
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA - LSEE**



Prof. Dr. Mário Oleskovicz

**São Carlos
2007**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O fornecimento da energia	1
1.2 Qualidade da energia.....	3
1.3 O controle da qualidade da energia elétrica	7
1.3.1 Continuidade de fornecimento.....	8
1.3.2 Evolução do desempenho da continuidade	11
1.3.3 Comentários finais	12
1.4 Termos e definições	13
1.5 Causas dos distúrbios	15
1.6 Tipos de distúrbios	16
2 TRANSITÓRIO	21
2.1 Transitório impulsivo	21
2.2 Transitório oscilatório	23
3 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO	28
3.1 Sobretensão	28
3.2 Subtensão	29
3.3 Interrupção sustentada.....	33
4 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	35
4.1 Interrupção de curta duração.....	35
4.2 Afundamento de tensão.....	38
4.3.Elevação de tensão	49
5 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	52
6 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA	56
6.1 Nível CC.....	56
6.2 Harmônico.....	56
6.3. Inter-harmônico	70

6.4 <i>Notching</i>	71
6.5. Ruído	71
7 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	72
8 VARIAÇÃO NA FREQUÊNCIA DO SISTEMA	76
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica constitui na atualidade um fator crucial para a competitividade de praticamente todos os setores industriais e dos serviços. O setor da energia elétrica encontra-se, sobretudo nas duas últimas décadas, a atravessar profundas mudanças devido a um número considerável de fatores como (a) a alteração da natureza de cargas consumidoras e da forma como a energia elétrica é hoje utilizada, (b) a liberalização, desregulamentação (ou re-regulamentação) em curso a nível mundial, (c) a proliferação de autoprodutores, (d) o aparecimento de novas tecnologias de geração e (e) o peso crescente das questões ambientais associadas às tecnologias de geração, têm provocado grandes alterações no modo de funcionamento do setor (http://www.ipv.pt/millennium/20_arq1.htm).

1.1 O fornecimento da energia

A energia elétrica, térmica e/ou nuclear deixa as usinas geradoras a cada instante de tempo do dia e é transportada por uma complexa rede de linhas aéreas e/ou de cabos subterrâneos até alcançar seus centros consumidores. A Figura 1 esquematiza de uma forma simplificada todo este processo desde quando a energia deixa a sua fonte geradora (1), passando por uma subestação de elevação da tensão (2), pelo seu transporte por longas linhas de transmissão até as áreas onde há a sua necessidade nos centros consumidores. Uma vez neste ponto, o nível de tensão é rebaixado por outra subestação (4) sendo que as linhas do sistema de distribuição (5) encarregam-se de direcionar a energia elétrica até as residências, centros comerciais e industriais (<http://www.we-currentresource.com/pqbasics>).

No entanto, para manter o nível de tensão dentro de certos limites operacionais aceitáveis, tanto ao nível de transmissão como de distribuição, são necessárias medidas de controle e de acompanhamento tanto dos órgãos de fiscalização como das concessionárias fornecedoras de energia. Isto se deve ao fato de que, tanto os sistemas de distribuição como de transmissão estão constantemente sujeitos a ocasionais variações de tensão. Estas variações, mesmo dentro de limites

pré-estabelecidos, podem causar operações incorretas de sensíveis equipamentos elétricos nos diversos setores.

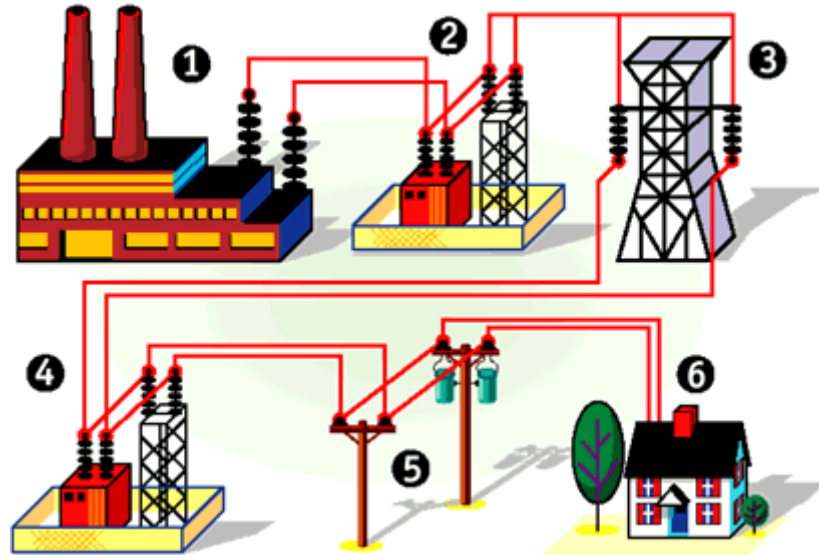


Figura 1- O fornecimento da energia

Para avaliar o quanto um sistema está operando fora de suas condições normais, duas grandezas elétricas básicas podem ser empregadas. São elas: a tensão e a frequência. A frequência em um sistema interligado situa-se na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$. Por outro lado, em relação à tensão, três aspectos principais devem ser observados:

- Forma de onda, a qual deve ser o mais próximo possível de senóide;
- Simetria do sistema elétrico e
- Magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

Entretanto, existem alguns fenômenos, aleatórios ou intrínsecos, que ocorrem no sistema elétrico fazendo com que os aspectos acima citados sofram alterações, deteriorando a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Dentre os fenômenos podemos citar: afundamentos e/ou elevações de tensões, as interrupções, distorções harmônicas, flutuações de tensão, oscilações, ruídos, sobretensões, subtensões, etc. Tais fenômenos bem como as prováveis causas dos mesmos serão mais bem explanados a partir do capítulo 2 deste material.

Para este contexto, cabe salientar que até bem pouco tempo atrás, a maioria dos consumidores industriais entendia que gerenciar a energia elétrica significava controlar a demanda, o fator de potência, e administrar os contratos junto à concessionária. Pouco se falava em supervisão de grandezas como tensões, correntes, potências e muito menos, em distorções harmônicas ou transientes. Alguns especialistas garantem que nos próximos cinco anos, a evolução dos sistemas de gerenciamento de energia será tão grande quanto foi nos últimos 30 anos. Por esta razão, as empresas que hoje pretendem apenas acompanhar a tensão e a corrente em tempo real logo manifestarão uma grande preocupação com o número de interrupções no fornecimento, e o tempo médio destas interrupções. Pouco tempo depois, estes mesmos usuários desejarão acompanhar a forma de onda da tensão entregue pela concessionária, de modo a analisar, por exemplo, transitórios, correntes harmônicas e afundamentos de tensão. No entanto, esta almejada análise depende da definição apropriada de indicadores, que representam o desempenho dos serviços prestados pelas concessionárias envolvidas. No que segue, comentários básicos que dizem respeito a uma “boa qualidade da energia” e sobre os índices de continuidade associados ao assunto serão apresentados.

1.2 Qualidade da Energia

Como são de conhecimento, as interrupções, que podem ser provocadas tanto por fenômenos aleatórios como pela falta de manutenção preventiva dos sistemas elétricos, causam a diminuição da produtividade dos consumidores ocasionando a interrupção na operação dos equipamentos. Para o consumidor residencial, o que ele tem em mente como baixa qualidade da energia elétrica é realmente a falta de energia. Desde que essa falta não seja muito demorada, não haverá grandes aborrecimentos ou mesmo perdas econômicas por parte do consumidor. Se faltar tensão em sua casa durante três minutos, em princípio, não tem problema nenhum. Se faltar durante três horas, passa a ser diferente. Para o consumidor industrial, no entanto, se faltar energia durante meio segundo, a fábrica pára e o processo industrial tem que ser reiniciado, o que causa grandes prejuízos financeiros. Suponha que o processo seja a fabricação de tecido: a interrupção momentânea de tensão pode partir os fios do tecido. Para reiniciar o processo, será preciso emendar todos os fios que se

partiram, e isso leva um certo tempo, com perda de produção. Se fosse um processo de estamparia, por exemplo, o tecido seria refugado uma vez que a estampa ficaria fora dos padrões. Nos processos de laminação de aço, quando as máquinas param, os operários têm que "desentupir" o laminador, cortando os varões de aço com maçaricos, além de manipulá-los sob altas temperaturas, etc. Como dado ilustrativo, constata-se pelos registros dos eventos, que uma interrupção na energia elétrica ou uma queda de 30% na tensão fornecida por um curto período pode zerar os controladores programáveis acarretando em inúmeras situações não desejáveis ao sistema integrado.

Em virtude destas interrupções operacionais, destaca-se então, uma das principais razões para os estudos relacionados à QE: o valor econômico. Sendo que há impactos econômicos consideráveis nas companhias, em seus consumidores/clientes e fornecedores de equipamentos. No ramo industrial, sente-se um impacto econômico direto já que, nos últimos tempos, houve uma grande revitalização das indústrias com a automação e a inclusão de modernos equipamentos.

Tem-se então que, para se estabelecer padrões de qualidade adequados é necessário definir a real expectativa dos consumidores, isto é, identificar o quanto a sociedade está disposta a pagar pelos custos dos mesmos, pois a melhoria do nível de qualidade implica em aumento dos custos.

Cabe, para o momento, definirmos o que seria então um problema de QE.

Não existe uma convenção ou consenso sobre este conceito. Por causa da rápida evolução dos sistemas nos últimos anos, este conceito também vem sofrendo alterações periodicamente.

O conceito de "Qualidade da Energia" está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Entre muitos apontamentos da literatura, podemos então apresentar o assunto como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulta em falha ou má operação de equipamento dos consumidores (DUGAN *et al.*, 1996¹). Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores

¹ Esta será a referência básica adotada no decorrer do trabalho. Quando conveniente outras referências serão citadas.

ou no sistema supridor da concessionária. Como causas mais comuns pode-se citar: perda de linha de transmissão, saída de unidades geradoras, chaveamentos de bancos de capacitores, curto-circuito nos sistemas elétricos, operação de cargas com características não-lineares, etc.

Quanto ao nível da QE requerido, este é que possibilita uma devida operação do equipamento em determinado meio para o qual foi projetado. Usualmente, há padrão muito bem definido de medidas para a tensão, de onde convencionalmente associa-se a QE à qualidade de tensão, já que o fornecedor de energia pode somente controlar a qualidade da tensão, mas não tem controle sobre a corrente que cargas particulares e ou específicas podem requerer. Portanto, o padrão aceito com respeito à QE é direcionado a manter o fornecimento de tensão dentro de certos limites.

No passado, os problemas causados pela má qualidade no fornecimento de energia não eram tão expressivos, visto que, os equipamentos existentes eram pouco sensíveis aos efeitos dos fenômenos ocorridos e não se tinham instalados, em grandes quantidades, dispositivos que causavam a perda da qualidade da energia. Entretanto, com o desenvolvimento tecnológico, principalmente da eletrônica de potência, consumidores e concessionárias de energia elétrica têm-se preocupado muito com a qualidade da energia. Isto se justifica, principalmente, pelos seguintes motivos:

- Os equipamentos hoje utilizados são mais sensíveis às variações na qualidade da energia. Muitos deles possuem controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis a muitos tipos de distúrbios;
- O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, com vistas a otimizar a sua utilização, tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância;
- Maior conscientização dos consumidores em relação aos fenômenos ligados à qualidade da energia, visto que aqueles, estão se tornando mais informados a respeito de fenômenos como interrupções, subtensões, transitórios de chaveamentos, etc., passando a exigir que as concessionárias melhorem a qualidade da energia fornecida;

- Integração dos processos, significando que a falha de qualquer componente tem conseqüências muito mais importantes para o sistema elétrico;
- As conseqüências da qualidade da energia sobre a vida útil dos componentes elétricos.

A título de esclarecimento, a Figura 2 ilustra um levantamento feito nos EUA, mostrando o crescimento das cargas eletrônicas em relação à potência instalada de um sistema típico, com previsão até o ano 2000 [Projeto SIDAQEE²].

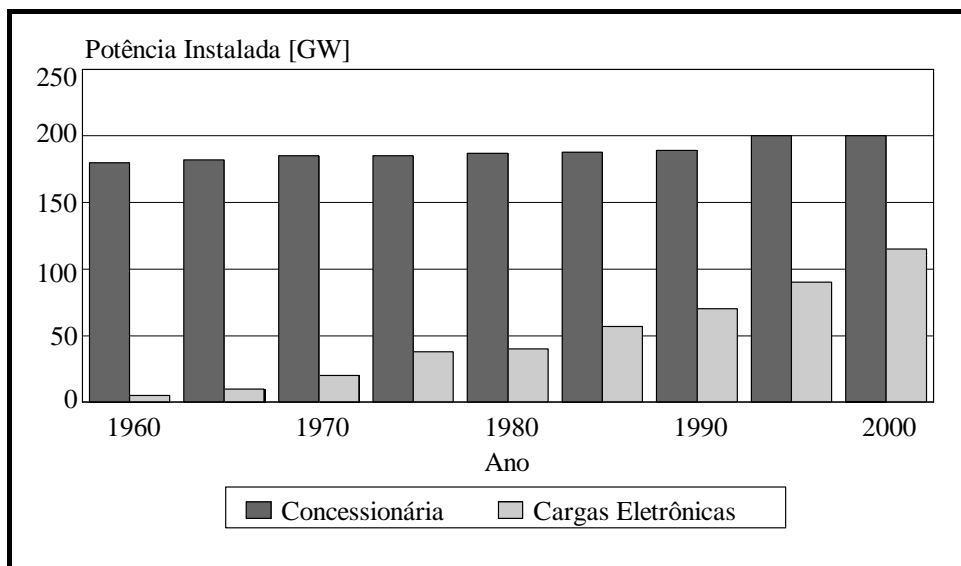


Figura 2- Crescimento de cargas eletrônicas

Para exemplificar os impactos econômicos da qualidade da energia, a Figura 3 mostra os custos associados a interrupções elétricas de até 1 minuto para diferentes setores econômicos.

² Todas as ilustrações apresentadas neste documento foram obtidas do projeto referenciado.
 SEL 5749 - Qualidade da energia elétrica
 Prof. Dr. Mário Oleskovicz
 USP/EESC/SEL/LSEE

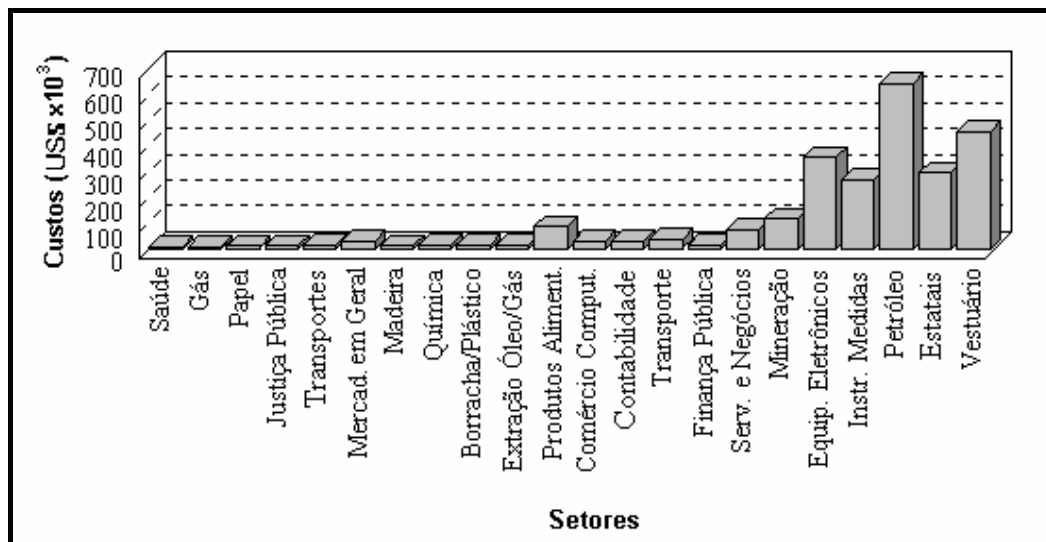


Figura 3 - Custo estimado - Interrupção de até 1 min

Dentro do exposto, fica evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, no intuito de determinar as causas e as conseqüências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar o problema.

1.3 O controle da qualidade da energia elétrica

O texto apresentado a seguir foi retirado do trabalho: “Continuidade nos Serviços de Distribuição de Energia Elétrica”, Conj. & Planej., Salvador: SEI, n. 105, p. 36-40, Fev 2003 (César D. A. Belisário, Daniella A. Bahiense e Gecê M. Oliveira).

A qualidade do setor elétrico de distribuição em específico é a performance das concessionárias no fornecimento de energia elétrica; seus parâmetros são: a conformidade, o atendimento ao consumidor e a continuidade.

Esses parâmetros são pontos básicos para a definição dos diversos critérios de localização e arranjo das subestações, de critérios de escolha dos materiais e equipamentos de controle e proteção, regulação, e configuração da rede de distribuição.

A conformidade está relacionada com os fenômenos associados à forma de onda de tensão, tais como: flutuações de tensão, distorções harmônicas e variações momentâneas de tensão.

O atendimento abrange a relação comercial existente entre as concessionárias e o consumidor, considera a cortesia, o tempo de atendimento às solicitações de serviços, o grau de presteza e o respeito aos direitos do consumidor.

A continuidade corresponde ao grau de disponibilidade de energia elétrica ao consumidor. O ideal é que não haja interrupção no fornecimento de energia elétrica, ou, se houver, que seja a mínima possível e informada ao consumidor em tempo hábil, a fim de prevenir possíveis prejuízos decorrentes da falta de energia. Dentre os parâmetros de qualidade podemos considerar a continuidade o de maior relevância, porque afeta o cotidiano das pessoas e causa grandes transtornos por comprometer serviços essenciais.

1.3.1 Continuidade de fornecimento

Como anteriormente comentado, o controle da qualidade depende da definição apropriada de indicadores que representam o desempenho dos serviços prestados pelas concessionárias de energia. No que se refere à continuidade, os indicadores utilizados permitem o controle e monitoração do fornecimento de energia elétrica, a comparação de valores constatados ao longo de períodos determinados e, a partir de metas de qualidade definidas, a verificação dos resultados atingidos.

Os indicadores, além de refletirem os níveis de qualidade, possibilitam a imposição de limites aceitáveis de interrupção de fornecimento. Esses índices são ainda utilizados pelas concessionárias de energia elétrica como valores de referência para os processos de decisão nas etapas de planejamento, projeto, construção, operação e manutenção do sistema elétrico de distribuição.

Em um contexto nacional, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) tem o papel de promover a qualidade da energia, regulamentar os padrões e garantir o atendimento aos mesmos, estimular melhorias, zelar direta e indiretamente pela observância da legislação, punir quando necessário, e também definir os indicadores

para acompanhamento do desempenho das concessionárias. Cabe também ao órgão regulador estabelecer metas de melhoria de continuidade mediante contratos e/ou negociação com as concessionárias.

A Portaria 046/78, do antigo DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), estabeleceu os primeiros dispositivos do controle da continuidade, os quais, com a evolução do setor tornaram-se insuficientes. A implantação do novo modelo do setor elétrico configurou um monopólio natural regulado no segmento de distribuição, reforçando ainda mais a necessidade de apuração dos controles sobre a qualidade. A regulação pelo preço em vigor incentiva a assimetria de informação, pois as concessionárias não têm estímulos para fornecer dados relativos aos seus custos. Como o nível de qualidade implica em custos, a tendência das concessionárias é manter esse nível no menor patamar possível, de modo a maximizar seus ganhos, correspondentes à margem entre o preço do serviço e o custo. Esses fatos, aliados à evolução dos recursos tecnológicos, tornaram imperativa a revisão desta portaria.

Com a finalidade de atingir este objetivo foi editada a Resolução nº 024/2000 da ANEEL, que introduziu novos avanços, e reformulou os procedimentos de controle de qualidade sobre os aspectos da continuidade.

Entre as medidas mais significativas estão a criação de procedimentos auditáveis, a uniformização do método de coleta de dados e registros dos mesmos, a forma de apresentação e a periodicidade do envio destes à ANEEL, de modo a possibilitar a análise e acompanhamento dos mesmos.

