evidente, no entanto, é a questão da **qualidade** da energia elétrica como um produto comercial, mesmo que não ocorram interrupções. Isso normalmente só é percebido de forma um pouco difusa, através de falhas de funcionamento em alguns equipamentos.

A questão da qualidade da energia elétrica aparece portanto a partir do momento em que os consumidores constatarem interrupções no fornecimento, mas à medida que tais consumidores tornam-se mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico, outros fatores começam a ser considerados.

Esse trabalho descreve, com o título de apresentação, os principais aspectos da Qualidade da Energia Elétrica, à luz da legislação atual.

2. Evolução das Cargas Elétricas

Até final da década de 70, vivíamos uma situação bastante diferente da atual no Brasil, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica. Podíamos claramente generalizar três tipos de consumidores: o consumidor residencial (urbano e rural), o de comércio e/ou serviços e o consumidor industrial. Naquela época o consumidor residencial, por exemplo, possuía uma carga plenamente resistiva, salvo raras exceções. Numa residência típica daquela época, encontrava-se como cargas grandes os chuveiros elétricos a resistência, e os ferros de passar roupas à resistência elétrica. O número de equipamentos eletrônicos resumia-se, na maioria das residências, a um aparelho de TV. Apesar da existência nas residências de uma carga indutiva-

resistiva (o motor do refrigerador), a demanda por energia elétrica era consumida por uma carga considerada resistiva.

Atualmente, vivemos uma realidade bastante diferente, onde podemos encontrar comumente consumidores (de diversas classes), também residenciais, com cargas comandadas eletronicamente, tais como fornos de microondas, computadores e periféricos, diversos aparelhos de TV e de áudio, em uma gama bastante vasta de eletrodomésticos. Tornou-se comum portanto a existência de cargas eletrônicas, que está cada dia mais presente em nossas vidas, lado-a-lado com as cargas elétricas, outrora comandadas sem o recurso da eletrônica. Um claro exemplo do emprego da eletrônica em uma área anteriormente dominada por cargas resistivas, são as lâmpadas fluorescentes econômicas, que hoje em dia estão substituindo gradualmente as lâmpadas incandescentes tradicionais, inclusive com apoio do governo, motivado pela recente crise energética.

As cargas elétricas comandadas eletronicamente possuem uma característica intrínseca que é a não-linearidade das mesmas, ou seja, não requerem a corrente elétrica constantemente, mas solicitam apenas picos de energia em determinados momentos. Dependendo da topologia do conversor eletrônico empregado, a corrente de entrada é disparada em determinado período ou ângulo da oscilação senoidal. Com isto, as cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda (tensão e corrente) que lhe é entregue e como consequência gerando uma "poluição" na rede de energia elétrica. Esta poluição é traduzida por diversos tipos de problemas ou distúrbios, os quais serão devidamente esclarecidos.

É importante ressaltar que estas mesmas cargas eletro/eletrônicas, além de poluírem a rede elétrica, sofrem diretamente com a má qualidade desta energia. Não é difícil observarmos em instalações com um grande número de computadores ligados nos mesmos circuitos, alguns desses computadores com problemas de funcionamento, aparentemente sem maiores explicações.

3. Distúrbios da Rede Elétrica

Diversos aspectos permitem a avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, entre eles podemos citar a continuidade do fornecimento, nível de tensão, oscilações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas de tensão e interferência em sistemas de comunicações.

Dentro dos distúrbios referentes às oscilações de tensão, tem-se os distúrbios tipo impulso, oscilações transitórias, variações no valor eficaz (de curta ou longa duração), desequilíbrio de tensão e

^(*) Engenheiro Eletricista (UFPR, 1980), Mestre em Engenharia de Materiais (COPPE/UFRJ, 1987) e Doutor em Engenharia Elétrica (UFSC, 1996). Desde 1982 é professor no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná em Curitiba.

distorções na forma de onda. Estes distúrbios representam desvios em regime da forma de onda, em relação a onda teórica puramente senoidal.

Na seqüência são apresentadas algumas definições clássicas dos distúrbios mais freqüentes.

3.1 – Cintilação ou *Flicker*:

O fenômeno de cintilação luminosa, ou efeito *flicker* é basicamente constatado através da impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso de lâmpadas, principalmente as do tipo incandescentes. Entre as causas do fenômeno são citadas cargas com ciclo variável, cuja freqüência de operação produz uma modulação da magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30 Hz. Nessa faixa de freqüências, o olho humano é extremamente sensível às variações da emissão luminosa das lâmpadas, sendo que a máxima sensibilidade do olho é em torno de 10 Hz.

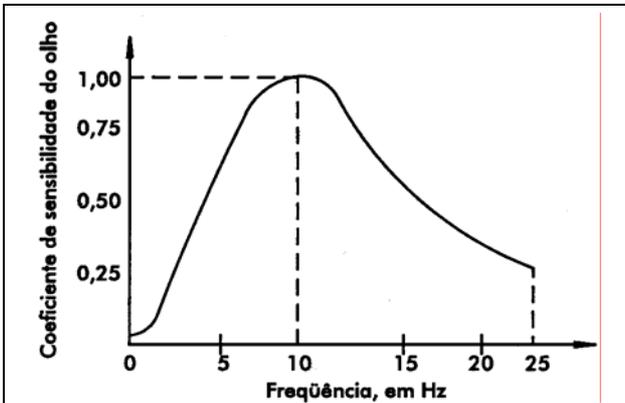


Figura 1: Curva de sensibilidade do olho humano.