Outra melhoria foi a introdução dos indicadores individuais, que tornou possível a avaliação das ocorrências de interrupção por unidade consumidora, o acompanhamento da agência reguladora e também do próprio consumidor. Atualmente esses índices podem ser solicitados às concessionárias. Entretanto, a partir de janeiro de 2005 foi obrigatória a inclusão destes dados na fatura.

A apuração dos dados de interrupção para os indicadores são realizadas com periodicidade mensal, trimestral e anual.

Foram introduzidos novos critérios de formação de grupo de consumidores de características semelhantes e contíguos, geralmente pertencentes a uma determinada área de uma concessionária, que possibilitou o atendimento homogêneo. Esses

conjuntos foram propostos pelas concessionárias à ANEEL, que após análise e aprovação, gerou uma resolução específica para cada concessionária com dados validados.

Na resolução, estabeleceram-se padrões de referência baseados no levantamento de dados históricos de cada concessionária e a comparação destes entre as diversas empresas.

O desenvolvimento de técnicas de comparação de desempenho entre as empresas de distribuição permitiu a formulação desses novos padrões e o estabelecimento de metas de melhoria dos índices de continuidade.

As metas para os indicadores de continuidade individuais, coletivos (para cada conjunto de unidades consumidoras), ou globais (para o total da concessionária) foram definidas através de negociação entre as concessionárias e a ANEEL. Foram estabelecidas por concessionárias, com base nos valores históricos dos indicadores para os agrupamentos de consumidores, na análise comparativa de desempenho das empresas e nas metas de contratos de concessão, quando existentes. Essas metas são possíveis de renegociação quando das revisões tarifárias.

Dos avanços obtidos pela resolução, podemos ainda ressaltar a exigência do envio dos indicadores à ANEEL, a imposição de penalidade por descumprimento das metas, o estabelecimento de prazos para o aviso de interrupção aos consumidores com a antecedência necessária e a obrigatoriedade da informação dos indicadores na fatura. Também determinou-se a disponibilização do serviço de atendimento gratuito e permanente para o registro de reclamações dos consumidores e as solicitações de providências para serviços emergenciais.

Os índices de continuidade adotados pelo órgão regulador são:

A. Coletivos

- a) DEC: Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
- b) FEC: Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora

B. Individuais

- a) DIC: Duração de interrupção individual por unidade consumidora

- b) FIC: Frequência de interrupção individual por unidade consumidora
- c) DMIC: Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora

Os indicadores coletivos são particularmente úteis à agência reguladora para atender suas necessidades de avaliação das concessionárias, enquanto os individuais servem mais especificamente ao interesse dos consumidores para avaliar o seu atendimento pela distribuidora.

Nas apurações dos indicadores acima todas as concessionárias devem considerar interrupções iguais ou maiores que 3 (três) minutos, e quando já estiver previsto no contrato de concessão, apuração com interrupções iguais ou maiores que 1 (um) minuto, será apurado das duas formas. A partir de 2005, todas as empresas deverão considerar somente as interrupções com intervalos iguais ou maiores que 1 (um) minuto, isto permite uma adequação de todas as distribuidoras ao padrão único de 1 (um) minuto no decorrer deste prazo, já que historicamente a maioria delas trabalhava com interrupções iguais ou maiores a 3 (três) minutos.

1.3.2 Evolução do desempenho da continuidade

Cabe comentar que dos anos de atuação da ANEEL, o padrão de continuidade do serviço de energia elétrica apresentou um ganho de eficiência significativo. No Brasil, no ano de 1997, registrou-se um DEC de 27,19 horas e um FEC de 21,68 interrupções. Em 2004, esses valores foram de 16,04 horas e de 12,24 interrupções.

É notória a ocorrência de uma redução acentuada nesses índices a partir da introdução da resolução nº 24/00. No Brasil, no período após a implantação da ANEEL, até antes da vigência da referida resolução, ou seja, até o ano de 1999, houve uma redução dos DEC e FEC em cerca de 27% e 19% respectivamente, enquanto na Bahia, por exemplo, neste mesmo período, a redução destes índices ficou em cerca de 21% e 8%. Após a implantação da resolução, entre 2000 a 2001, no Brasil o DEC e FEC ficaram com uma redução de 48%, e na Bahia uma redução no DEC de 13%, porém com um ligeiro aumento no FEC de 4,83%.

A ANEEL vem implantando um sistema de monitoração da qualidade da energia elétrica, que dará à agência acesso direto e automático às informações sobre

a qualidade no fornecimento, sem que dependa de dados encaminhados pelas empresas. Por via telefônica, o sistema permite imediata recepção dos dados sobre interrupção e restabelecimento do fornecimento de energia elétrica e conformidade dos níveis de tensão nos pontos em que os equipamentos de monitoração estão instalados. Assim ele mede os indicadores da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia.

Com o sistema, a ANEEL faz, numa determinada amostragem, o acompanhamento da qualidade de modo mais eficaz, além de poder auditar os dados fornecidos pelas concessionárias. Os indicadores apurados pelo sistema são: os de interrupção (DEC, FEC, DIC e FIC) relativos à duração e à frequência por conjunto de consumidores e por consumidor individual e os dados de nível de tensão.

1.3.3 Comentários finais

A Resolução nº 24 não esgota definitivamente o tema continuidade, devido à abrangência e importância do assunto.

Encontram-se em fase de elaboração, através de consulta pública, uma minuta de resolução com o objetivo de alterar e complementar a resolução em vigor, considerando a necessidade de aperfeiçoar as regras estabelecidas.

É importante considerar o dimensionamento adequado do nível de qualidade a ser alcançado, considerando o custo e o benefício dos investimentos que certamente será bancado pela sociedade, no momento em que é preciso ponderar se a prioridade é a melhoria dos índices de continuidade ou, por exemplo, a universalização dos serviços de eletricidade.

É oportuno observar que o cenário do setor elétrico aponta para uma matriz energética com uma maior participação de componentes de fonte de combustíveis fósseis e fontes alternativas, que representam, inicialmente, maiores custos para a sociedade. Vale considerar que para atender a universalização serão necessários grandes esforços em termos de investimentos.

Na medida em que a regulamentação existente sinaliza a adoção de metas de continuidade gradativamente mais exigentes, haverá sempre uma tendência das concessionárias em adicionar aos investimentos uma sofisticação maior na qualidade

dos materiais e padrões de instalação, e isto principalmente na área rural, onde se dá expansão das redes elétricas.

Certamente, todos os consumidores merecem o mesmo nível de qualidade. Porém, cabe avaliar se num mesmo momento é melhor utilizar um padrão de continuidade menos exigente, do que o prolongamento da exclusão dos benefícios da energia elétrica de uma parcela da sociedade.

O desafio atual do setor elétrico, no que tange ao controle da qualidade de distribuição, é encontrar padrões e metas para seus indicadores, que possam redundar em melhoria nos serviços de distribuição, sem com isso criar barreiras à expansão do setor.

1.4 Termos e definições

O objetivo desta seção é o de apresentar as definições aceitas para muitos dos termos encontrados na literatura nacional e internacional relacionados à qualidade da energia. Esta apenas se refere às definições básicas, tendo como intuito de apenas despertar ou formar uma idéia inicial a respeito do assunto. Termos como os que seguem são empregados em uma variedade de diferentes documentos e estão freqüentemente sujeitos a confusões. Definições mais precisas, quando convenientes, serão posteriormente apresentadas.

Afundamento (*Dip* ou *Sag*): qualquer decréscimo na tensão de pequena duração (menor do que 1 minuto).

Carga Crítica (*Critical Load*): dispositivos ou equipamentos identificados como importantes ou essenciais para a segurança de pessoas ou para a situação econômica do comércio/indústria.

Distorção da Forma de Onda (*Waveform Distortion*): qualquer variação na qualidade da energia representada nas formas de ondas das tensões e correntes trifásicas.

Distorção Harmônica (*Harmonic Distortion*): alteração na forma padrão da tensão ou corrente (onda senoidal) devido a um equipamento gerando freqüências diferentes das de 60 ciclos por segundo.

Elevação (*Swell*): qualquer aumento de tensão de pequena duração (menor do que um minuto) .

Interrupção (*Interruption*): completa perda da energia elétrica

Interrupção Momentânea (*Momentary Outage*): uma pequena interrupção na energia permanecendo entre 1/30 de um segundo (dois ciclos) a 3 segundos.

Distúrbio (*Disturbance*): uma variação de tensão. Comumente, após a operação incorreta de determinado equipamento elétrico, por razões desconhecidas, o seu mau funcionamento será relacionado ao distúrbio de tensão.

Oscilação ou Tremulação (*Flicker*): variação de tensão de pequena duração, mas longa o necessário para ser percebida pelos olhos humanos como uma oscilação de tensão.

Ruído (*Noise*): qualquer sinal elétrico indesejado de alta frequência que altera a forma de tensão padrão (onda senoidal).

Sobretensão (*Overvoltage*): aumento do nível de tensão acima do normal (10% ou mais), com duração superior a um minuto.

Subtensão (*Drop* ou *Undervoltage*): queda ou diminuição de tensão devido à partida de grandes motores ou perda de alimentadores ou transformadores sob carga. Algumas vezes é empregado para descrever afundamentos de tensão (*voltage sags*) ou subtensões (*undervoltages*).

Tensão Nominal ou Normal (*Nominal* ou *Normal Voltage*): tensão nominal ou normal contratada para um sistema de determinada classe de tensão.

Transitório (*Transient, Spike* ou *Surge*): um aumento inesperado no nível de tensão que tipicamente permanece por menos do que 8ms..

1.5 Causas dos distúrbios

Alguns distúrbios relacionados à qualidade da energia originam-se do próprio sistema da empresa. No entanto, as causas destes distúrbios estão, geralmente, além do controle das empresas. Como por exemplo, ações provocadas pela ação da natureza como: relâmpagos, contato de galhos de árvores, ventos fortes, contatos de animais, gelo, etc. Além destes, temos os eventos de causas aleatórias como: atividades de construção, acidentes envolvendo veículos motores, falhas de

equipamentos. Somando-se ainda, as operações normais da empresa como chaveamentos, operações com bancos de capacitores e atividades de manutenção também podem gerar situações que venham a provocar determinados distúrbios sobre o sistema.

Para limitar estes tipos de distúrbios sobre o sistema a um menor número possível de clientes, o sistema de distribuição das empresas emprega um considerável número de dispositivos tais como circuitos disjuntores, circuitos automáticos de religamento, barramentos e seccionadores para auxiliar no isolamento do defeito.

Uma grande percentagem dos distúrbios relacionados à qualidade da energia, na realidade, originam-se, de uma maneira geral, de dentro das instalações industriais e ou comerciais.

Dos distúrbios originados de dentro das instalações dos usuários podemos destacar como principais fontes:

- a) nas instalações comerciais: os sistemas de aquecimento ou resfriamento de motores; elevadores; refrigeradores, lâmpadas fluorescentes; condutores inadequados e aterramentos impróprios; maquinário de escritório (copiadoras, fax, impressoras a laser, etc.); circuitos sobrecarregados e interferência magnética.
- b) nas instalações industriais: reguladores de velocidade ajustável; capacitores para correção do fator de potência; motores elétricos de grande porte; geradores de emergência; condutores inadequados e aterramentos impróprios; circuitos sobrecarregados e interferência magnética.

1.6 Tipos de distúrbios

Os distúrbios de energia podem ser originados tanto nos sistemas e /ou equipamentos das empresas concessionárias como dos consumidores. Estes distúrbios podem ser classificados em categorias que podem variar quanto ao efeito, duração e intensidade. A Tabela 1 que segue, ilustra as categorias mais comuns dos distúrbios, suas causas e algumas soluções práticas.

TABELA 1 – Categorias de classificação dos distúrbios considerando-se o seu efeito, duração e intensidade sobre determinado sistema

Tipo do distúrbio	Descrição	Possíveis causas	Efeitos	Soluções
Interrupção de energia	Total interrupção do fornecimento de energia:	Acidentes, ações da natureza, etc., os quais requerem a devida	Saída e/ou queda do sistema	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS) – Suprimento de energia de forma contínua
	Interrupção momentânea: permanece de 0,5 s até 3 s	operação dos equipamentos da concessionária (fusíveis, religadores, etc.)	Perda de memória de controladores e computadores	
	Interrupção temporária: permanece de 3 s até 1 min	Curto circuitos internos requerendo a devida operação de disjuntores e fusíveis ao nível do consumidor.	Avaria de <i>hardware</i> Avaria de produtos	Gerador de emergência (interrupção permanente)
	Interrupção permanente: permanece por um período superior a 1 min			
Tipo do distúrbio	Descrição	Possíveis causas	Efeitos	Soluções
Transitório	Alterações súbitas nas formas CA, resultando um abrupto, mas breve aumento da tensão	São causados por tempestades (relâmpagos), operação de fusíveis, religadores e disjuntores da concessionária Causas internas são a entrada ou saída de grandes equipamentos e chaveamento de capacitores	Erros de processamento e perda de dados. Queima de placas de circuitos, danos ao isolamento e avarias nos equipamentos elétricos	Pára-raios <i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS) Transformadores de isolamento Transformador de tensão constante

Tipo do distúrbio	Descrição	Possíveis causas	Efeitos	Soluções
Afundamento/elevação	Qualquer decréscimo (afundamento) ou aumento (elevação) na tensão por um período de tempo entre meio ciclo a 1 min.	Parada ou partida de pesados (grandes) equipamentos	Perda de memória e erros de dados	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS)
	Afundamentos de tensão correspondem a 87% de todos os distúrbios observados em um sistema de energia (de acordo com estudos do <i>Bell Labs</i>).	Curto circuitos Falhas de equipamentos ou chaveamentos da concessionária	Parada de equipamentos Oscilações luminosas Redução da vida útil e diminuição da velocidade e/ou parada de motores	Transformador de tensão constante Reguladores de tensão

Tipo do distúrbio	Descrição	Possíveis causas	Efeitos	Soluções
Ruído	Sinal elétrico de alta frequência indesejável que altera a forma de onda de tensão convencional (forma senoidal)	Interferência da transmissão de rádio ou televisão	Perda de dados e erros de processamento	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS)
		Operação de equipamentos eletrônicos	Recepção distorcida de áudio e vídeo	Transformadores de isolamento Filtros de linha

Tipo do distúrbio	Descrição	Possíveis causas	Efeitos	Soluções
Distorção harmônica	Alteração no padrão normal da tensão (forma senoidal) devido a equipamentos gerando frequências diferentes das de 60 ciclos por segundo	Dispositivos eletrônicos e cargas não lineares	Aquecimento de equipamentos e condutores elétricos	Filtros harmônicos Transformadores de isolamento
			Decréscimo do desempenho de motores	Melhoras nos condutores e aterramento
			Operação indevida dos disjuntores, relés ou fusíveis	Cargas isoladas Reatores de linha

Tipo do distúrbio	Descrição	Possíveis causas	Efeitos	Soluções
Sub e Sobretensão	Qualquer alteração abaixo ou acima do valor nominal da tensão que persista por mais de um min	Sobrecarga nos equipamentos e condutores Flutuação de grandes cargas ou <i>taps</i> dos transformadores incorretamente ajustados Condutor desenergizado ou faltoso ou conexões elétricas indevidas	Ofuscamento ou brilho da luz Parada de equipamentos Sobreaquecimento de motores Vida ou eficiência reduzida dos equipamentos	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS) Transformadores de tensão constante Distribuição de equipamentos Motores de tensão reduzidas

A Tabela 2 mostra as categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos que contribuem para a perda da qualidade da energia em um determinado sistema elétrico. Grande parte destes fenômenos já receberam comentários iniciais quando da apresentação da Tabela 1. Esta Tabela (2) estará referenciada a todos os demais capítulos que dizem respeito a cada fenômeno em específico. A mesma é uma síntese de todos os distúrbios que eventualmente possam a vir a ocorrer sobre determinado sistema elétrico, trazendo as principais características pelas quais os fenômenos são definidos.

No que segue, todos estes distúrbios serão novamente apresentados, procurando-se melhor caracterizá-los conforme o seu efeito, duração e intensidade sobre determinado sistema elétrico.

Tabela 2 - Classes e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistema elétricos

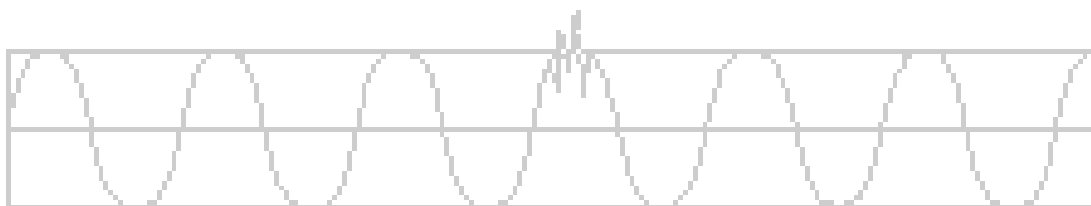
Fenômeno	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
Transitórios			
- Impulsivos	ns μs ms	< 50 ns 50 ns - 1 ms > 1 ms	
- Oscilatórios	Baixa Frequência Média Frequência Alta Frequência	< 5 kHz 20 μs 5 μs	0 - 4 p.u. 0 - 8 p.u. 0 - 4 p.u.
Variações de Curta Duração			
- Instantânea	Interrupção Afundamento Elevação	0,5 - 30 ciclos 0,5 - 30 ciclos 0,5 - 30 ciclos	< 0,1 p.u. 0,1 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,8 p.u.
- Momentânea	Interrupção Afundamento Elevação	30 ciclos - 3 s 30 ciclos - 3 s 30 ciclos - 3 s	< 0,1 p.u. 0,1 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,4 p.u.
- Temporária	Interrupção Afundamento Elevação	3 s - 1 min 3 s - 1 min 3 s - 1 min	< 0,1 p.u. 0,1 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,2 p.u.
Variações de Longa Duração			
	Interrupção Sustentada Sub-tensão Sustentada Sobre-tensão Sustentada	> 1 min > 1 min > 1 min	0,0 p.u. 0,8 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,2 p.u.
Desequilíbrio de Tensão		RP	0,5 - 2%
Distorção da Forma de Onda			
	Nível CC Harmônicos Inter-Harmônicos “Notching” Ruído	de ordem 0-100 0 - 6 kHz faixa ampla	RP RP RP RP RP
			0 - 0,1% 0 - 20% 0 - 2% 0 - 2% 0 - 1%
Flutuação de Tensão	< 25 Hz	intermitente	0,1 - 7%
Variação da Frequência do Sistema		< 10 s	

RP – Regime Permanente

TRANSITÓRIO

Conforme DUGAN et al. (1996), o termo transitório tem sido aplicado à análise das variações do sistema de energia para denotar um evento que é indesejável, mas momentâneo, em sua natureza. Ou ainda, entende-se por transitórios eletromagnéticos as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente.

Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos, os chamados transitórios impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os transitórios oscilatórios, causados por chaveamentos.



2.1 Transitório impulsivo

Um transitório impulsivo é uma súbita alteração não desejável no sistema, que se encontra em condição de regime permanente, refletido nas formas de ondas da tensão e corrente, ou ambas, sendo unidirecional na sua polaridade (primeiramente positivo ou negativo). Normalmente é causado por descargas atmosféricas com frequências bastante diferentes daquela da rede elétrica. A Figura 4 ilustra uma corrente típica de um transitório impulsivo, oriundo de uma descarga atmosférica.

Os transitórios impulsivos são normalmente caracterizados pelos seus tempos de aumento e decaimento, os quais podem ser revelados pelo conteúdo espectral do sinal em análise. Como exemplo, um transitório impulsivo 1,2x50- μ s 2000-V nominalmente aumenta de zero até seu valor de pico de 2000 V em 1,2 μ s e decai a

um valor médio do seu pico em 50 μ s. Como anteriormente citado, a causa mais comum de transitórios impulsivos é a descarga atmosférica. Devido à alta frequência do sinal resultante, a forma dos transitórios impulsivos pode ser alterada rapidamente pelos componentes do circuito e apresentar características significantes quando observadas de diferentes partes do sistema de energia.

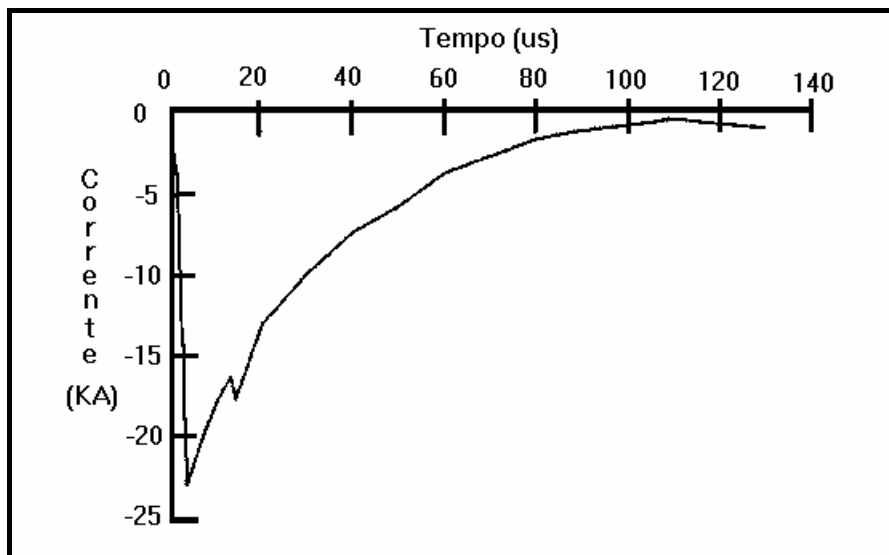


Figura 4 - Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica

Por se tratarem de transitórios causados por descargas atmosféricas, é de fundamental importância se observar qual o nível da tensão no ponto de ocorrência da descarga.

Em sistemas de distribuição o caminho mais provável para as descargas atmosféricas é através de um condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobretensões no sistema. Uma descarga diretamente na fase geralmente causa “*flashover*” na linha próxima ao ponto de incidência e pode gerar não somente um transitório impulsivo, mas também uma falta acompanhada de afundamentos de curta duração e interrupções. Altas sobretensões transitórias podem também ser geradas por descargas que fluem ao longo do condutor terra. Existem numerosos caminhos através dos quais as correntes de descarga podem fluir pelo sistema de aterramento, tais como o terra do primário, o terra do secundário e as estruturas do sistema de

distribuição. Os principais problemas de qualidade da energia causados por estas correntes no sistema de aterramento são os seguintes:

- Elevação do potencial do terra local, em relação a outros terras, em vários kV. Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra, tal como um computador conectado ao telefone através de um “modem”, podem falhar quando submetidos aos altos níveis de tensão.
- Indução de altas tensões nos condutores fase, quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra.

Em se tratando de descargas em pontos de extra alta tensão, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou abaixadoras. Entretanto, a onda de tensão ao percorrer a linha, desde o ponto de incidência até as subestações abaixadoras para a tensão de distribuição, tem o seu valor de máximo consideravelmente atenuado, e assim, consumidores ligados na baixa tensão não sentirão os efeitos advindos de descargas atmosféricas ocorridas a nível de transmissão. Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão e supostamente localizados nas proximidades do ponto de descarga, estarão sujeitos a tais efeitos, podendo ocorrer a danificação de alguns equipamentos de suas respectivas instalações.

2.2 Transitório oscilatório

Também como para o caso anterior, um **transitório oscilatório** é uma súbita alteração não desejável da condição de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, onde as mesmas incluem valores de polaridade positivos ou negativos. É caracterizado pelo seu conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude da tensão (Tabela 2). Estes transitórios são decorrentes da energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, etc..

Um transitório com um componente de frequência primário menor do que 5 kHz, e uma duração de 0,3 a 50 ms, é considerado um **transitório oscilatório de**

baixa frequência. Estes transitórios são frequentemente encontrados nos sistemas de subtransmissão e de distribuição das concessionárias e são causados por vários tipos de eventos. O mais comum provem da energização de um banco de capacitores, que tipicamente resulta em uma tensão transitória oscilatória com uma frequência primária entre 300 e 900 Hz. O pico da magnitude pode alcançar 2,0 p.u., mas é tipicamente 1,3 a 1,5 p.u. com uma duração entre 0,5 e 3 ciclos dependendo do amortecimento do sistema. A Figura 5 ilustra o resultado da simulação da energização de um banco de 600 kVAr na tensão de 13,8 kV.

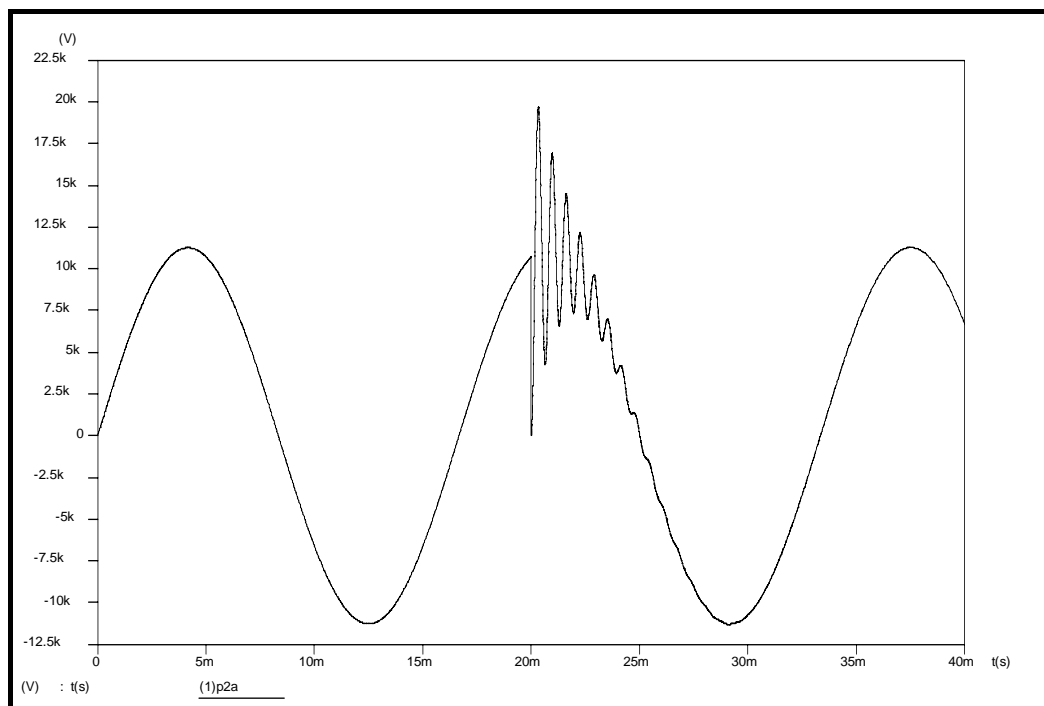


Figura 5 - Transiente proveniente do chaveamento de um banco de capacitores

Transientes oscilatórios com frequências primárias menor do que 300 Hz também podem ser encontrados em sistemas de distribuição. Estes são geralmente associados com a ferroressonância e a energização de transformadores. Transientes envolvendo capacitores em série podem ser incluídos nesta categoria. Estes ocorrem quando o sistema responde pela ressonância com componentes de baixa frequência na corrente de magnetização do transformador (segunda e terceira harmônica) ou quando condições não usuais resultam em ferroressonância.

Oscilações de ferroressonância podem aparecer no TPC devido à possibilidade de uma capacitância entrar em ressonância com algum valor particular de indutância dos componentes que contem núcleo de ferro. Esta situação não é desejável no caso dos TPCs, uma vez que informações indesejáveis poderiam ser transferidas aos relés e aos instrumentos de medição.

A Figura 6 ilustra o fenômeno da ferroressonância envolvendo um transformador a vazio.

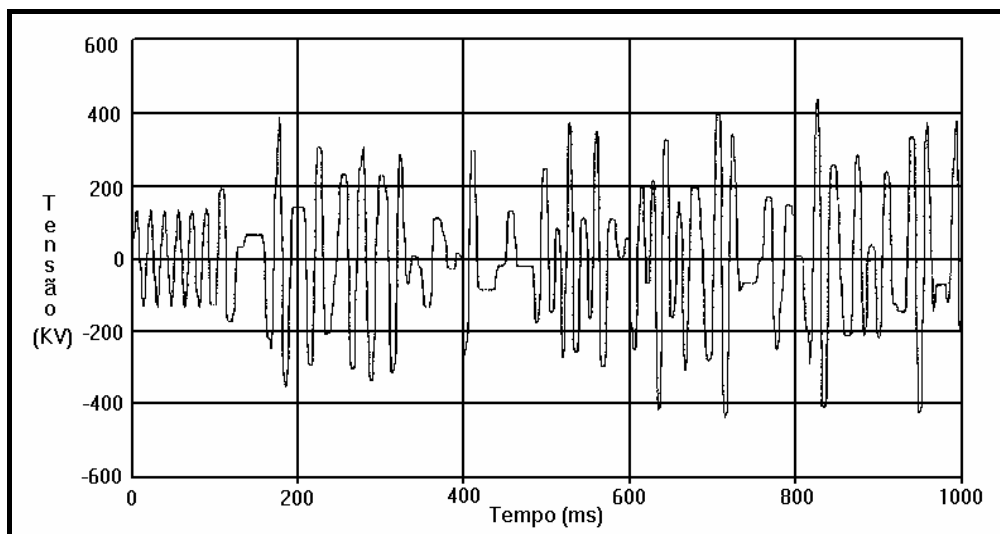


Figura 6 - Transitório oscilatório de baixa frequência causado pelo fenômeno da ferroressonância em um transformador a vazio

Um transitório com componentes de frequência entre 5 e 500 kHz, com uma duração medida em microssegundos (ou vários ciclos da frequência principal), é referenciado como transitório oscilatório de média frequência. Estes podem ser causados pelo chaveamento de disjuntores para a eliminação de faltas e podem também ser o resultado de uma resposta do sistema a um transitório impulsivo. A título de ilustração, tomam-se como referência as Figuras 7 e 8, as quais ilustram um circuito equivalente para o estudo de tensões transitórias de restabelecimento (TRV) e a resposta do sistema à operação do disjuntor respectivamente.

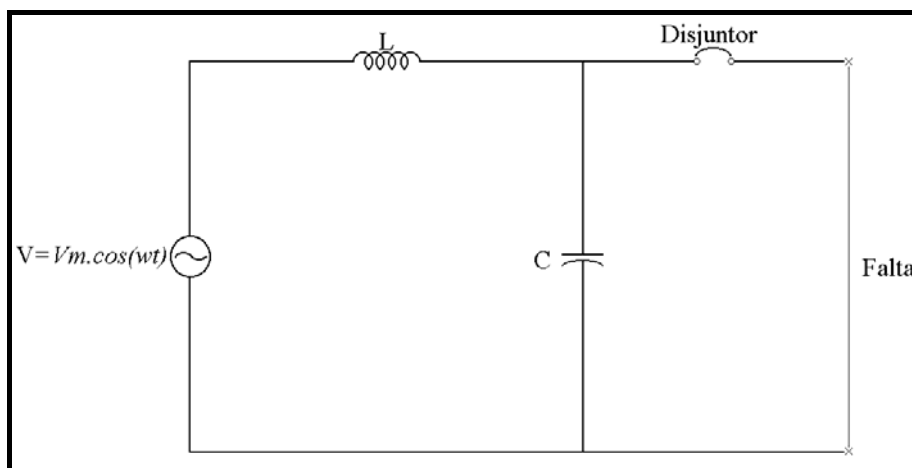


Figura 7 - Circuito equivalente para o estudo das tensões transitórias de restabelecimento quando da eliminação de uma falta

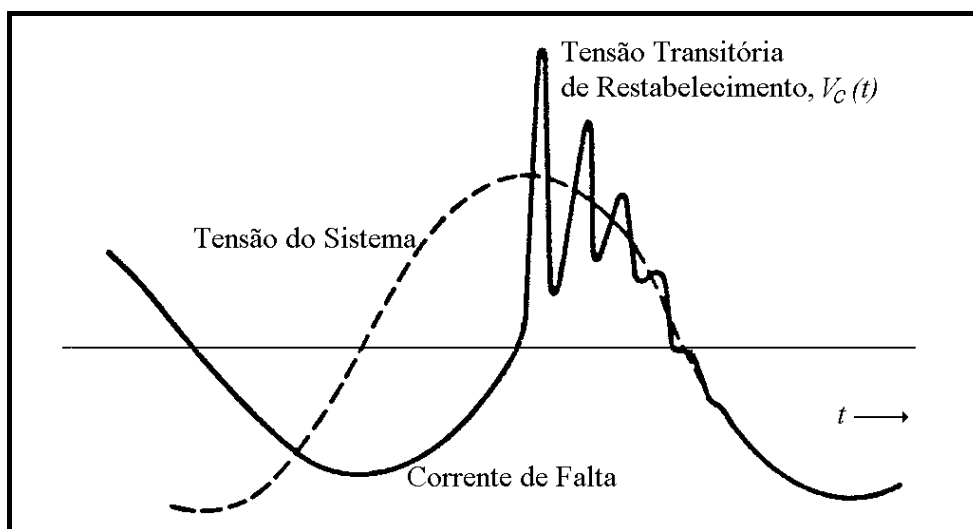


Figura 8 - Sobretensão decorrente da eliminação de uma falta

Como se pode observar, na Figura 8, o pico de tensão pode atingir, no máximo, 2 vezes o valor de pico nominal. Estas sobretensões, como já foi dito para transitórios de baixa frequência, quando aplicadas a equipamentos, podem ocasionar uma série de efeitos indesejáveis.

Transitórios oscilatórios com um componente de frequência maior do que 500 kHz e com uma duração típica medida em microssegundos (ou vários ciclos da frequência principal) são considerados transitórios oscilatórios de alta frequência. Estes transitórios são frequentemente resultados de uma resposta local

do sistema a um transitório impulsivo. Podem ser causados por descargas atmosféricas ou por chaveamento de circuitos indutivos.

A desenergização de cargas indutivas pode gerar impulsos de alta frequência. Apesar de serem de curta duração, estes transitórios podem interferir na operação de cargas eletrônicas. Filtros de alta-frequência e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra este tipo de transitório.

Considerando o crescente emprego de capacitores pelas concessionárias para a manutenção dos níveis de tensão, e pelas indústrias com vistas à correção do fator de potência, tem-se tido uma preocupação especial no que se refere à possibilidade de se estabelecer uma condição de ressonância, devido às oscilações de altas frequências, entre o sistema da concessionária e a indústria, e assim ocorrer uma amplificação das tensões transitórias, bem superiores às citadas anteriormente, podendo atingir níveis de 3 a 4 p.u.

Um procedimento comum para limitar a magnitude da tensão transitória é transformar os bancos de capacitores do consumidor, utilizados para corrigir o fator de potência, em filtros harmônicos. Uma indutância em série com o capacitor reduzirá a tensão transitória na barra do consumidor a níveis aceitáveis. No sistema da concessionária, utiliza-se o chaveamento dos bancos com resistores de pré-inserção. Com a entrada deste resistor no circuito, o primeiro pico do transitório, o qual causa maiores prejuízos, é significativamente amortecido.

Conforme apresentado, algumas técnicas podem ser utilizadas na tentativa de se reduzir os níveis dos transitórios causados seja por chaveamentos ou por descargas atmosféricas. Entretanto, em alguns casos, como por exemplo, os transitórios oriundos de surtos de chaveamento em redes de distribuição, podem ter seu grau de incidência e magnitudes reduzidas através de uma reavaliação das filosofias de proteção e investimentos para melhorias nas redes. Esta última medida visa o aumento da capacidade da rede, portanto, evitando que bancos de capacitores venham a ser exigidos.

VARIAÇÃO DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

Dos problemas relacionados às variações na tensão, citamos os efeitos de longa duração por um período superior a 1 min, que podem ser caracterizados como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema. Estas variações podem estar associadas à sobre ou subtensão e faltas sustentadas. No caso de sobre ou subtensão, geralmente, não resultam de falhas do sistema, mas são causadas por variações na carga e ou operações de chaveamento sobre o mesmo. Tais variações são tipicamente apresentadas e analisadas como gráficos do sinal de tensão (*rms – root mean square*) versus o tempo .

3.1 Sobretensão

Podemos designar uma sobretensão como sendo um aumento no valor eficaz da tensão CA, maior do que 110% (valores típicos entre 1,1 e 1,2 p.u.) na frequência do sistema, por uma duração maior do que 1 min (Tabela 2). Sobretensões, usualmente resultam do desligamento de grandes cargas ou energização de um banco de capacitores. *Taps* dos transformadores incorretamente conectados também podem resultar em sobretensões no sistema.

Geralmente, são instalados nas indústrias bancos de capacitores, normalmente fixos, para correção do fator de potência ou mesmo para elevação da tensão nos circuitos internos da instalação. Nos horários de ponta, quando há grandes solicitações de carga, o reativo fornecido por estes bancos é desejável. Entretanto, no horário fora de ponta, principalmente no período noturno, tem-se um excesso de reativo injetado no sistema, o qual se manifesta por uma elevação da tensão.

Com relação às conseqüências das sobretensões de longa duração, estas podem resultar em falha dos equipamentos. Os dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensões, embora transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs e máquinas rotativas, geralmente, não apresentam falhas imediatas. Entretanto, tais equipamentos, quando submetidos a repetidas sobretensões, poderão ter as suas vidas úteis reduzidas. Relés de proteção também

poderão apresentar falhas de operação durante as sobretensões. Uma observação importante, diz respeito à potência reativa fornecida pelos bancos de capacitores, que aumentará com o quadrado da tensão, durante uma condição de sobretensão.

Dentre algumas opções para a solução de tais problemas, destaca-se a troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, tanto em sistemas das concessionárias como em sistemas industriais, possibilitando um maior controle do nível da tensão e a instalação de compensadores estáticos de reativos.

3.2 Subtensão

Já a subtensão apresenta características opostas, sendo que agora, um decréscimo no valor eficaz da tensão AC para menos de 90% na frequência do sistema, também com uma duração superior a 1 min, é caracterizado (Tabela 1).

As subtensões são decorrentes, principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Outros fatores que contribuem para as subtensões são: a conexão de cargas à rede elétrica, o desligamento de bancos de capacitores e, conseqüentemente, o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão.

A queda de tensão por fase é função da corrente de carga, do fator de potência e dos parâmetros R e X da rede, sendo obtidos através da equação (1).

$$\Delta V = I(R\cos\phi + X\text{sen}\phi) \quad (1)$$

onde:

ΔV - queda de tensão por fase;

I - corrente da rede;

R - resistência por fase da rede;

X - reatância por fase da rede;

$\cos\phi$ - fator de potência.

A partir da equação (1) pode-se concluir que aqueles consumidores mais distantes da subestação estarão submetidos a menores níveis de tensão. Além disso, quanto menor for o fator de potência, maiores serão as perdas reativas na distribuição, aumentando a queda de tensão no sistema.

Para evidenciar a influência do fator de potência na tensão, a Figura 9 ilustra o perfil de tensão ao longo de um alimentador.

Dentre os problemas causados por subtensões de longa duração, destacam-se:

- Redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema;
- Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores e controladores eletrônicos;
- Redução de índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, conforme ilustra a Figura 10;
- Elevação do tempo de partida das máquinas de indução, o que contribui para a elevação de temperatura dos enrolamentos e
- Aumento nos valores das correntes do estator de um motor de indução quando alimentado por uma tensão inferior à nominal, como mostra a Figura 11. Desta forma tem-se um sobreaquecimento da máquina, o que certamente reduzirá a expectativa de vida útil da mesma.