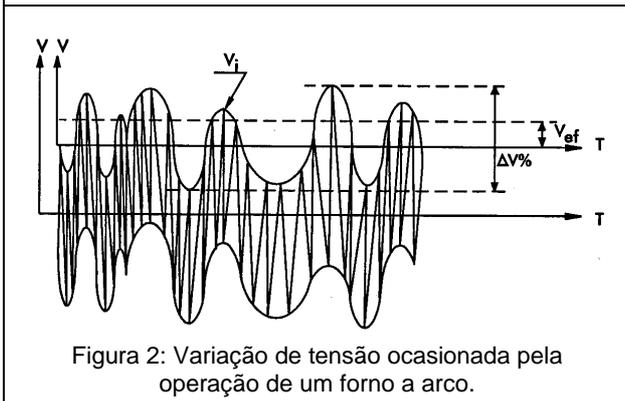


Figura 2: Variação de tensão ocasionada pela operação de um forno a arco.

Como a variação da potência elétrica associada ao fenômeno de cintilação é bastante baixa (da ordem de 0,3% da potência nominal da lâmpada) pode-se suspeitar que o efeito de cintilação também possa ser provocado pela simples variação do conteúdo harmônico de uma carga do tipo não-linear. Nesse caso, o fenômeno ocorreria mesmo sendo a tensão fundamental constante.

3.2 – Cunha de Tensão ou *Voltage Notch*:

Cunha de Tensão ou *Notching* representa o afundamento abrupto da tensão que ocorre em cada alternância, podendo ou não cair a zero ou mudar de sinal. É causada basicamente por conversores de energia trifásicos que proporcionam curto-circuito momentâneo entre fases, por exemplo, na comutação entre braços de um retificador de onda completa a diodos.

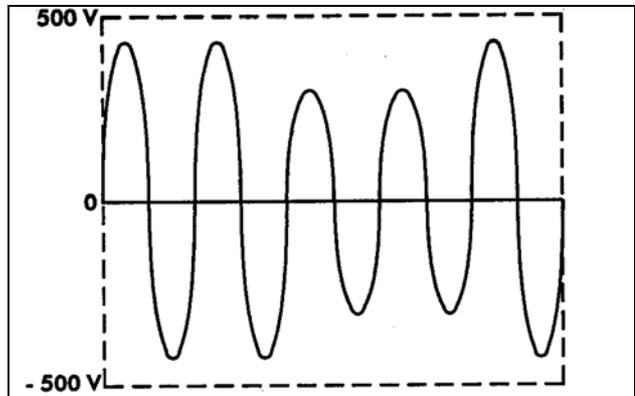


Figura 3: Afundamento de tensão.

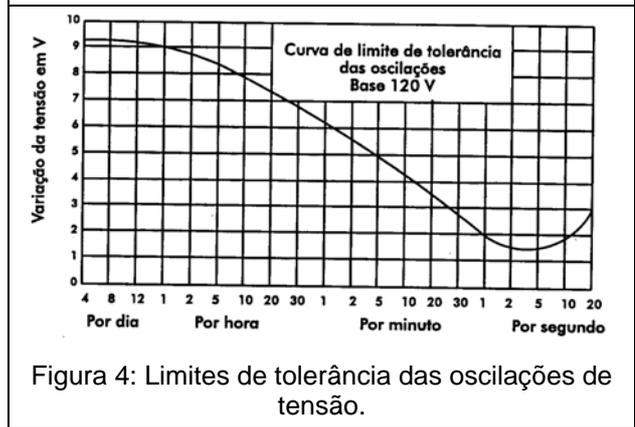


Figura 4: Limites de tolerância das oscilações de tensão.

3.3 – Desequilíbrio de Tensão ou *Voltage Imbalance*

Desequilíbrio de tensão é por definição, a diferença entre a magnitude das tensões de fase de circuitos polifásicos. Na rede de distribuição podem ocorrer desequilíbrios de naturezas distintas:

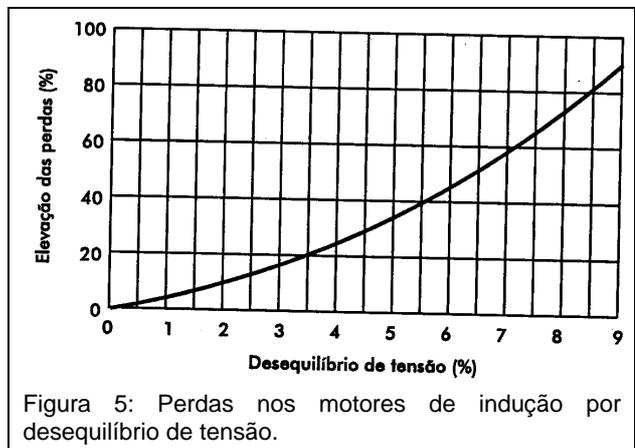


Figura 5: Perdas nos motores de indução por desequilíbrio de tensão.

- A assimetria da rede, gerada pelos tipos de transformadores de distribuição utilizados.

Assim, mesmo que a carga seja perfeitamente equilibrada (desequilíbrio de corrente nulo), serão detectados níveis de desequilíbrio de tensão.

- A natureza da carga, da forma como os consumidores estão conectados nas fases e neutro da rede de distribuição e com os diferentes níveis de corrente que absorvem em cada instante de tempo da curva de carga diária.

3.4 – Elevação de Tensão: *Voltage Swell*, *Spikes* e *Overvoltage*:

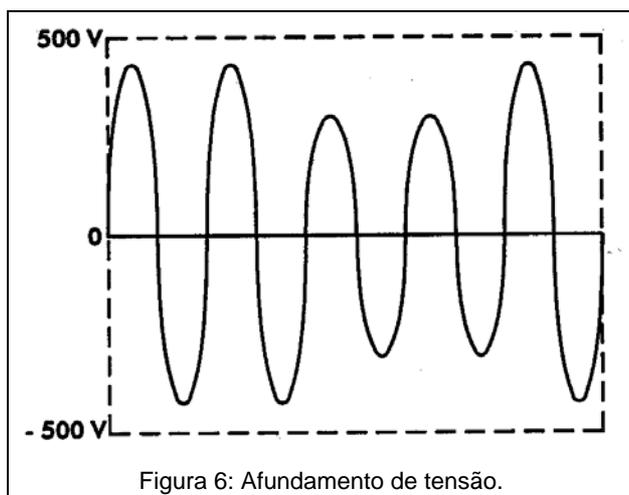
Este tipo de distúrbio é caracterizado pelo aumento da tensão de alimentação acima do limite normal (conforme normas técnicas pertinentes), cuja duração não ultrapasse 2 (dois) segundos. Este fenômeno é conhecido como *Voltage Swell* ou *Swel*. Para casos em que a duração do tempo ultrapasse a dois segundos, é definido o distúrbio como sobretensão ou *overvoltage*.

Existem também os casos em que a elevação do valor da tensão acima do limite ocorre em um período extremamente curto, da ordem de micro ou milissegundos. Este fenômeno é conhecido como Surtos ou *Spikes*.

3.5 – Afundamento de Tensão: *Voltage Sag* e *Undervoltage*:

Este tipo de distúrbio é caracterizado pela diminuição da tensão de alimentação abaixo do limite mínimo normal (conforme normas técnicas pertinentes), cuja duração não ultrapasse 2 (dois) segundos. Este fenômeno é conhecido como *Voltage Sag* ou simplesmente *Sag*.

Para casos em que a duração do tempo ultrapasse a 2 (dois) segundos, é definido o distúrbio como subtensão ou *undervoltage*.



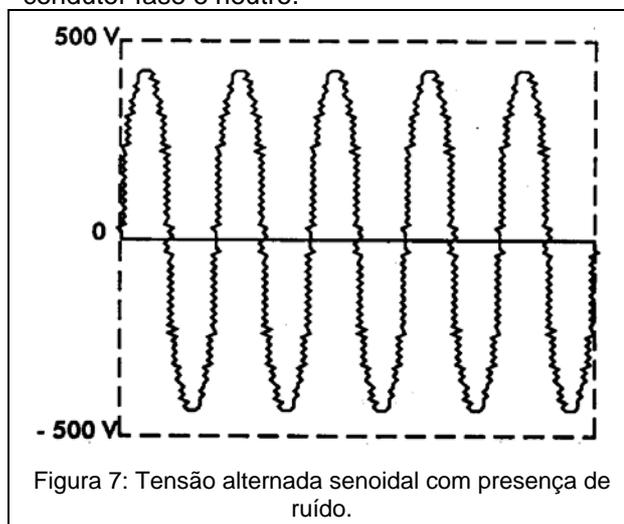
3.6 – Ruído ou *Noise*:

O ruído é a distorção da tensão senoidal, através da superposição de um sinal de alta frequência (da ordem de MHz). Podemos classificar em dois tipos de ruídos, o de modo

comum e o de modo normal:

Ruído de Modo Comum – *Common Mode Noise*: Diferença da tensão que ocorre entre o condutor neutro e a terra.

Ruído de Modo Normal – *Normal Mode Noise*: Diferença da tensão que ocorre entre o condutor fase e neutro.



3.7 – Interferência Eletromagnética – EMI e EMC:

A interferência eletromagnética é um fenômeno presente no ambiente (ar) e nos cabos existentes em uma instalação. Trata-se de um sinal (ruído) de alta frequência que quando é irradiado através do meio (ar) é chamado de EMI e que quando propagado através dos cabos elétricos e de RF é chamado de EMC.

Estes ruídos (EMI e EMC) são devidos também à circulação dos componentes harmônicos, gerados pelos conversores de potência chaveados que operam em alta frequência, e que interferem na operação adequada de outros equipamentos conectados a mesma rede.