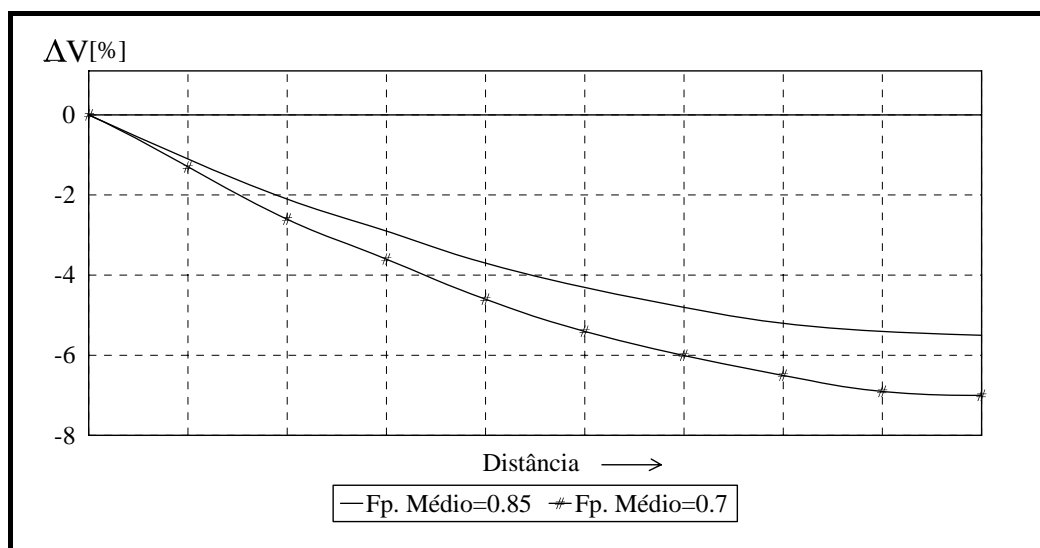


Figura 9 - Perfil de tensão ao longo de um alimentador em

função do fator de potência.

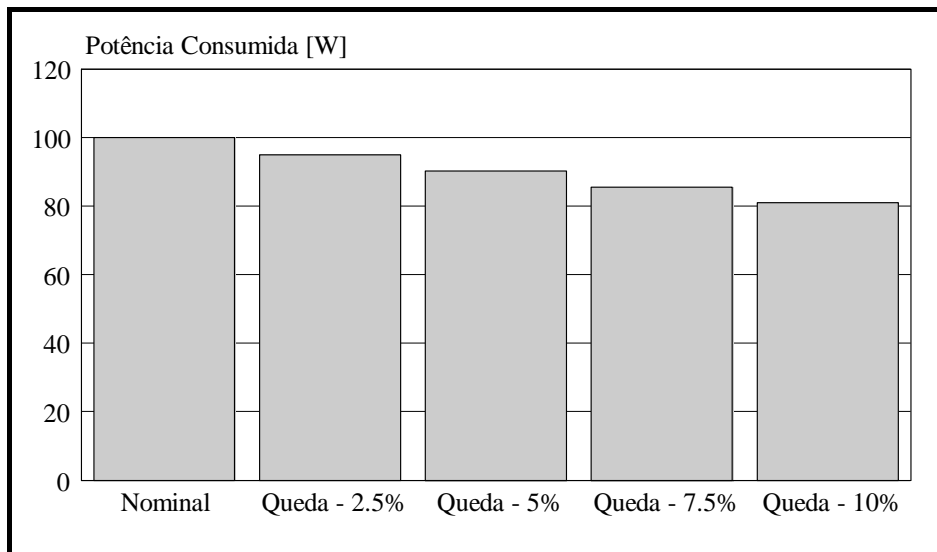


Figura 10 - Potência consumida por uma lâmpada incandescente de 100W para diferentes valores de tensão.

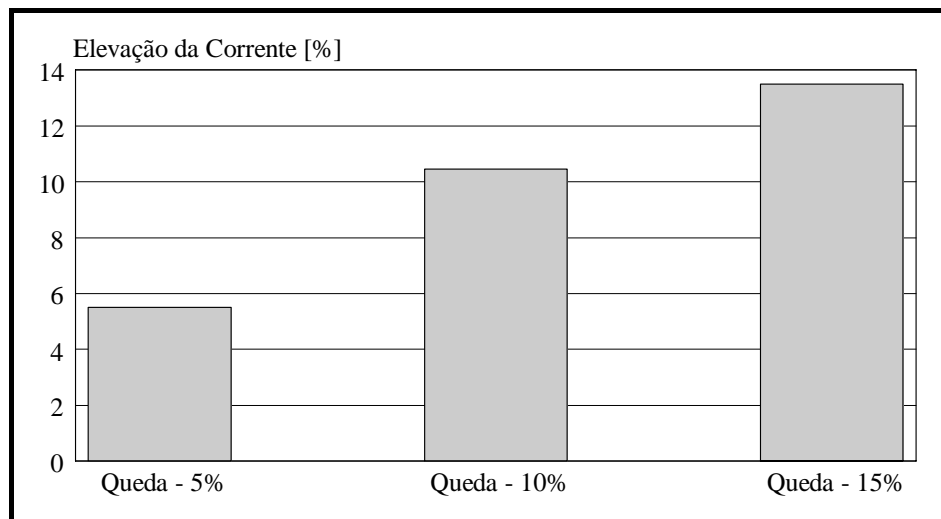


Figura 11 - Elevação de corrente num motor de indução de 5CV em função da tensão de alimentação.

Para minimizar estes problemas, as medidas corretivas geralmente envolvem uma compensação da impedância Z , ou a compensação da queda de tensão $IR + jIX$, causada pela impedância.

As opções para o melhoramento da regulação de tensão são:

- instalar reguladores de tensão para elevar o nível da tensão;
- instalar capacitores “shunt” para reduzir a corrente do circuito;

- instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva (IX);
- instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância Z;
- mudar o transformador de serviço para um de capacidade maior, reduzindo assim, a impedância Z; e
- instalar compensadores estáticos de reativos, os quais tem os mesmos objetivos que os capacitores, para mudanças bruscas de cargas.

Existe uma variedade de dispositivos usados para regulação de tensão. Tais dispositivos são tipicamente divididos em três classes:

- Transformadores de tap variável: Existem transformadores de *tap* variável com acionamento mecânico ou eletrônico. A maioria destes são do tipo autotransformador, embora existam numerosas aplicações de transformadores de dois e três enrolamentos com comutadores de *tap*. Os do tipo mecânico são para cargas que variam lentamente, enquanto que os eletrônicos podem responder rapidamente às mudanças de tensão.
- Dispositivos de isolação com reguladores de tensão independentes: Dispositivos de isolação incluem sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*), transformadores ferroressonantes (tensão constante), conjuntos M-G, etc. Estes são equipamentos que isolam a carga da fonte de suprimento através de algum método de conversão de energia. Assim, a saída do dispositivo pode ser separadamente regulada e manter constante a tensão, desprezando as variações provenientes da fonte principal.
- Dispositivos de compensação de impedância: Capacitores “*shunt*” ajudam a manter a tensão pela redução da corrente de linha ou através da compensação de circuitos indutivos. Estes capacitores podem ser fixos ou chaveados dependendo do tipo e da necessidade do sistema. Capacitores em série são relativamente raros, mas são muito úteis em algumas cargas impulsivas como britadeiras, etc. Estes capacitores compensam grande parte da indutância dos sistemas. Se o sistema é altamente indutivo, a impedância é significativamente reduzida. Se o sistema não é altamente indutivo, mas tem uma alta proporção de resistência, os capacitores série não serão muito efetivos. Compensadores estáticos de reativos podem ser

aplicados tanto em sistemas das concessionárias como industriais. Eles ajudam a regular a tensão pela rápida resposta ao suprir ou consumir energia reativa. Existem três tipos principais de compensadores estáticos de reativos: o reator controlado a tiristor, o capacitor chaveado a tiristor e o reator a núcleo saturado. Estes equipamentos são muito usados em cargas geradoras de oscilações (*flicker*), tais como fornos a arco e em outras cargas que variam randomicamente.

3.3 Interrupção sustentada

Quando o fornecimento de tensão permanece em zero por um período de tempo que excede 1 min, a variação de tensão de longa duração é considerada como uma interrupção sustentada. As interrupções maiores do que 1 min são geralmente permanentes e requerem intervenção humana para reparar e retornar o sistema à operação normal no fornecimento de energia (Tabela 2).

As interrupções sustentadas podem ocorrer de forma inesperada ou de forma planejada. A maioria delas ocorre inesperadamente e as principais causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, etc. Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção na rede, ou seja, serviço como troca de cabos e postes, mudança do tap do transformador, alteração dos ajustes de equipamentos de proteção, etc.

Seja a interrupção de natureza inesperada e ou sustentada, o sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que:

- o número de interrupções seja mínimo;
- uma interrupção dure o mínimo possível e
- o número de consumidores afetados seja pequeno.

Ao ocorrer uma falta de caráter permanente, o dispositivo de proteção do alimentador principal executa 3 ou 4 operações na tentativa de se restabelecer o sistema, até que o bloqueio definitivo seja efetuado. A duração desta interrupção pode atingir de vários minutos a horas (em média 2 horas), dependendo do local da falta, do tipo de defeito na rede e também da operacionalidade da equipe de manutenção. Em redes aéreas, a localização do defeito não demora muito tempo, ao

passo que em redes subterrâneas necessita-se de um tempo considerável, o que contribui para o comprometimento da qualidade do fornecimento. Entretanto, a probabilidade de ocorrer uma falta em redes subterrâneas é muito menor do que em redes aéreas.

A consequência de uma interrupção sustentada é o desligamento dos equipamentos, exceto para aquelas cargas protegidas por sistemas “no-breaks” ou por outras formas de armazenamento de energia. Como será colocado posteriormente, no caso de interrupções de curta duração, o desligamento de equipamentos acarreta grandes prejuízos às indústrias. No caso de interrupção sustentada o prejuízo é ainda maior, visto que o tempo de duração da interrupção é muito grande, comparado com o da interrupção de curta duração, retardando a retomada do processo produtivo.

VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Estas variações podem ser designadas como instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 s) ou temporárias (3 s a 1 min), conforme definido na Tabela 2. Variações de tensão de curta duração são causadas por condições de faltas, energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou a perda intermitente de conexões nos cabos do sistema. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode ou causar um decréscimo da tensão (afundamento) ou um aumento da tensão (elevação), ou ainda, a completa perda da tensão (interrupção). A condição de falta pode estar próxima ou longe do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto da tensão, durante a condição de falta é uma variação de curta duração até que os dispositivos de proteção operem para limpar a falta.

4.1 Interrupção de curta duração

Uma interrupção ocorre quando o fornecimento de tensão ou corrente de carga decresce para um valor menor do que 0,1 p.u. por um período de tempo que não excede 1 min.

As interrupções podem ser resultantes de faltas no sistema de energia, falhas nos equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. As interrupções são medidas pela sua duração desde que a magnitude da tensão é sempre menor do que 10% da nominal. A duração de uma interrupção, devido a uma falta sobre o sistema da concessionária, é determinado pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção empregados. Religadores programados para operar instantaneamente, geralmente, limitam a interrupção a tempos inferiores a 30 ciclos. Religadores temporizados podem originar interrupções momentâneas ou temporárias, dependendo da escolha das curvas de operação do equipamento. A duração de uma interrupção devido ao mau funcionamento de equipamentos é irregular.

Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão (item 4.2) quando estas são devidas a faltas no sistema supridor. O afundamento

ocorre no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema. A Figura 12 mostra uma interrupção momentânea devido a um curto-circuito, sendo precedida por um afundamento. Observa-se que a tensão cai para um valor de 20%, com duração de 3 ciclos e, logo após, ocorre a perda total do suprimento por um período de 1,8 s até a atuação do religador.

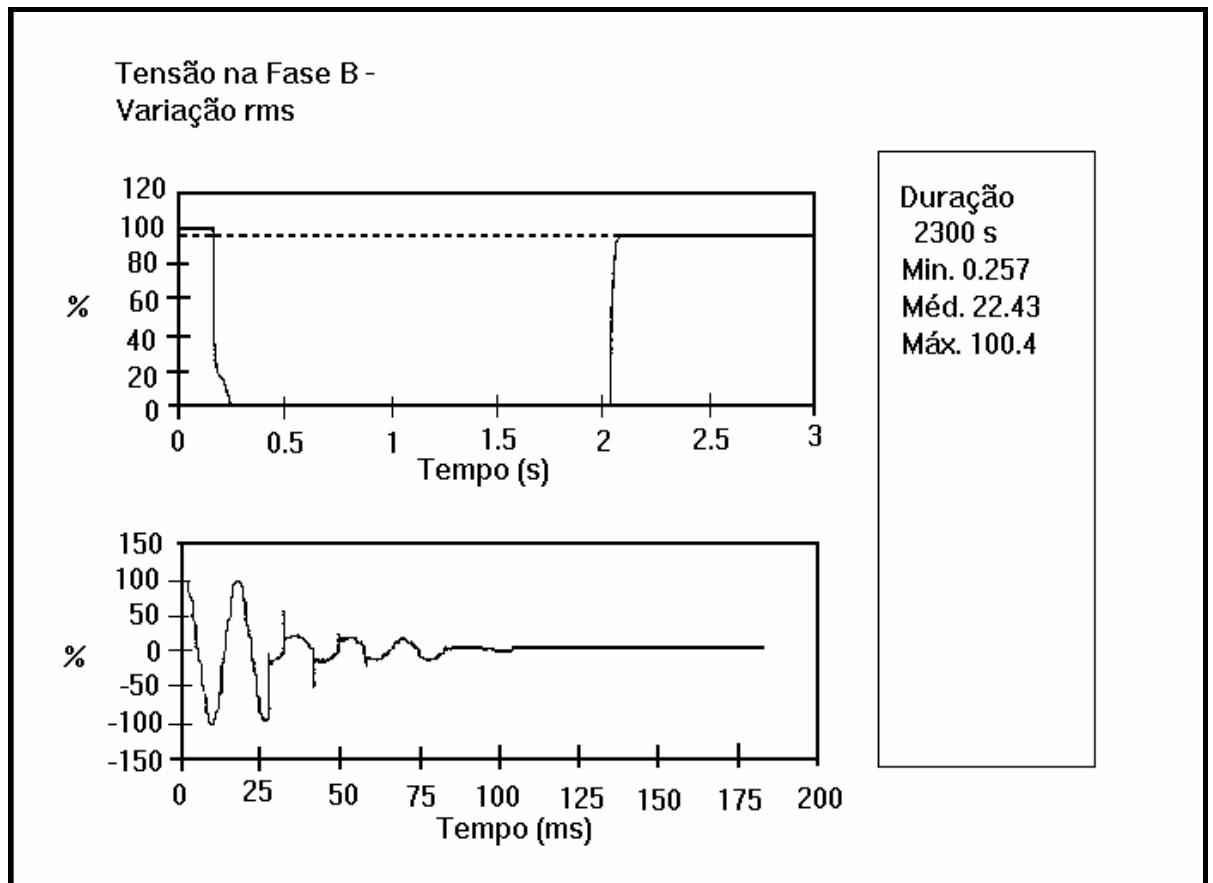


Figura 12 - Interrupção momentânea devido a um curto-circuito e subsequente religamento

Seja, por exemplo, o caso de um curto-circuito no sistema supridor da concessionária. Logo que o dispositivo de proteção detecta a corrente de curto-circuito, ele comanda a desenergização da linha com vistas a eliminar a corrente de falta. Somente após um curto intervalo de tempo, o religamento automático do disjuntor ou religador é efetuado. Entretanto, pode ocorrer que, após o religamento, o curto persista e uma seqüência de religamentos pode ser efetuada com o intuito de

eliminar a falta. A Figura 13 ilustra uma seqüência de religamentos com valores típicos de ajustes do atraso.

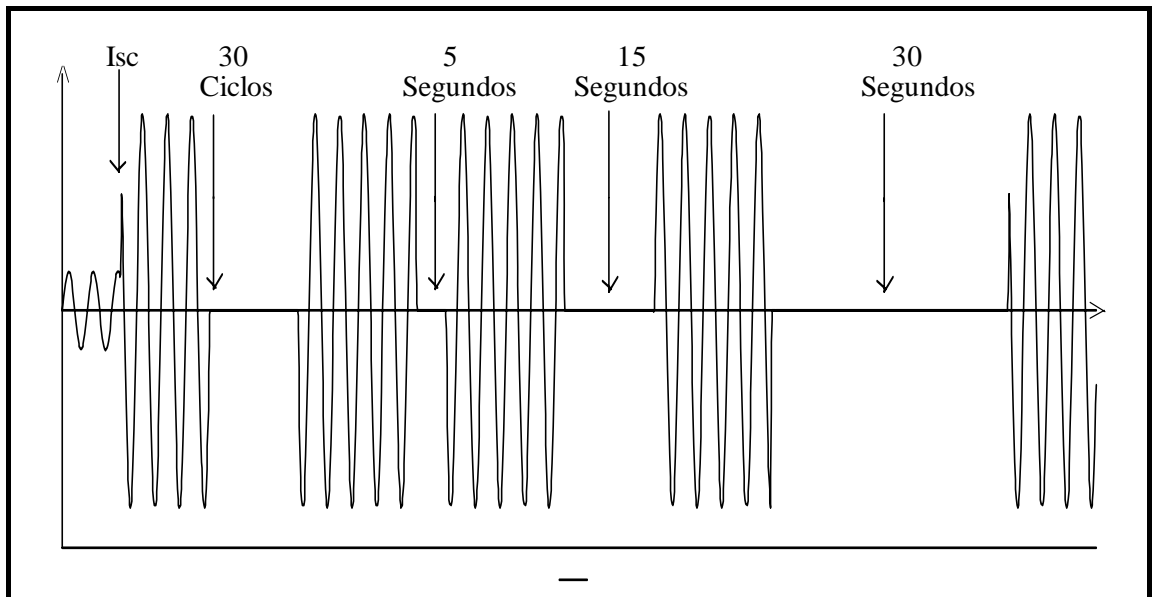


Figura 13 - Seqüência de manobras efetuadas por dispositivos automáticos de proteção

Sendo a falta de caráter temporário, o equipamento de proteção não completará a seqüência de operações programadas e o fornecimento de energia não é interrompido. Assim, grande parte dos consumidores, principalmente em áreas residenciais, não sentirão os efeitos da interrupção. Porém, algumas cargas mais sensíveis do tipo computadores e outras cargas eletrônicas estarão sujeitas a tais efeitos, a menos que a instalação seja dotada de unidades UPS (*Uninterruptible Power Supply*), as quais evitarão maiores conseqüências na operação destes equipamentos, na eventualidade de uma interrupção de curta duração.

Alguns dados estatísticos revelam que 75% das faltas em redes aéreas são de natureza temporária. No passado, este percentual não era considerado preocupante. Entretanto, com o crescente emprego de cargas eletrônicas, como inversores, computadores, videocassetes, etc., este número passou a ser relevante nos estudos de otimização do sistema, pois é, agora, tido como responsável pela saída de operação de diversos equipamentos, interrompendo o processo produtivo e causando enormes prejuízos às indústrias.

Atentos a este problema, algumas concessionárias têm mudado a filosofia de proteção com o objetivo de diminuir o número de consumidores afetados pelas interrupções. Na filosofia de proteção coordenada, o dispositivo de proteção do alimentador principal, seja o religador ou o disjuntor, sempre opera uma ou duas vezes antes da operação do dispositivo à jusante, geralmente, um fusível. Como pode ser observado na Figura 14, nesta filosofia, todos os consumidores do alimentador sentiriam as curtas interrupções, fazendo aumentar o índice de frequência de interrupção por consumidor (FEC), o qual é monitorado pelas concessionárias.

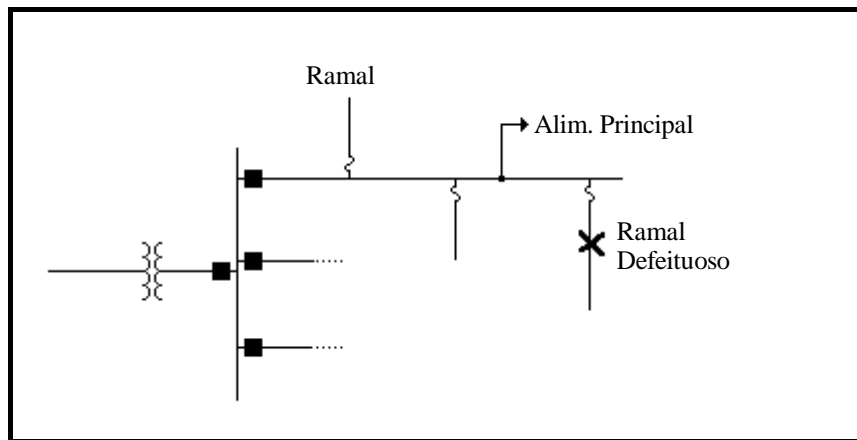


Figura 14 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição, nova filosofia de proteção

4.2 Afundamento de tensão

Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar um decréscimo temporário de 10-90% no valor eficaz da tensão do sistema (0,1 e 0,9 p.u., na frequência fundamental), podendo permanecer por um período de meio ciclo até 1 min. (Tabela 2). Afundamentos de tensão são usualmente associados às faltas no sistema (curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição), mas podem também ser causados pela energização de grandes cargas ou a partida de grandes motores e pela corrente de magnetização de um transformador. Segundo a literatura consultada (HUANG *et al.*, 1998), quando a tensão do sistema cai de 30% ou mais, o estado deste é considerado crítico.