Em centrais de telecomunicações este tipo de distúrbio é bastante preocupante, pois a alimentação da central de comutação e alguns equipamentos de transmissão (rádios, multiplex, modems, etc) é feita em corrente contínua (-48Vdc). Esta alimentação é proveniente de retificadores com bateria(s) operando em paralelo. Atualmente estes retificadores têm como topologia o chaveamento dos transistores de potência (MOSFETs, IGBTs, etc) em alta frequência (alguns kHz), que geram também EMI e EMC. Estes equipamentos devem possuir uma blindagem eficaz contra estes fenômenos, pois caso os mesmos propaguem-se, seja pelo meio ar, seja pelo meio dos cabos elétricos, interferirá em outros equipamentos da central telefônica, gerando consequências indesejadas.

Para homologação destes produtos no Brasil e habilitação dos mesmos para comercialização, se faz necessário diversos testes e ensaios em laboratórios capacitados, inclusive com câmara semi-anecóica e equipamentos e antenas capazes de varrer toda gama de frequências. Para estes

testes existem Normas Técnicas da antiga TELEBRÁS, sendo inclusive baseada na Norma Européia CISPR 22a.

3.8 – Harmônicos e Interharmônicos:

Os interharmônicos (harmônicos não múltiplos de 60 Hz) costumam originar-se em cargas com formas de corrente não periódicas em 60 Hz (por exemplo, cicloconvertidores e fornos a arco). Os harmônicos são originados por cargas eletrônicas que consomem correntes periódicas de 60 Hz não senoidais (por exemplo, um retificador trifásico de onda completa a diodos).

As distorções harmônicas são um tipo específico de energia “suja” (poluída ou contaminada) que, diferentemente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma contínua, associadas ao crescente número de acionamentos estáticos (inversores de frequência, variadores de velocidade, etc.), fontes chaveadas, e outros dispositivos eletrônicos de acionamento (lâmpadas eletrônicas, por exemplo).

4. ÍNDICES DE QUALIDADE

Após a privatização da maioria das concessionárias de energia elétrica, a ANEEL criou o conceito de consumidor livre, com direito de comprar energia de qualquer concessionária, e não apenas daquela cuja concessão cobre a área onde o consumidor está instalado. Entretanto, num primeiro momento os consumidores livres eram aqueles cujas demandas eram superiores a 10 MW.

Desde 8 de julho de 2000, são livres todos aqueles consumidores de energia elétrica com demandas acima de 3 MW, e alimentados com tensão igual ou superior a 69 kV. Ainda são poucos os que exercem este direito. Existem apenas 2 casos no Brasil de consumidores que trocaram de concessionária: Volkswagen (Taubaté/SP) e Carbocloro (Cubatão/SP). Este número promete continuar pequeno devido ao imenso esforço que as concessionárias estão dispendendo para manter seus clientes.

Ainda que por outras circunstâncias (oferta quase igual a demanda) não se possa esperar expressivas reduções de preços da energia por conta desta liberalização, é certo que o novo ambiente deve estimular inovações tecnológicas redutoras de custo, com grande destaque para a qualidade da energia.

Muitas empresas já desejam acompanhar as curvas de tensão, de transientes e de correntes harmônicas no ponto de entrega de suas concessionárias. No ambiente de livre mercado, cresceu muito em importância a qualidade da energia entregue, e este acompanhamento.

As quedas de tensão são de tipicamente

0,5 à 30 ciclos e as interrupções de normalmente 2 segundos à 5 segundos. As interrupções são normalmente causadas por manutenção na linha. As quedas de tensão são normalmente causadas por falhas na alimentação ou pela partida de cargas muito grandes como motores.

As falhas na alimentação são causadas tipicamente por alguma sobrecarga momentânea (por exemplo, algum curto-circuito na linha causado por um galho ou dois fios que se tocaram devido ao vento). As concessionárias utilizam dispositivos que tentam reconectar o circuito rapidamente. Durante este período, ocorre uma queda de tensão ou uma interrupção na alimentação. Alguns sistemas rearmam muito rapidamente (de 2 a 3 ciclos), enquanto outros levam muito mais tempo (de 20 ciclos até 5 segundos). Não é incomum que o sistema rearme e desarme várias vezes até a causa do curto-circuito ser sanada. Estas falhas na alimentação podem abranger uma área muito grande atingindo diversos circuitos de distribuição.

Partida de motores ou cargas grandes faz com que aumente muito o esforço sobre o sistema. Impedâncias dimensionadas para o funcionamento em modo contínuo, são normalmente muito altas para estes casos, causando quedas de tensão. Infelizmente, devido a queda de tensão, o fator de potência dos motores diminui muito diminuindo o torque de partida fazendo com que o período do arranque fique bem maior e, portanto, aumentando a gravidade da queda de tensão.

O desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido pela ANEEL com base em indicadores específicos, denominados de **DEC** e **FEC**.

O **DEC** (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica o número de **horas** em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal. Já o **FEC** (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica **quantas vezes**, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria etc).