Dependendo da sua duração estes eventos podem estar associados a três categorias, sendo estas: instantâneas, momentâneas e temporárias, as quais coincidem com as três categorias das interrupções e elevações já comentadas. Estes tempos de permanência sobre o sistema correspondem aos tempos de operação típicos dos dispositivos de proteção das concessionárias, tão bem como às divisões recomendadas pelas organizações técnicas internacionais.

A Figura 15 ilustra um afundamento de curta duração típica, causada por uma falta fase-terra. Observa-se um decréscimo de 80% na tensão por um período de aproximadamente 3 ciclos, até que o equipamento de proteção da subestação opere e elimine a corrente de falta. Neste caso, de acordo com a Tabela 2, a subtensão é de caráter instantâneo. Entretanto, as características e o número de subtensões diante de uma determinada falta dependem de vários fatores como: a natureza da falta, sua posição relativa a outros consumidores ligados na rede e o tipo de filosofia de proteção adotada no sistema.

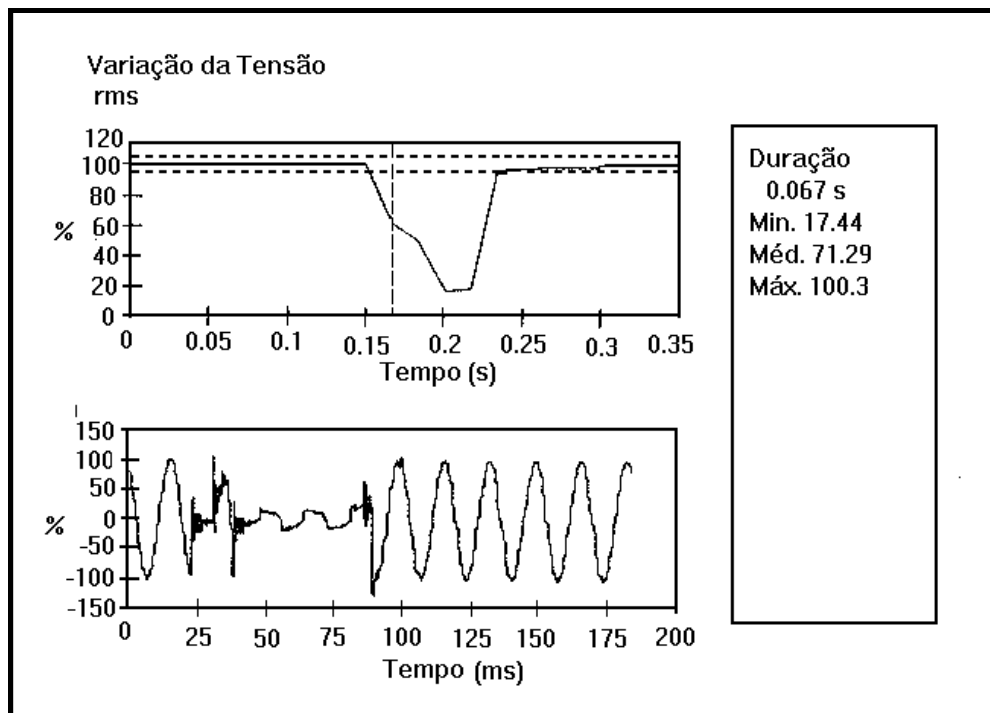


Figura 15 – Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra

Nesta situação, observa-se a concessionária afetando os consumidores.

Porém, pode ocorrer uma situação em que o curto-circuito se localize dentro de uma instalação industrial ou comercial e, desta forma, venha a causar subtensões em

consumidores localizados em outros pontos da rede. Ressalta-se que, neste caso, as quedas de tensão são de níveis menores devido à impedância do transformador de entrada que limita a corrente de curto-circuito. Acrescenta-se ainda que, em transformadores de conexão Δ -Y, a corrente de seqüência zero, oriunda de faltas assimétricas, é eliminada do circuito.

Para ilustrar a subtensão causada pela partida de um motor de indução e comparar com o caso anterior, tem-se a Figura 16. Como é de conhecimento, durante a partida de um motor de indução, este absorve uma corrente de 6 a 10 vezes a corrente nominal, resultando em uma queda significativa na tensão fornecida. Observa-se que, neste caso, a tensão cai rapidamente para 0,8 p.u. e, num período de aproximadamente 3 s, retorna ao seu valor nominal.

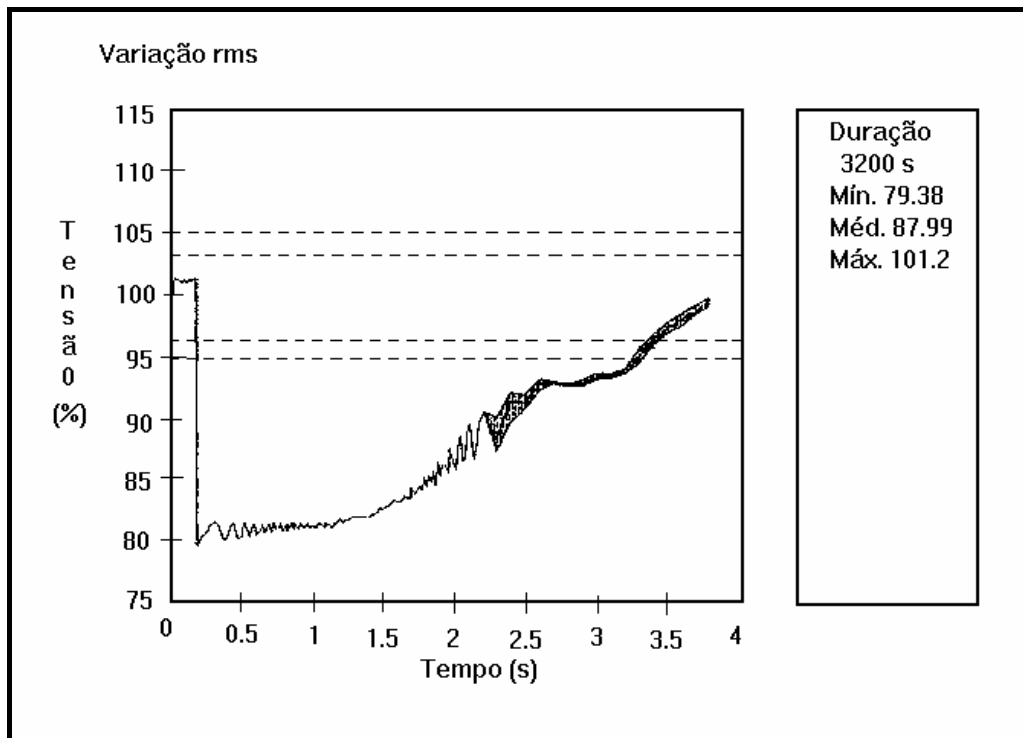


Figura 16 – Afundamento de tensão causado pela partida de um motor de indução

Como efeito destes distúrbios tem-se, principalmente, a má operação de equipamentos eletrônicos, em especial os computadores, que tem sido alvo de preocupações em órgãos de pesquisa em qualidade da energia. Entretanto, determinar os níveis de sensibilidade de tais equipamentos torna-se uma tarefa difícil, devido ao

grande número de medições necessárias para a coleta de dados, e ainda, as dificuldades de se ter equipamentos de medição em condições reais de campo.

Os níveis de sensibilidade apresentados a seguir foram determinados a partir de um estudo de casos realizado pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*), com exceção daqueles referentes a computadores, os quais foram estabelecidos pela ANSI (*American National Standards Institute*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) - (Projeto SIDAQEE):

a) Controladores de resfriamento

Estes apresentam uma sensibilidade muito grande aos afundamentos, quando estas atingem níveis em torno de 80% da nominal, desconsiderando o período de duração. Exemplos: torres de resfriamento e condensadores.

b) Testadores de “chips” eletrônicos

Estes são muito sensíveis às variações de tensão e, devido à complexidade envolvida, freqüentemente requerem 30 minutos ou mais para reiniciarem a linha de testes. Tais testadores, compostos de cargas eletrônicas tipo: impressoras, computadores, monitores, etc., normalmente saem de operação se a tensão excursionar abaixo de 85% da nominal.

c) Acionadores CC

São utilizados em grande escala em processos industriais, desta forma é importante que se mantenha uma qualidade no suprimento de energia destas cargas. A partir de resultados preliminares de monitorações, estes se mostram sensíveis quando a tensão é reduzida para próximo de 88% da nominal, ou seja, apresentam um alto nível de sensibilidade.

d) PLCs

Controladores Lógicos Programáveis robustos, pertencendo, portanto, a uma geração mais antiga, admitem zero de tensão por até 15 ciclos. Porém, os mais modernos, dotados de uma eletrônica mais sofisticada, começam a apresentar problemas na faixa de 50-60% da tensão nominal.

e) Robôs

Robôs geralmente requerem uma tensão estritamente constante, para garantir uma operação apropriada e segura. Portanto, estes tipos de máquinas são freqüentemente ajustadas para saírem de operação, ou

desconectadas do sistema de distribuição, quando a tensão atinge níveis de 90% da nominal.

f) Computadores

Conforme mencionado anteriormente, os computadores configuram-se a principal fonte de preocupação no que se refere aos afundamentos, uma vez que os dados armazenados na memória podem ser totalmente perdidos em condições de subtensões indesejáveis. Assim, foi estabelecido pela ANSI/IEEE, limites de tolerância para computadores relativos a distúrbios no sistema elétrico. Estes trabalhos conduziram à Figura 17, onde os níveis de tensão abaixo da nominal representam os limites, dentro dos quais, um computador típico pode resistir a distúrbios de afundamentos sem apresentar falhas. Nota-se que a suportabilidade de um computador é grandemente dependente do período de duração do distúrbio.

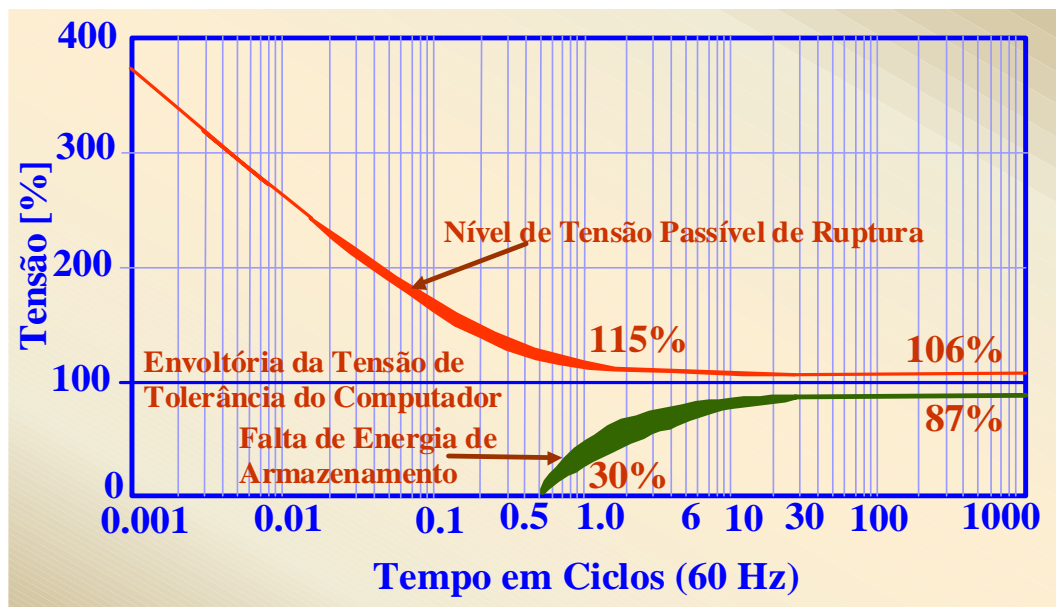


Figura 17 - Tolerâncias típicas de tensão para computadores (curva CBEMA – *Computer Business Equipment Manufacturers Association*)

g) Videocassetes, forno de microondas e relógios digitais

Estas cargas são essencialmente domésticas e, de certa forma, apresentam-se pouco sensíveis às variações de tensão, o que pode ser verificado através da Figura 18.

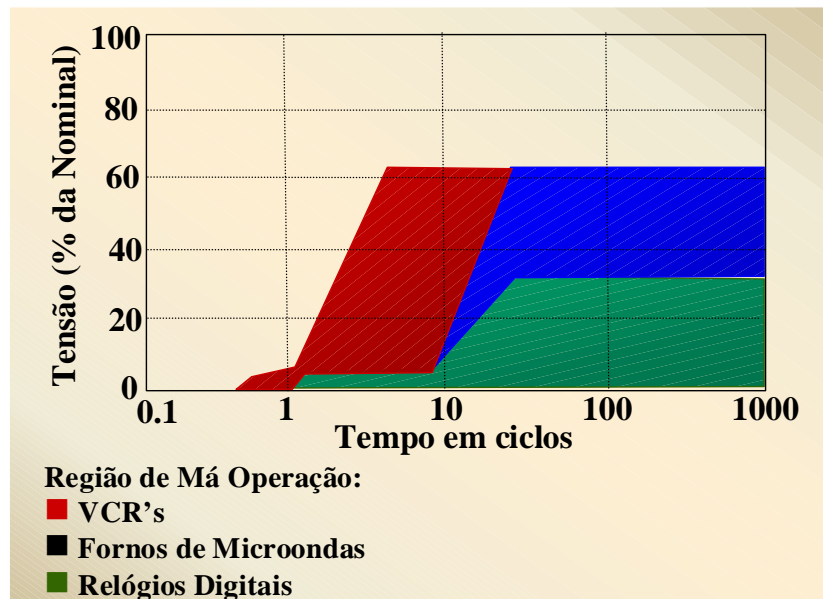


Figura 18 - Limiares de tensão para operação segura de vídeos, microondas e relógios digitais.

Diante de tais problemas, as variações de tensão constituem-se num importante item de qualidade, merecendo atenção por parte das concessionárias, fabricantes de equipamentos e consumidores, além de pesquisadores da área de qualidade da energia elétrica.

Existem várias medidas que podem ser tomadas no sentido de diminuir o número e a severidade das subtensões de curta duração. Algumas destas são:

a) Utilização de transformadores ferro-ressonante, conhecidos também como CVTs (“Constant Voltage Transformers”)

Este equipamento pode contornar a maioria das condições de afundamentos. São utilizados especialmente para cargas com potências constantes e de pequenos valores. Transformadores ferroressonantes são basicamente transformadores de relação de transformação 1:1, altamente excitados em suas curvas de saturação, fornecendo assim uma tensão de saída que não é significativamente afetada pelas variações da tensão de entrada. A Figura 19 ilustra um circuito típico de transformadores ferroressonantes.

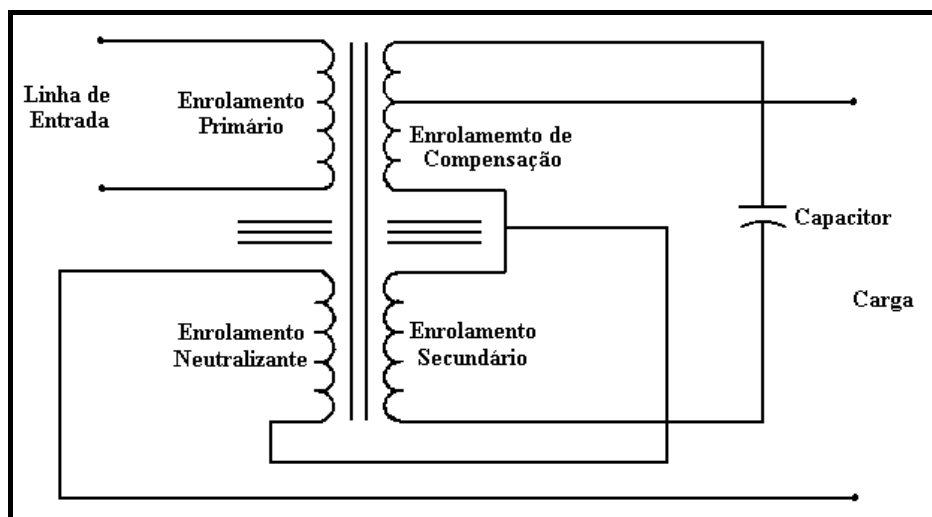


Figura 19 - Transformador ferroressonante

A Figura 20 mostra o melhoramento obtido em um controlador de processos aumentando a sua capacidade de suportar afundamentos. O controlador de processos pode suportar um afundamento abaixo de 30% da nominal dispondo de um transformador ferroressonante de 120VA. Sem o seu uso, este percentual fica em torno de 82%.

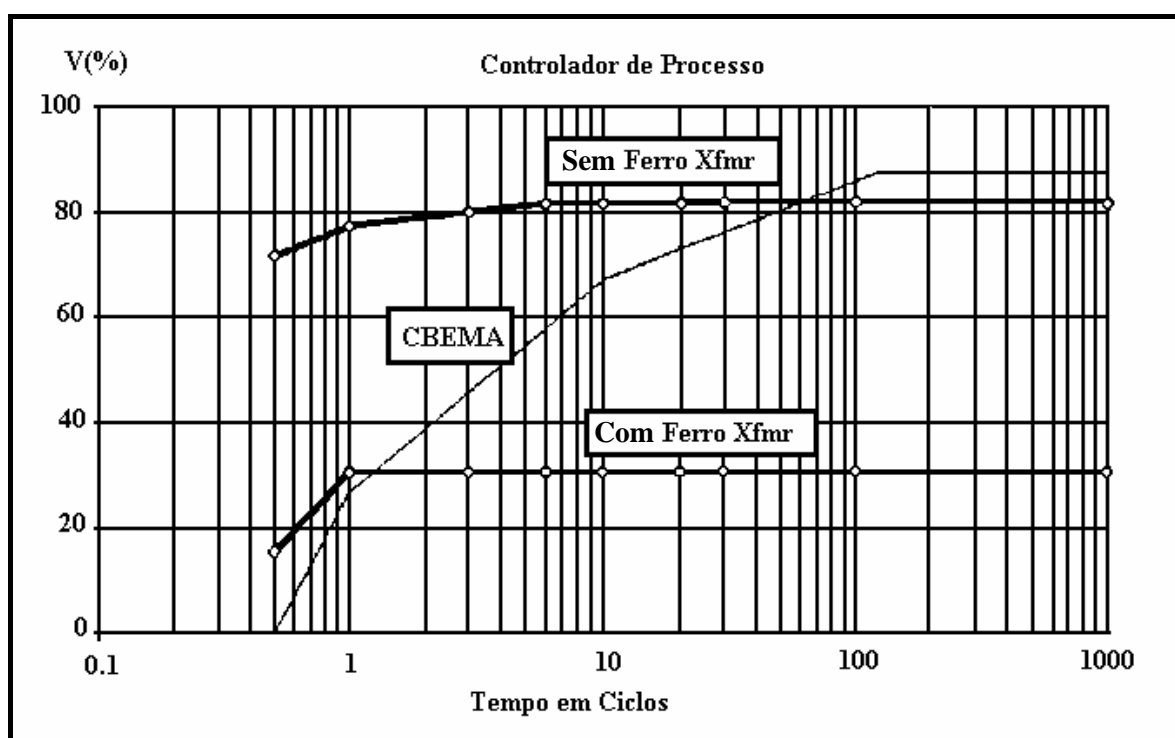


Figura 20 - Melhoramento contra afundamentos através de um transformador ferroressonante.

b) Utilização de UPSs

Os tipos básicos de UPSs (Uninterruptible Power Supply) fundamentam-se nas operações *on-line* e *standby*. A UPS híbrida, que corresponde a uma variação da UPS *standby*, também pode ser usada para interrupções de longa duração.

A Figura 21 mostra uma configuração típica de uma UPS *on-line*. Nesta topologia, onde a carga é sempre alimentada através da UPS, a tensão CA de entrada é convertida em tensão CC, a qual carrega um banco de baterias, sendo esta então, invertida novamente para tensão CA. Ocorrendo uma falha no sistema CA de entrada, o inversor é alimentado pelas baterias e continua suprindo a carga.

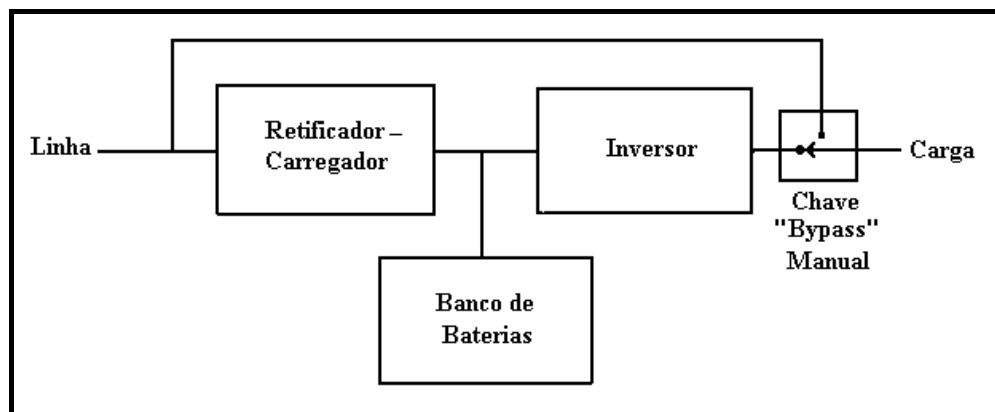


Figura 21 - UPS *on-line*

Uma unidade UPS *standby*, mostrada na Figura 22, é às vezes chamada de UPS *off-line*, visto que o suprimento normal de energia é usado para energizar o equipamento até que um distúrbio seja detectado. Uma chave transfere a carga para o conjunto bateria-inversor.

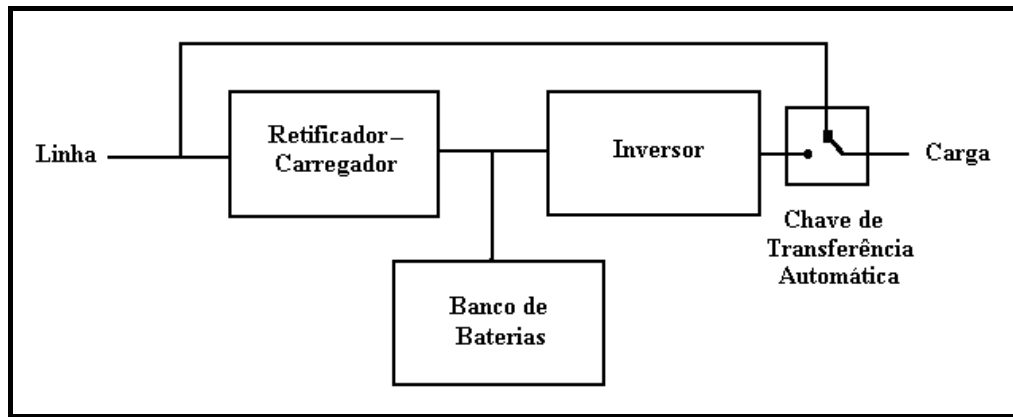


Figura 22 - UPS *Standby*

Similarmente à topologia *standby*, a unidade UPS híbrida utiliza um regulador de tensão na saída para prover a regulação e manter momentaneamente o suprimento, quando da transferência de fonte convencional para a fonte UPS. Este arranjo é mostrado na Figura 23.

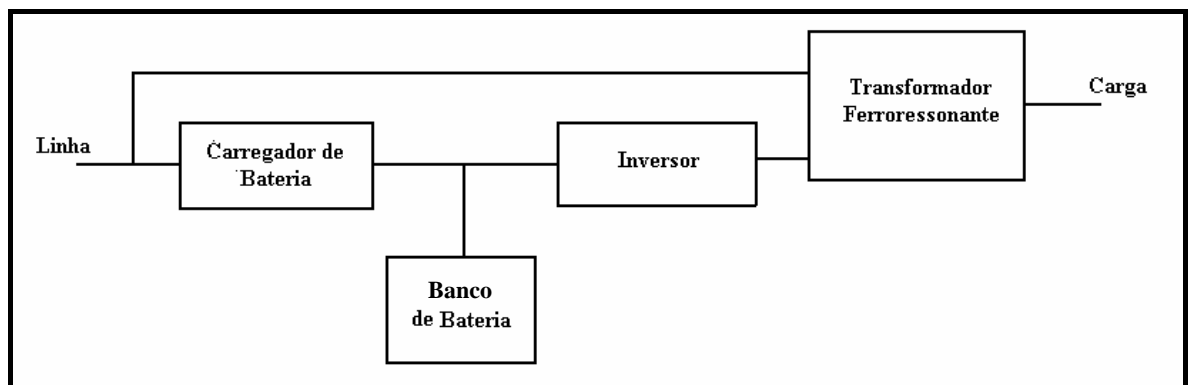


Figura 23 - UPS Híbrida.

c) Utilização de um dispositivo magnético supercondutor de armazenamento de energia

Este dispositivo utiliza um magneto supercondutor para armazenar energia da mesma forma que uma UPS utiliza baterias. Os projetos na faixa de 1 a 5 MJ são chamados de micro-SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*). A principal vantagem deles é a grande redução do espaço físico necessário ao magneto, se esta solução é comparada ao espaço para as

baterias. Os projetos iniciais dos micro-SMES estão sendo testados em vários locais nos EUA com resultados favoráveis. A Figura 24 mostra um diagrama *on-line* deste dispositivo.

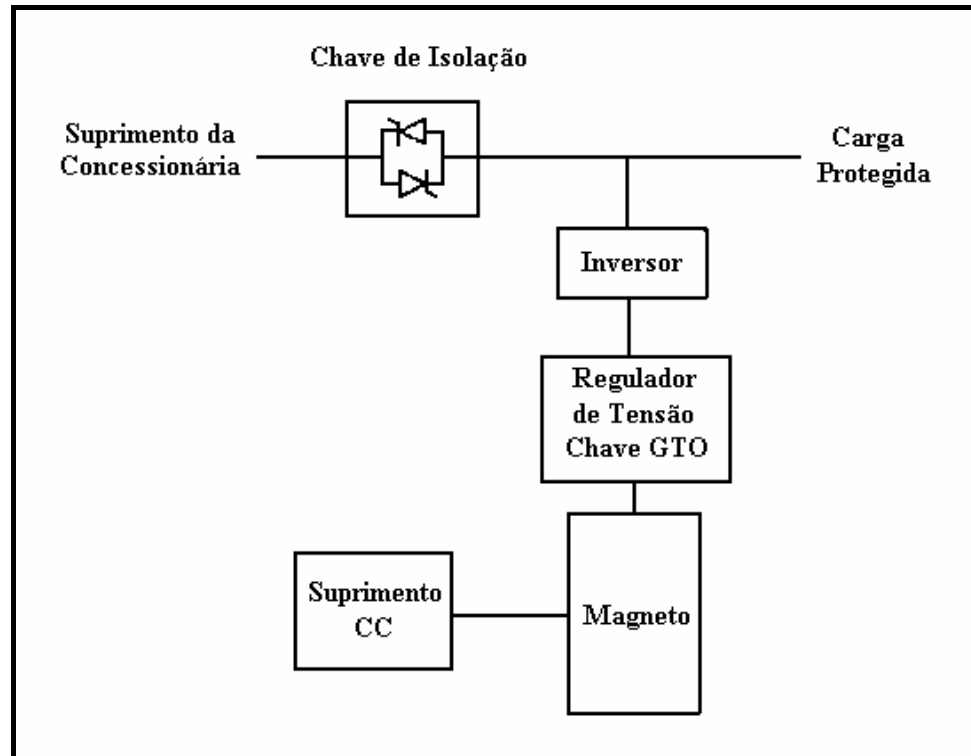


Figura 24 - Diagrama *on-line* de um dispositivo supercondutor de armazenamento de energia

d) Utilização de métodos de partida de motores

Dentre os mais utilizados pode-se citar os seguintes métodos de partida:

- Partida suave (*Soft Started*);
- Partida por meio de autotransformadores;
- Partida por meio de resistência e reatância;
- Partida por meio de enrolamento parcial e
- Partida pelo método estrela-triângulo.

e) Melhorar as práticas para o restabelecimento do sistema da concessionária em caso de faltas

Isto implica em adicionar religadores de linha, eliminar as operações rápidas de religadores e/ou disjuntores, adicionar sistemas do tipo *Network* e melhorar o projeto do alimentador. Estas práticas podem reduzir o número e/ou a duração de interrupções momentâneas e afundamentos, mas as faltas nos sistemas das concessionárias nunca podem ser eliminadas completamente.

f) Adotar medidas de prevenção contra faltas no sistema da concessionária

Estas medidas incluem atividades como poda de árvores, colocar pára-raios de linha, manutenção dos isoladores, blindagem de cabos, modificar o espaçamento entre condutores e melhorar o sistema de aterramento.

4.3 Elevação de tensão

Outro distúrbio pode ser caracterizado por um aumento da tensão eficaz do sistema (aumento este entre 10-80% da tensão, na frequência da rede, com duração de meio ciclo a 1 min, Tabela 2) ocorrendo frequentemente nas fases sãs de um circuito trifásico, quando da ocorrência de um curto circuito em uma única fase. O termo **sobretensão momentânea** é empregado por vários autores como sinônimo para o termo “elevação de tensão”.

Como para o item anterior, elevações são usualmente associadas às condições de faltas no sistema, mas não são tão comuns como afundamentos de tensão. Um meio ilustrativo de como uma elevação pode ocorrer é do aumento temporário da tensão em fases não faltosas durante uma falta envolvendo uma fase com conexão a terra. A Figura 25 ilustra uma elevação de tensão causada por uma falta fase-terra. Este fenômeno pode também estar associado à saída de grandes blocos de cargas ou a energização de grandes bancos de capacitores, porém, com uma incidência pequena se comparada com as sobretensões provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição.

As elevações são caracterizadas pela sua magnitude (valor eficaz) e duração. A severidade deste distúrbio durante uma condição de falta é uma função da

localização da falta, impedância do sistema e do aterramento. Em um sistema não aterrado com impedância de seqüência zero infinita, as tensões fase a terra das fases não aterradas serão 1,73 por unidade durante uma condição de falta envolvendo uma fase com conexão a terra. Próxima a subestação em um sistema aterrado, haverá um pequeno ou nenhum aumento nas fases não faltosas porque o transformador da subestação é usualmente conectado em delta-estrela, provendo um baixo caminho de impedância de seqüência zero para a corrente de falta.

A duração da elevação está intimamente ligada aos ajustes dos dispositivos de proteção, à natureza da falta (permanente ou temporária) e à sua localização na rede elétrica. Em situações de elevações oriundas de saídas de grandes cargas ou energização de grandes bancos de capacitores, o tempo de duração das elevações depende do tempo de resposta dos dispositivos reguladores de tensão das unidades geradoras. Tem-se ainda o tempo de resposta dos transformadores de *tap* variável e da atuação dos dispositivos compensadores de reativos e síncronos em sistemas de potência e compensadores síncronos que porventura existam.

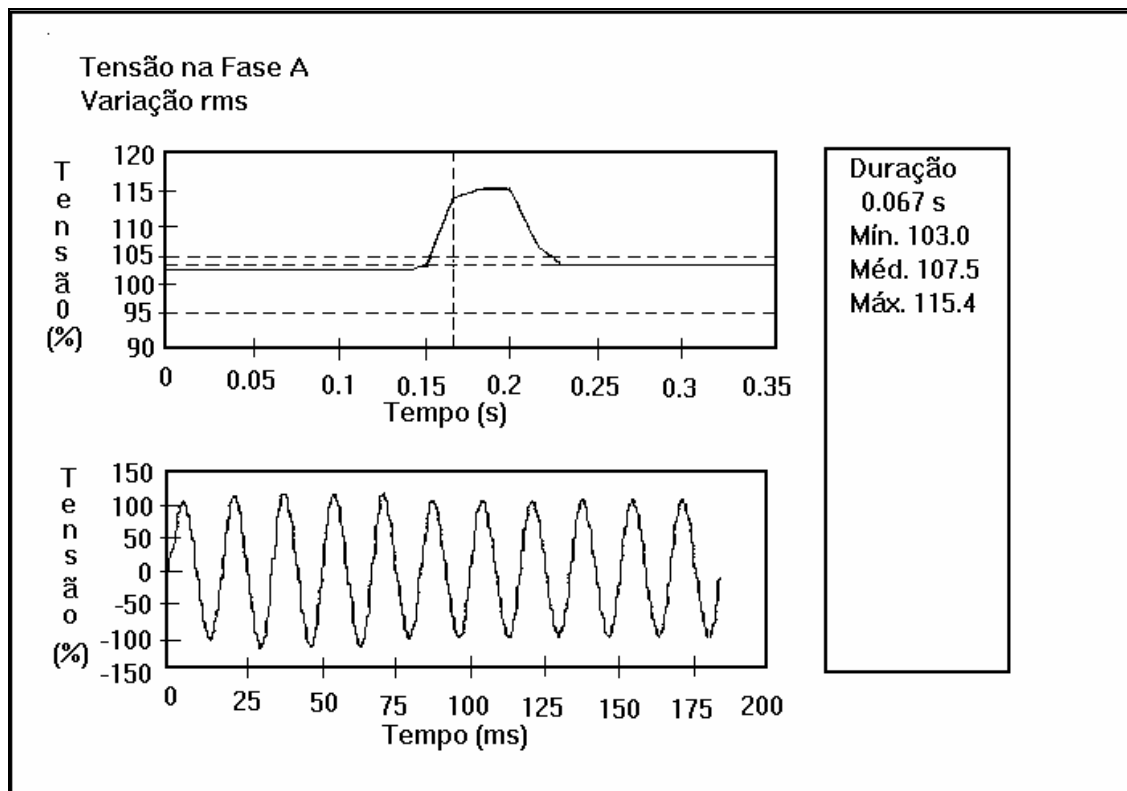


Figura 25 - Elevação de tensão devido a uma falta fase-terra

Como conseqüência das elevações de curta duração em equipamentos, pode-se citar falhas dos componentes, dependendo da freqüência de ocorrência do distúrbio. Dispositivos eletrônicos incluindo ASDs (*Adjustable Speed Drivers*), computadores e controladores eletrônicos, podem apresentar falhas imediatas durante estas condições. Contudo, transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, TPs, TCs e máquinas rotativas podem ter a vida útil reduzida. Um aumento de curta duração na tensão em alguns relés pode resultar em má operação enquanto outros podem não ser afetados. Uma elevação de tensão em um banco de capacitores pode, freqüentemente, causar danos no equipamento. Aparelhos de iluminação podem ter um aumento da luminosidade durante uma elevação. Dispositivos de proteção contra surto como um circuito de fixação da amplitude (*clamping circuit*) podem ser destruídos quando submetidos a elevações que excedam suas taxas de MCOV (*Maximum Continuous Operating Voltage*).

Dentro do exposto, a preocupação principal recai sobre os equipamentos eletrônicos, uma vez que estas elevações podem vir a danificar os componentes internos destes equipamentos, conduzindo-os à má operação, ou em casos extremos, à completa inutilização. Vale ressaltar mais uma vez que, a suportabilidade de um equipamento não depende apenas da magnitude da elevação, mas também do seu período de duração, conforme ilustra a Figura 17, a qual mostra a tolerância de microcomputadores às variações de tensão.

DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Desequilíbrio de tensão é muitas vezes definido como o desvio máximo dos valores médios das tensões ou correntes trifásicas, dividido pela média dos mesmos valores, expresso em percentagem. O desequilíbrio também pode ser definido usando-se a teoria de componentes simétricos. A razão entre os componentes ou de seqüência negativo ou zero, com o componente de seqüência positivo pode ser usado para especificar a percentagem do desequilíbrio.

As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas podem também ser o resultado da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

Tais fatores fazem com que a qualidade no fornecimento de energia, idealizada pela concessionária, seja prejudicada e desta forma alguns consumidores têm em suas alimentações um desequilíbrio de tensão, o qual se manifesta sob três formas distintas:

- a) amplitudes diferentes;
- b) assimetria nas fases; e
- c) assimetria conjunta de amplitudes e fases.

Destas, apenas a primeira é freqüentemente evidenciada no sistema elétrico.

A instalação elétrica de um consumidor, sujeito a desequilíbrios de tensão, pode apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais destacam-se:

a) Motores de Indução: Para as análises dos efeitos de tensões desequilibradas aplicadas a um motor de indução, considera-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de seqüência negativa, somados aos resultados da tensão de seqüência positiva. Os efeitos das tensões e correntes de seqüência zero não são

comumente considerados, visto que a maioria dos motores não possui caminho para a circulação destas correntes, seja pela conexão estrela isolada ou em delta destes motores.

Sabe-se que, quando tensões de seqüência negativa são aplicadas ao estator do motor, surge um correspondente campo magnético que gira no sentido contrário ao campo da seqüência positiva, ou seja, contrário ao sentido de rotação do rotor. Assim, tem-se estabelecido uma indesejável interação entre os dois campos, o que resulta num conjugado pulsante no eixo da máquina.

A Figura 26 ilustra a curva do conjugado desenvolvido por um motor de indução (20cv, 220V, Y), bem como a curva de conjugado de carga, quando alimentado por tensões desequilibradas.

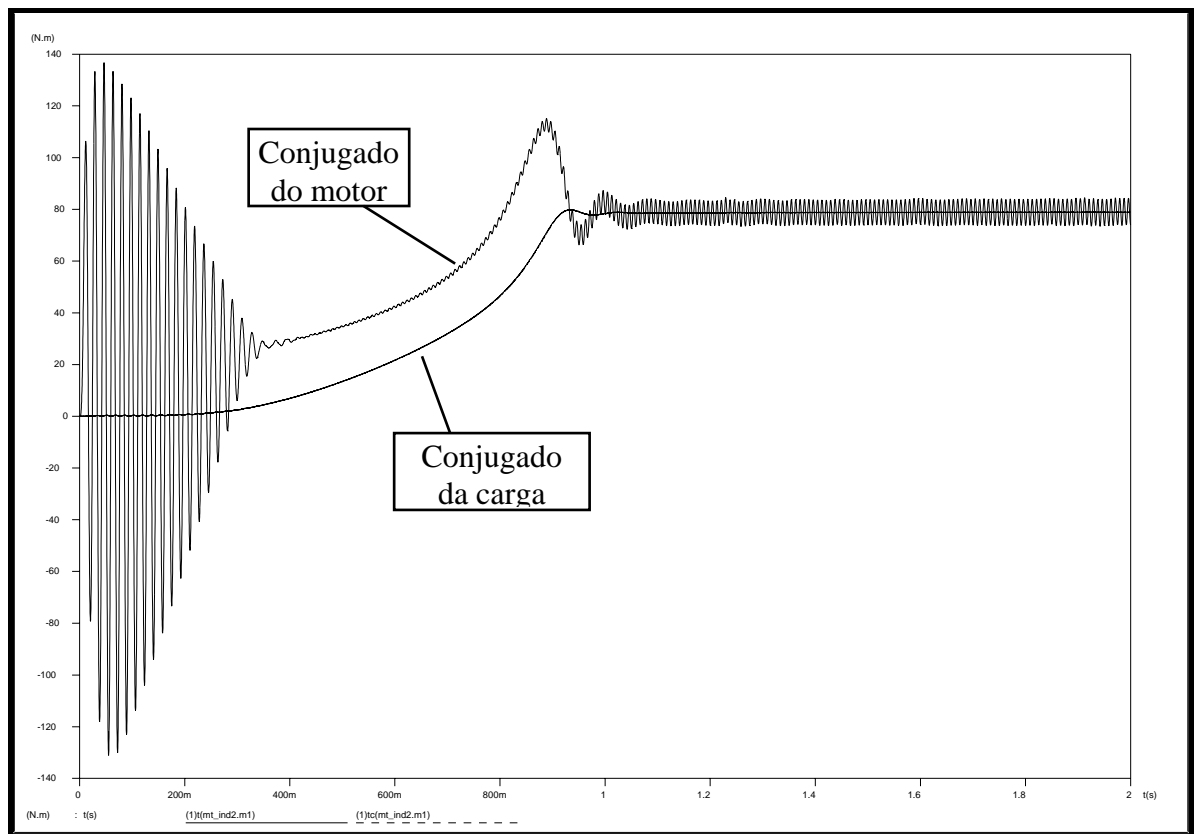


Figura 26 - Resposta do motor à alimentação desequilibrada

Ao mesmo tempo, as correntes de seqüência negativa causam um aquecimento da máquina. Isto pode ser evidenciado através da Figura 27, a qual

apresenta elevações de temperatura típicas para motores de indução quando estes são submetidos a tensões desequilibradas. Como consequência direta desta elevação de temperatura, tem-se a redução da expectativa de vida útil dos motores, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos.