O **DEC** pode ser calculado por:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i) \times T(i)}{Cs}$$

onde:

i = número de interrupções, de 1 a n

$T(i)$ = tempo de duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerados, em horas

$Ca(i)$ = número de consumidores do conjunto considerado, atingido nas interrupções

Cs = número total de consumidores do conjunto considerado.

O **FEC** pode ser calculado por:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{Cs}$$

Os componentes da equação são os mesmos do cálculo da DEC.

As metas de DEC e FEC a serem observadas pelas concessionárias estão definidas em Resolução específica da ANEEL. Essas metas também estão sendo publicadas mensalmente na conta de energia elétrica do consumidor.

A ANEEL implantou no ano 2000 mais três indicadores destinados a aferir a qualidade prestada diretamente ao consumidor, quais sejam: DIC, FIC e DMIC.

Os indicadores DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) indicam por quanto tempo e o número de vezes respectivamente que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. O DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora) é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo. Esse indicador passa a ser controlado a partir de 2003.

As metas para os indicadores DIC, FIC e DMIC estão publicadas na Resolução ANEEL número 024, de 27 de janeiro de 2000 e já estão sendo informadas na conta de energia elétrica do consumidor as metas do DIC e FIC.

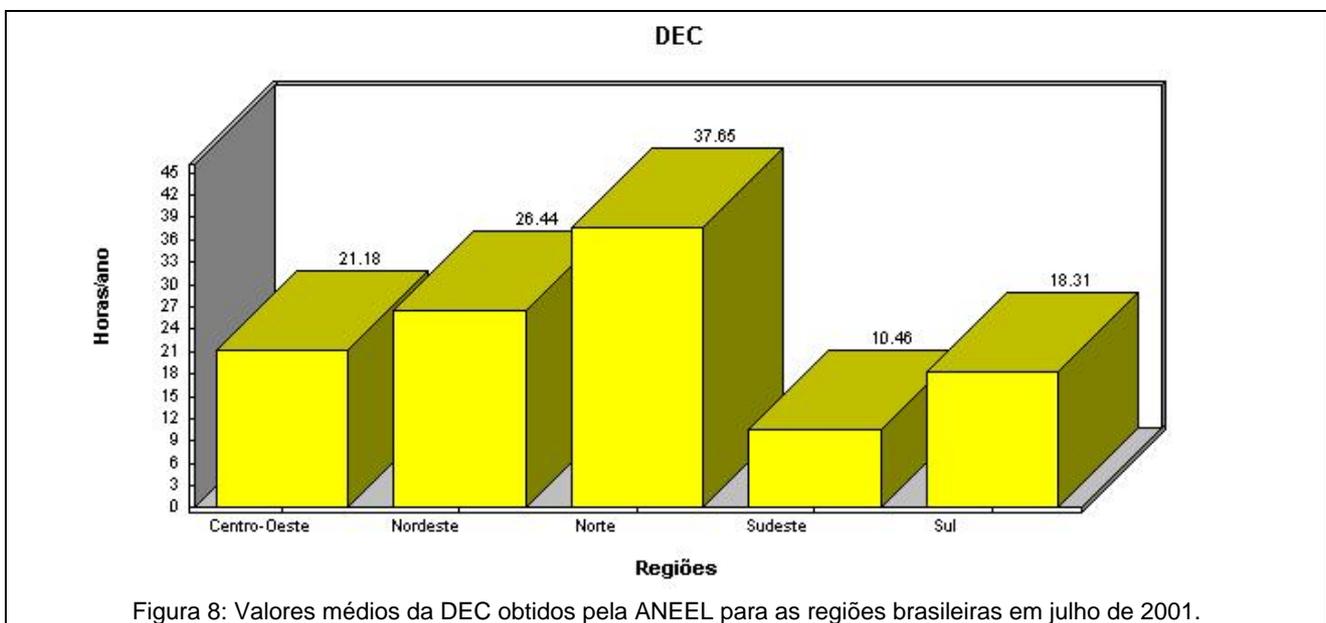


Figura 8: Valores médios da DEC obtidos pela ANEEL para as regiões brasileiras em julho de 2001.

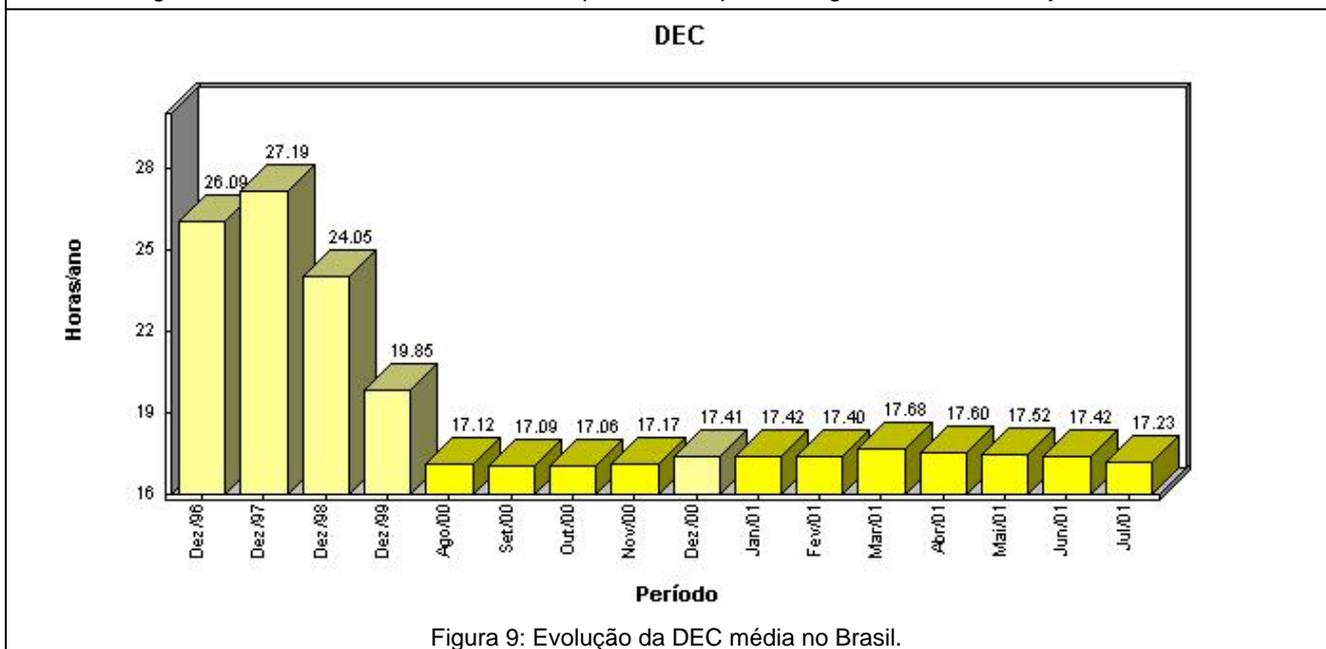


Figura 9: Evolução da DEC média no Brasil.