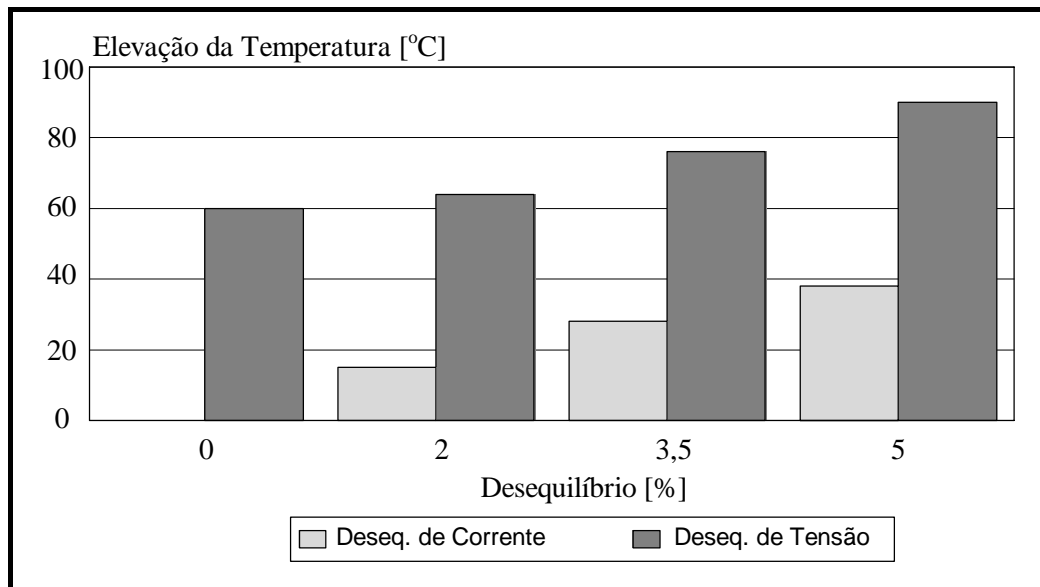


Figura 27 - Elevação de temperatura de um motor de indução trifásico para diferentes níveis de desequilíbrio

b) Máquinas síncronas: Como no caso anterior, a corrente de seqüência negativa fluindo através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela seqüência positiva. Conseqüentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma freqüência igual a duas vezes à da rede. Tais correntes aumentarão significativamente as perdas no rotor, principalmente no enrolamento de amortecimento, que possui baixa impedância onde, conseqüentemente, a corrente será mais elevada.

No enrolamento de campo, estas correntes com freqüência duplicada distorcerão o campo magnético produzido pela corrente de excitação que, por sua

vez, deformará a forma de onda da tensão gerada, interferindo, portanto, na atuação do regulador de tensão.

c) Retificadores: Uma ponte retificadora CA/CC, controlada ou não, injeta na rede CA, quando esta opera sob condições nominais, correntes harmônicas características (de ordem 5, 7, 11, 13, etc). Entretanto, quando o sistema supridor encontra-se desequilibrado, os retificadores passam a gerar, além das correntes harmônicas características, o terceiro harmônico e seus múltiplos.

A presença do terceiro harmônico e seus múltiplos no sistema elétrico é extremamente indesejável, pois possibilita manifestação de ressonâncias não previstas, visto que não é prática a instalação de filtros de terceiro harmônico em instalações desta natureza e, isto pode causar danos a uma série de equipamentos.

A Figura 28 mostra o espectro harmônico de um conversor de 6 pulsos a diodo, alimentado por tensões equilibradas e desequilibradas respectivamente.

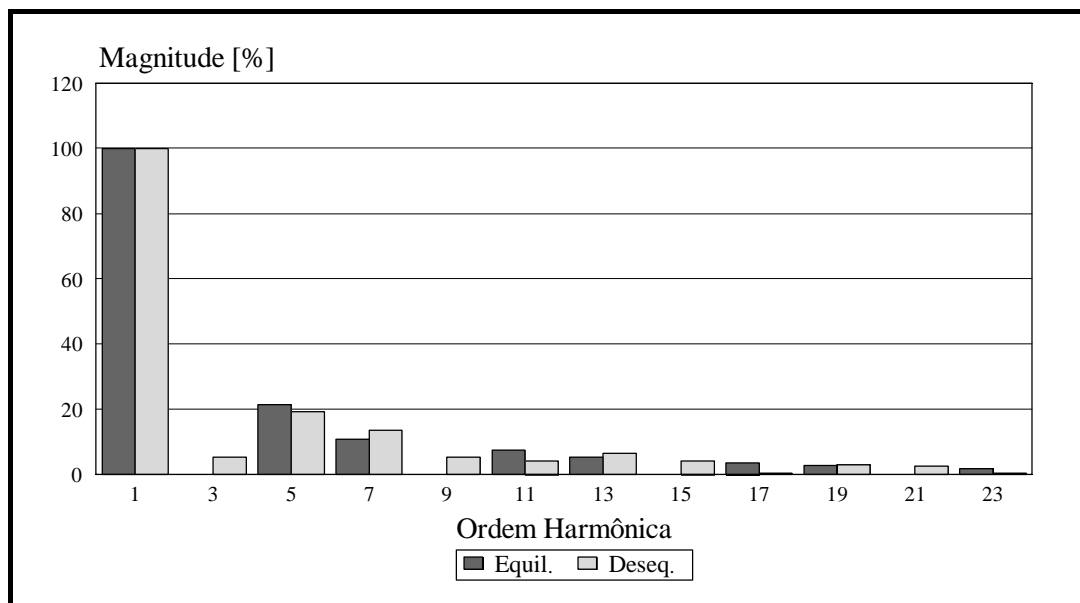


Figura 28 - Retificador alimentado por tensões equilibradas e desequilibradas, espectro harmônico.

DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA

Distorção da forma de onda é definido como um desvio da forma de onda puramente senoidal na frequência fundamental, que é caracterizado principalmente pelo seu conteúdo espectral.

Há cinco tipos principais de distorções da forma de onda - Tabela 2:

- a) nível CC;
- b) harmônicos;
- c) inter-harmônicas;
- d) *notching* e
- e) ruído.

6.1 Nível CC

A presença de um componente CC na tensão ou corrente em um sistema de energia CA é denominado nível CC. Este pode ocorrer como resultado de um distúrbio ou devido à operação ideal de retificadores de meia-onda.

O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil. Pode também causar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

6.2 Harmônico

Tecnicamente, um harmônico é um componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso da energia elétrica, de 60 Hz).

Harmônicos são fenômenos contínuos, e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, os quais duram apenas alguns ciclos. Distorção harmônica é um tipo específico de energia suja, que é normalmente associada com a crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais. Estas perturbações no sistema podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha (supressores de

transitórios). Um filtro de harmônicos é essencialmente um capacitor para correção do fator de potência, combinado em série com um reator (indutor).

A Figura 29 mostra a tensão num barramento CA de alimentação de um conversor de seis pulsos, na qual evidencia-se as deformações na forma de onda. A distorção harmônica vem contra os objetivos da qualidade do suprimento promovido por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor, prejudicam não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

A natureza e a magnitude das distorções harmônicas geradas por cargas não-lineares dependem de cada carga em específico, mas duas generalizações podem ser assumidas:

- a) os harmônicos que causam problemas geralmente são os componentes de números ímpares e
- b) a magnitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência.

Como comentado, altos níveis de distorções harmônicas em uma instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias, para a própria instalação e para os equipamentos ali instalados. As consequências podem chegar até à parada total de importantes equipamentos na linha de produção acarretando em prejuízos econômicos. Dentre eles, de maior importância estão a perda de produtividade e de vendas devido a paradas de produção, causadas por inesperadas falhas em motores, acionamentos, fontes ou simplesmente pelo "repicar" de disjuntores.

Para a quantificação do grau de distorção presente na tensão e/ou corrente, lança-se mão da ferramenta matemática conhecida por série de Fourier. As vantagens de se usar a série de Fourier para representar formas de onda distorcidas é que, cada componente harmônica pode ser analisada separadamente e, a distorção final é determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

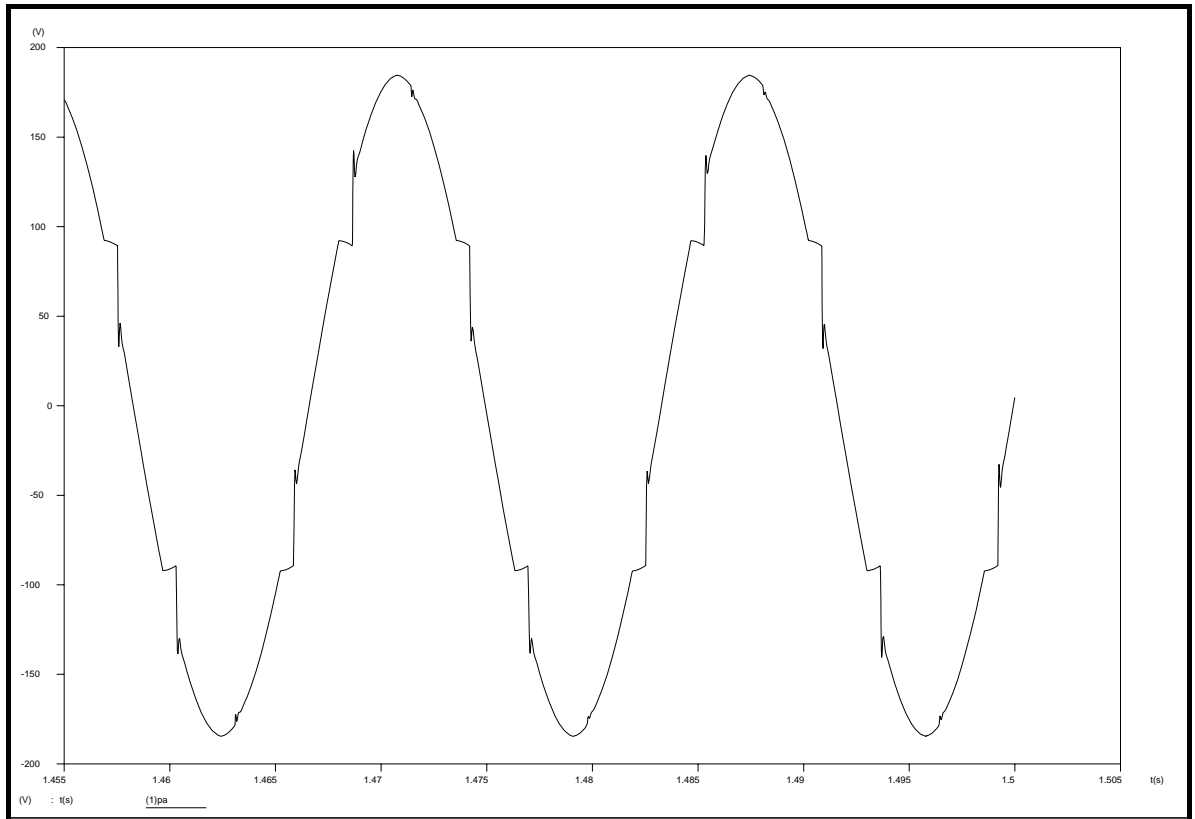


Figura 29 - Tensão de alimentação de um conversor CA/CC

Conhecidos os valores de tensões e/ou correntes harmônicas presentes no sistema, utiliza-se de um procedimento para expressar o conteúdo harmônico de uma forma de onda. Um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensão como para correntes. As equações (1) e (2) apresentam tais definições:

$$DHV_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{m\acute{a}x}} V_n^2}{V_1^2}} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$DHI_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{m\acute{a}x}} I_n^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (2)$$

onde:

DHV_T = distorção harmônica total de tensão

DHI_T = distorção harmônica total de corrente

V_n = valor eficaz da tensão de ordem n

I_n = valor eficaz da corrente de ordem n

V_1 = valor eficaz da tensão fundamental

I_1 = valor eficaz da corrente fundamental

n = ordem da componente harmônica

A “Distorção Harmônica Individual” é utilizada para a quantificação da distorção individual de tensão ou corrente, ou seja, para determinar a porcentagem de determinado componente harmônico em relação à sua componente fundamental. As equações (3) e (4) expressam tais definições.

$$DHV_I = \frac{V_n}{V_1} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} \times 100 (\%) \quad (4)$$

onde:

DHV_I - distorção harmônica individual de tensão.

DHI_I - distorção harmônica individual de corrente.

Para fins práticos, geralmente, os componentes harmônicos de ordens elevadas (acima da 50ª ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência. Apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, elas usualmente não representam perigo aos sistemas de potência.

No passado não havia maiores preocupações com harmônicos. Cargas com características não lineares eram pouco utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes aos efeitos provocados por harmônicas. Entretanto, nos últimos anos, com

o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência e a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico presente nos sistemas tem-se elevado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos ou dispositivos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica. O problema é ainda mais agravado pela utilização de equipamentos e cargas mais sensíveis à qualidade da energia.

Assim, é de grande importância citar aqui os vários tipos de cargas elétricas com características não lineares, denominadas de “Cargas Elétricas Especiais”, que têm sido implantadas em grande quantidade no sistema elétrico brasileiro. Estas, de um modo geral, podem ser classificadas em três grupos básicos, a saber:

a) Cargas de conexão direta ao sistema

- motores de corrente alternada;
- transformadores alimentadores;
- circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga (como as multi vapor metálico: mercúrio e sódio);
- fornos a arco, etc.

b) Cargas conectadas através de conversores

- motores de corrente contínua controlados por retificadores;
- motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
- motores síncronos controlados por cicloconversores (conversão estática direta CA/CA em uma dada frequência para outra frequência inferior);
- fornos de indução de alta frequência, etc.

c) Reguladores

- fornos de indução controlados por reatores saturados;
- cargas de aquecimento controladas por tiristores;
- velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- reguladores de tensão a núcleo saturado;
- computadores;

- eletrodomésticos com fontes chaveadas, etc.

Como já foi dito, as distorções harmônicas causadas pela operação de tais equipamentos e dispositivos, causam alguns efeitos indesejáveis ao sistema elétrico. Estes efeitos podem ser divididos em três grandes grupos. Nos dois primeiros estariam enquadrados, por exemplo, os problemas de perda da vida útil de transformadores, máquinas rotativas, bancos de capacitores, etc. No terceiro grupo estariam englobadas questões diversas que poderiam se traduzir numa operação errônea ou na falha completa de um equipamento. Nesta categoria estariam incluídos efeitos como: torques oscilatórios nos motores CA, erros nas respostas de equipamentos, aumento ou diminuição do consumo de kWh, etc.

Para ressaltar tais efeitos, descreve-se abaixo como as distorções harmônicas de tensão e corrente podem alterar a operação de alguns dispositivos comumente encontrados nas redes elétricas.

Cabos

Dentre os efeitos de harmônicos em cabos destacam-se:

- Sobreaquecimento devido às perdas Joule que são acrescidas;
- Maior solicitação do isolamento devido a possíveis picos de tensão e imposição de correntes pelas capacitâncias de fuga, provocando aquecimento e conseqüentemente uma deterioração do material isolante.

Outro aspecto importante que deve ser destacado refere-se ao carregamento exagerado do circuito de neutro, principalmente em instalações que agregam muitos aparelhos eletrônicos, como microcomputadores, onde há uma predominância muito grande do terceiro harmônico. Este se caracteriza por ser de seqüência zero, portanto, propaga-se pelo neutro podendo dar origem a tensões perigosas quando estas correntes circulam por malhas de terra mal projetadas.

Com relação ao nível de distorção de tensão, abaixo do qual os cabos não são expressivamente afetados, este é dado pela equação (5).

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 10\% \quad (5)$$

Transformadores

Um transformador, quando submetido a distorções de tensão e corrente, experimentará um sobreaquecimento causado pelo aumento das perdas Joulicas, além de intensificar as fugas tradicionalmente manifestadas nos isolamentos. As perdas Joulicas são dadas pela equação (6).

$$\Delta P_J = \Delta P_{J1} (1 + DHI_T^2) \quad (6)$$

onde:

ΔP_{J1} = representa as perdas à corrente fundamental

ΔP_J = representa as perdas incluindo a distorção harmônica

Este aumento das perdas faz com que a vida útil deste equipamento seja reduzida, uma vez que a degradação do material isolante no interior do transformador ocorrerá de forma mais acentuada.

Como ilustração, a Figura 30 mostra um perfil da vida útil de um transformador de corrente que se estabelece através de seus enrolamentos. Os resultados consideram que os componentes harmônicos, para cada situação, são superpostos a uma corrente fundamental igual a nominal do equipamento.

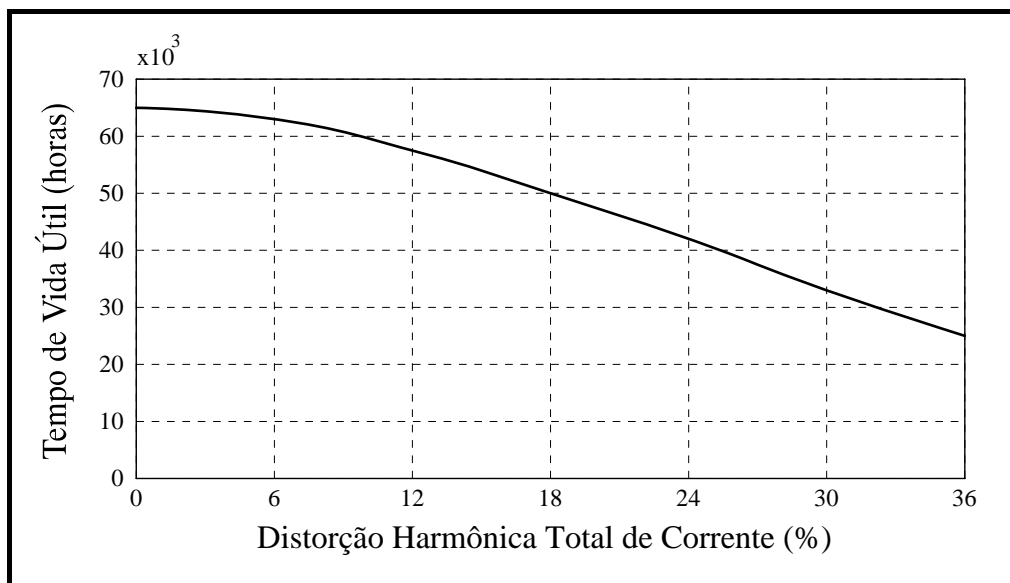


Figura 30 - Vida útil de um transformador em função da

distorção harmônica de corrente.

Segundo a literatura, os transformadores possuem um nível de tensão admissível dado pelas equações (7) e (8).

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 5\% \quad (\text{a plena carga}) \quad (7)$$

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 10\% \quad (\text{a vazio}) \quad (8)$$

Motores de Indução

Um motor de indução, operando sob alimentação distorcida, pode apresentar, de forma semelhante ao transformador, um sobreaquecimento de seus enrolamentos. Este sobreaquecimento faz com que ocorra uma degradação do material isolante que pode levar a uma condição de curto-circuito por falha do isolamento. A Figura 31 mostra uma estimativa do acréscimo das perdas elétricas num motor de indução, em função da distorção total de tensão presente no barramento supridor.