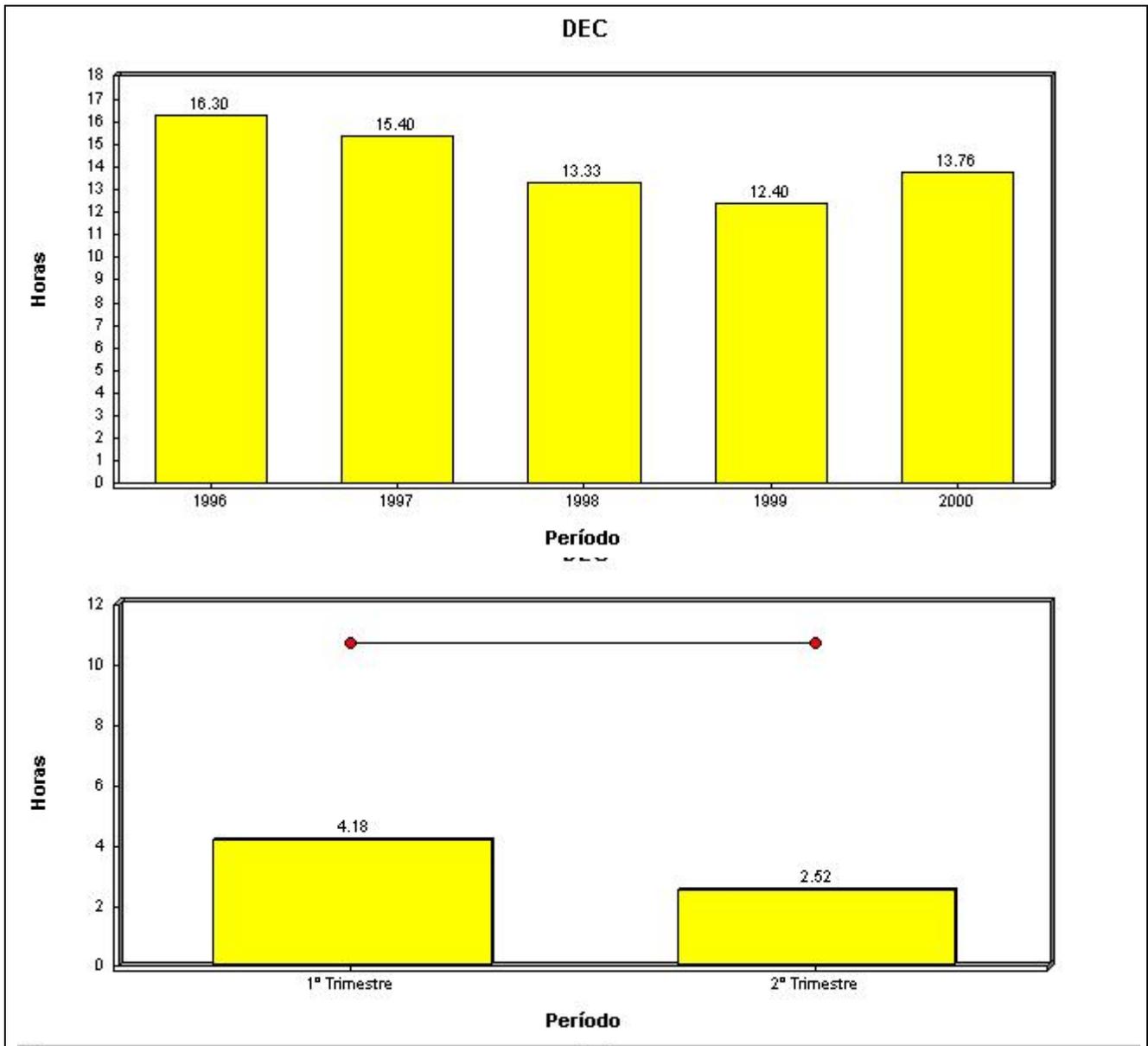


Figura 10: Evolução da DEC média da COPEL.

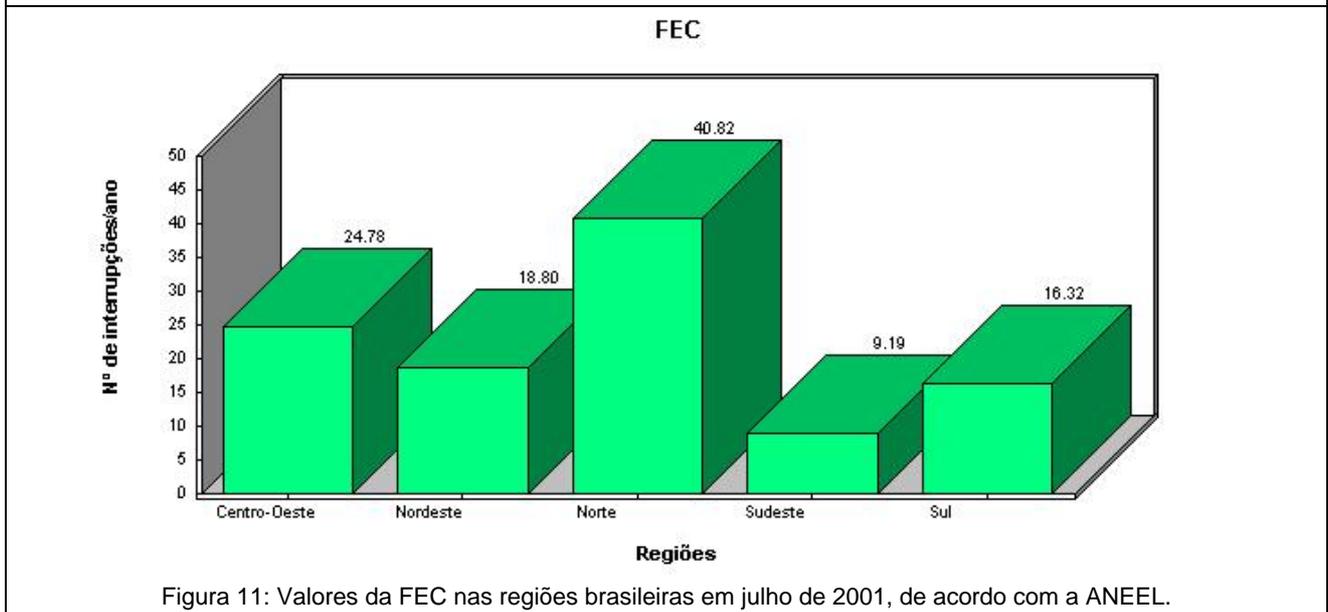


Figura 11: Valores da FEC nas regiões brasileiras em julho de 2001, de acordo com a ANEEL.

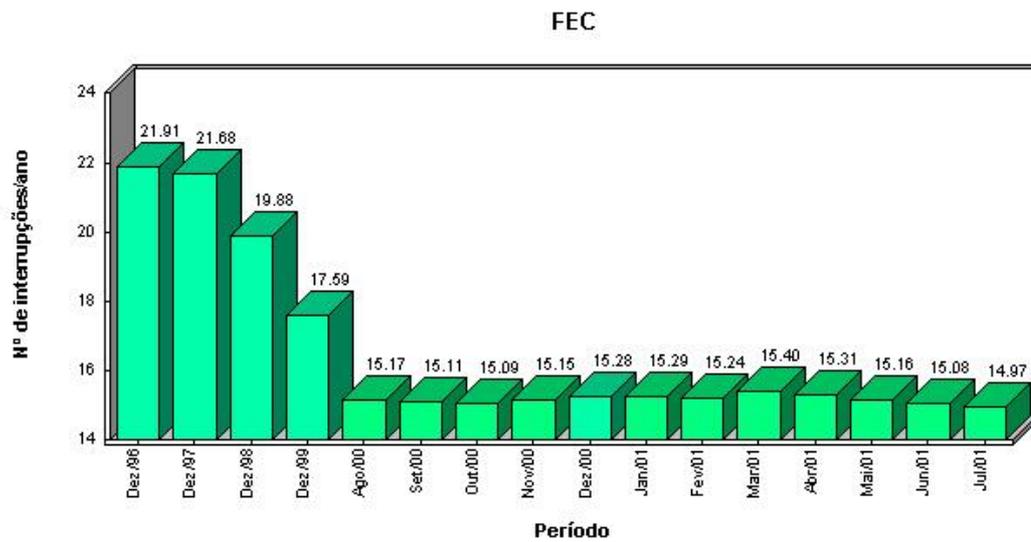
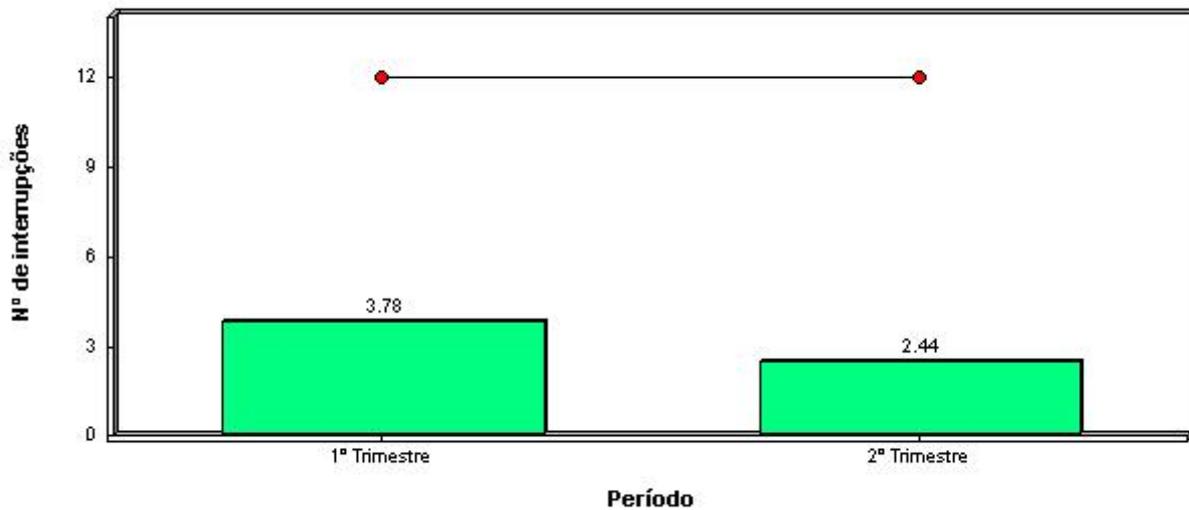
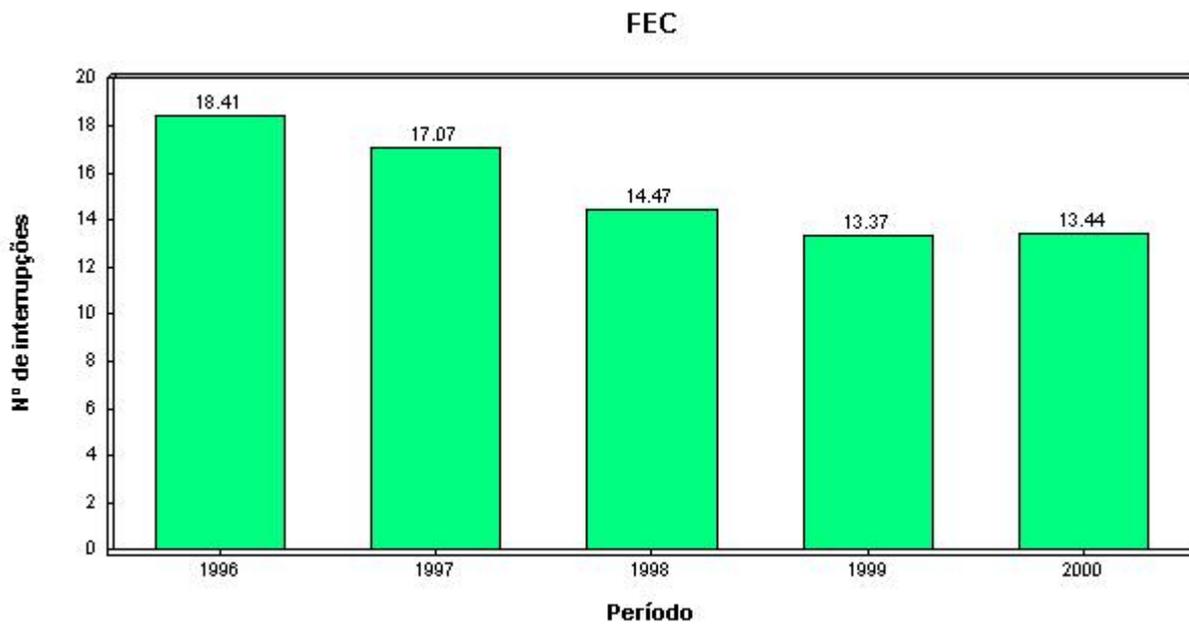


Figura 12: Evolução da FEC média no Brasil.



■ Valores Máximos Permitidos
 ■ Valores Apurados

Figura 13: Evolução da FEC média da COPEL