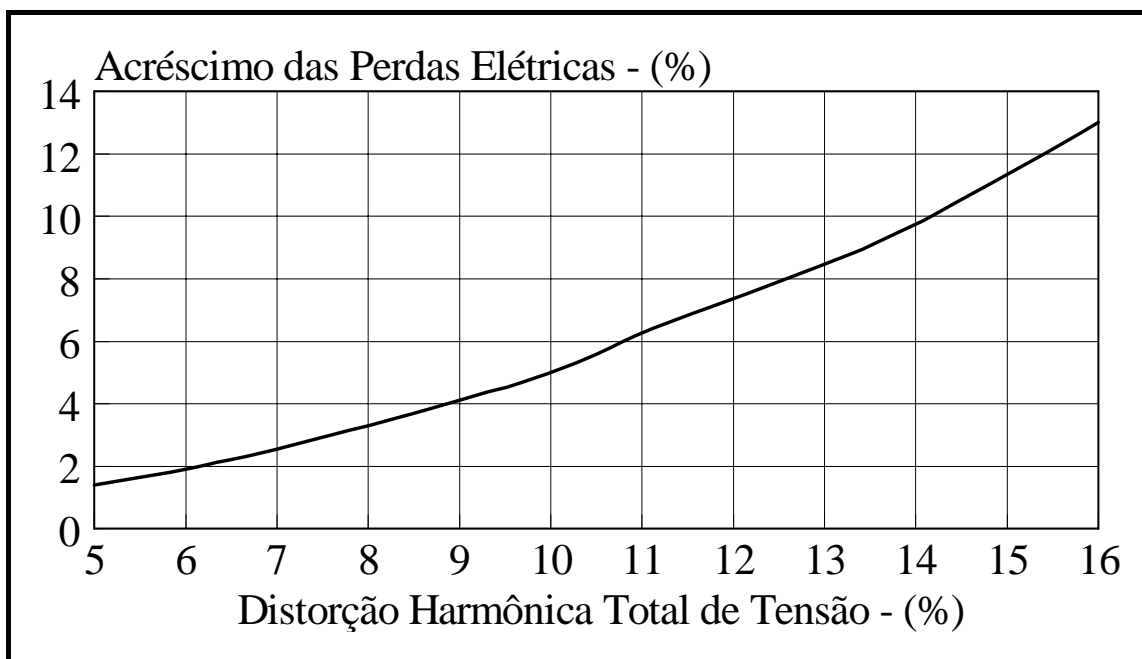


Figura 31 - Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total de tensão

Em relação à análise de desempenho de um motor de indução submetido a tensões harmônicas, verifica-se uma perda de rendimento e qualidade do serviço, devido ao surgimento de torques pulsantes. Estes podem causar uma fadiga do material, ou em casos extremos, para altos valores de torques oscilantes, interrupção do processo produtivo, principalmente em instalações que requerem torques constantes como é o caso de bobinadeiras na indústria de papel-celulose e condutores elétricos.

Com a utilização dos reguladores automáticos de velocidade, estes efeitos se pronunciam com maior intensidade, pois os níveis de distorção impostos pelos inversores superam os valores normalmente encontrados nas redes CA, muito embora, hoje, com novas técnicas de chaveamento, estes níveis têm sido reduzidos consideravelmente.

Os motores de indução, de acordo com o seu porte e impedância de sequência negativa, possuem um grau de imunidade aos harmônicos conforme sugere a equação (9).

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \leq 1,3\% \text{ a } 3,5\% \quad (9)$$

Máquinas Síncronas

Pelo fato de estarem localizados distantes dos centros consumidores, as unidades geradoras, responsáveis por grandes blocos de energia, não sofrem de forma acentuada as conseqüências dos harmônicos injetados no sistema. Entretanto, em sistemas industriais dotados de geração própria, que operam em paralelo com a concessionária, tem sido verificado uma série de anomalias no que se refere à operação das máquinas síncronas. Dentre estes efeitos destacam-se:

- Sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
- Torques pulsantes no eixo da máquina; e
- Indução de tensões harmônicas no circuito de campo, que comprometem a qualidade das tensões geradas.

Assim, é importante que uma monitoração da intensidade destas anomalias seja efetuada, com o propósito de assegurar operação contínua das máquinas síncronas, evitando transtornos como perda de geração. No caso de instalações que utilizam motores síncronos, as mesmas observações se aplicam.

De forma semelhante aos motores de indução, o grau de imunidade das máquinas síncronas aos efeitos de harmônicos é função do porte da máquina e da impedância de seqüência negativa. Esta condição pode ser assegurada quando obedecida à equação (10).

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \leq 1,3\% \text{ a } 2,4\% \quad (10)$$

Bancos de Capacitores

Relembramos que bancos de capacitores instalados em redes elétricas distorcidas podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo PAC (Ponto de Acoplamento Comum) ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação, o que estabelece uma condição extremamente prejudicial à operação de diversos equipamentos. Entretanto, mesmo que não seja caracterizado uma condição de ressonância, um capacitor constitui-se um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, estando, portanto, constantemente sobrecarregado, sujeito a sobreaquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação da proteção, sobretudo dos relés térmicos.

Estes efeitos, isolados ou conjuntamente, resultam na diminuição da vida útil do capacitor. Uma equação empírica (11) estima a vida útil de um capacitor.

$$VU = \left(\frac{1}{S \cdot T} \right)^{7,45} \quad (11)$$

onde:

VU - vida útil em p.u.;

S - valor de pico da sobretensão em p.u.;

T - sobretemperatura em p.u.

De posse da equação (11) é possível traçar o comportamento da vida útil de capacitores para vários valores de sobretensão e sobretemperatura. A Figura 32 ilustra a redução da vida útil dos capacitores em função da temperatura.

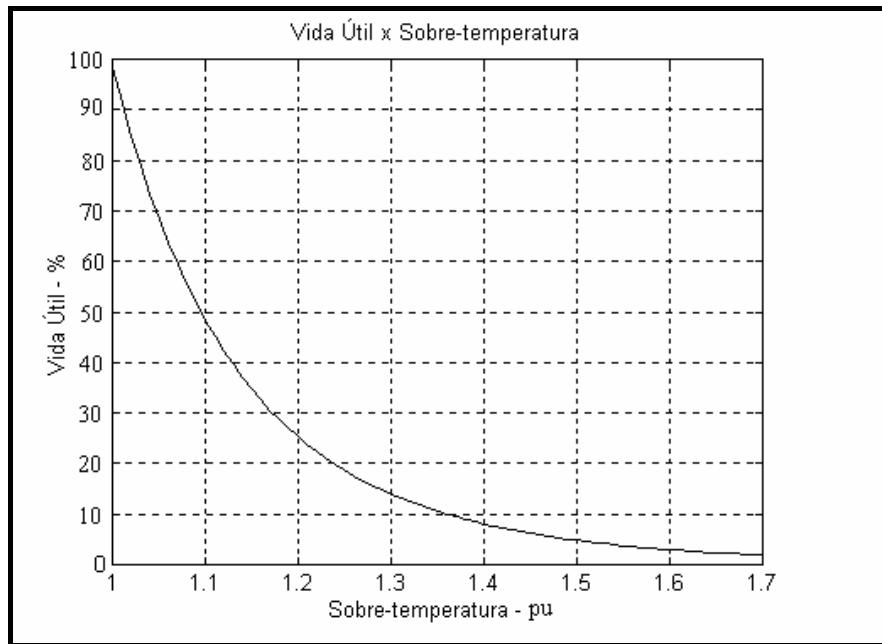


Figura 32 - Vida útil *versus* Sobretemperatura em capacitores

A Figura 33 ilustra o efeito na redução da vida útil dos bancos de capacitores em função da distorção de tensão.

Para assegurar uma operação segura dos bancos de capacitores em relação ao nível de distorção harmônica, estabelece-se uma recomendação traduzida pela equação (12).

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (n * V_n)^2} \leq 83\% \quad (12)$$

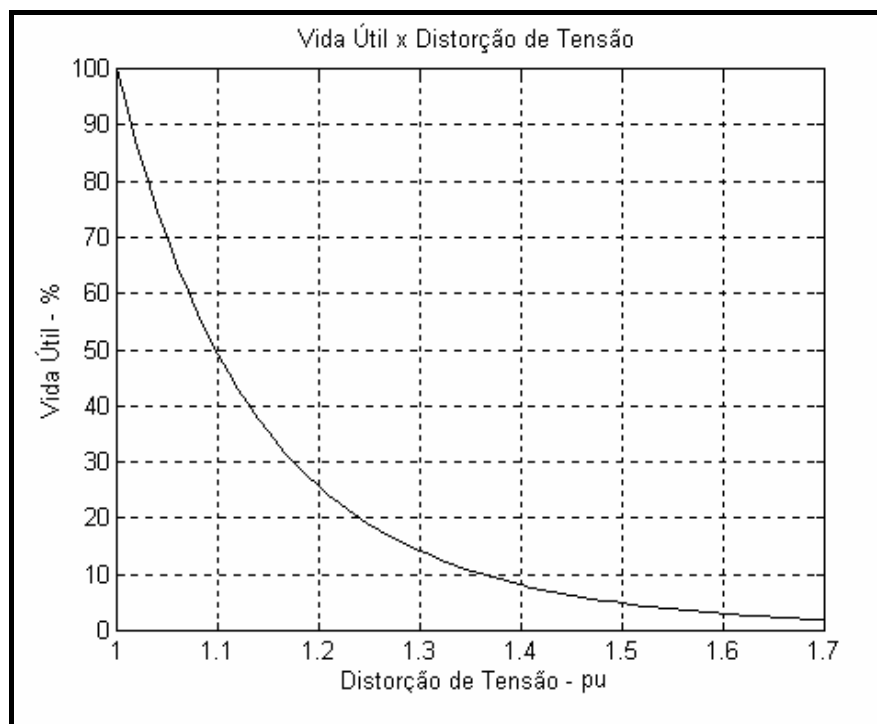


Figura 33 - Vida útil *versus* Distorção de Tensão em Capacitores

Medidores de Energia Elétrica

Um outro efeito causado pelas distorções harmônicas refere-se à operação anormal ou indevida dos medidores de energia elétrica.

O medidor de energia do tipo indução tem sua operação fundamentada no fenômeno da interação eletromagnética. O conjugado motor do medidor, associado ao registro de energia, é obtido em função da interação entre uma corrente “ i ” e um fluxo “ ϕ ”, este último oriundo da tensão aplicada ao medidor. Quando o medidor é submetido a tensões e correntes distorcidas, estas criam conjugados que fazem com que o disco acelere ou desacelere, ocasionando erros de medição.

A Figura 34 mostra a relação entre a corrente eficaz de alimentação de um retificador trifásico de 6 pulsos e o erro registrado por um medidor de kWh indutivo.

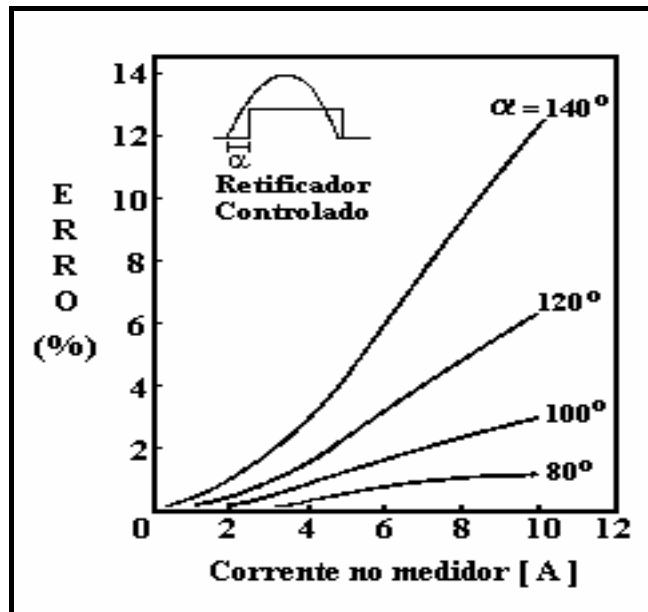


Figura 34 - Erro medido em função da corrente eficaz de um retificador controlado

Para assegurar uma operação segura dos medidores de energia, estabelece-se uma recomendação de limite de distorção apresentada pela equação (13).

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 20\% \quad (13)$$

Dispositivos de Proteção

Estes dispositivos, quando submetidos a sinais distorcidos, podem atuar de maneira incorreta, não retratando a real condição operacional do sistema.

Uma recomendação para o limite de operação de relés quando submetidos a sinais distorcidos é apresentado pela equação 14.

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 5\% \quad (14)$$

Diante de tantos problemas causados por harmônicos, torna-se necessário tomar medidas preventivas ou corretivas, no sentido de reduzir ou eliminar os níveis harmônicos presentes nos barramentos e linhas de um sistema elétrico.

Dentre as diversas técnicas utilizadas destacam-se:

- Filtros passivos: são constituídos basicamente de componentes R, L e C através dos quais obtêm-se os filtros sintonizados e amortecidos. Estes filtros

são instalados geralmente em paralelo com o sistema supridor, proporcionando um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. Podem ser utilizados para a melhoria do fator de potência, fornecendo o reativo necessário ao sistema. Entretanto, existem alguns problemas relacionados à utilização destes filtros, dentre os quais destacam-se: o alto custo, a complexidade de sintonia e a possibilidade de ressonância paralela com a impedância do sistema elétrico.

- Filtros ativos: um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com defasagem oposta àquelas produzidas pela carga não linear. Assim, há um cancelamento das ordens harmônicas que se deseja eliminar. Embora bastante eficientes, estes dispositivos apresentam custos elevados (superiores aos filtros passivos), o que tem limitado a sua utilização nos sistemas elétricos.
- Compensadores eletromagnéticos e
- Moduladores CC.

Técnicas tais como eliminação por injeção de um componente de corrente alternada ou pulsante, produzido por um retificador e aumento do número de pulsos dos conversores estáticos também podem ser utilizados. Dentre estas, a última tem sido mais usada e se enquadra dentro do contexto de equipamentos designados por compensadores eletromagnéticos de harmônicos.

6.3 Interharmônico

São formas de ondas de tensões e correntes que apresentam componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência com a qual o sistema é suprido e designado a operar (50 ou 60 Hz). Estas inter-harmônicas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. Podem ser encontradas em redes de diferentes classes de tensões. As principais fontes são os conversores de frequência estáticos, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais “carrier” em linhas de potência também podem ser considerados como interharmônicos.

Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas admite-se que os mesmos podem afetar a transmissão de sinais *carrier* (portadores) e a induzir *flicker* (oscilação) visual no *display* de equipamentos como tubos de raios catódicos.

6.4 Notching

Notching é um distúrbio periódico de tensão causado pela má operação dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante este período há um momentâneo curto circuito entre duas fases levando a tensão próxima a zero tanto quanto é permitido pelas impedâncias do sistema.

Desde que ocorre continuamente, pode ser caracterizado pelo espectro harmônico da tensão afetada. Os componentes de frequência associados com o fenômeno *notching* podem ser altos e não ser prontamente caracterizados pelos equipamentos de medidas normalmente usados para análise de harmônicos. A Figura 29 mostra a forma com que o *notching* se manifesta.

6.5 Ruído

Com respeito aos ruídos, estes podem ser definidos como sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo do espectro abaixo de 200 kHz, superposto à tensão e corrente do sistema de energia nos condutores de fase ou obtidos sobre os condutores neutros, ou ainda, nos sinais da linha.

Pode ser causado em sistemas de energia por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas e, via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios. O problema pode ser atenuado pelo uso de filtros, isolamento dos transformadores e condicionadores de linha.

FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Flutuações na tensão são variações sistemáticas dos valores eficazes de tensão, ou uma série de mudanças aleatórias, cujas magnitudes normalmente não excedem faixas de valores pré-estabelecidos (faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 p.u., Tabela 2).

Cargas industriais que exibem variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga podem causar variações na tensão que são freqüentemente referidas como *flicker* ou oscilação. Para ser tecnicamente correto, flutuação de tensão é um fenômeno eletromagnético enquanto *flicker* é o resultado indesejável da flutuação de tensão em algumas cargas.

Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar:

• Flutuações Aleatórias

A principal fonte destas flutuações são os fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação.

• Flutuações Repetitivas

Dentre as principais fontes geradoras de flutuações desta natureza tem-se:

- Máquinas de solda;
- Laminadores;
- Elevadores de minas e
- Ferrovias.

A Figura 35 ilustra o comportamento do valor eficaz da tensão no barramento supridor de um laminador, durante um período de 5 segundos.

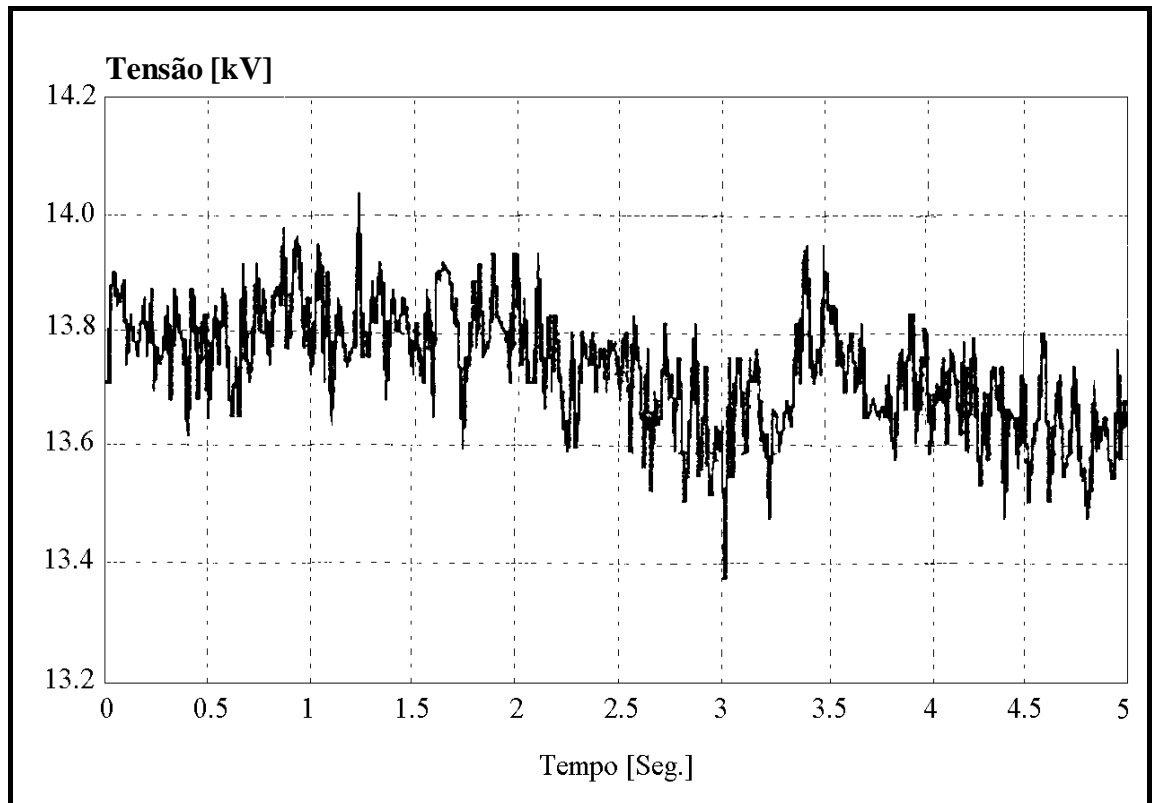


Figura 35 - Oscilações de tensão oriundas da operação de um laminador

• Flutuações Esporádicas

A principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores. Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção e
- Efeito *flicker* ou cintilação luminosa.

Em relação aos efeitos em motores elétricos, o conjugado desenvolvido é diretamente proporcional ao valor RMS da tensão e , estando os motores submetidos a tensões flutuantes, estes passam a apresentar torques oscilantes no eixo. A Figura 36 mostra as curvas de conjugado eletromagnético e de carga de um motor de indução quando da presença de tensões oscilantes aplicadas ao estator, onde se verifica oscilações no conjugado motor, de amplitudes consideráveis.

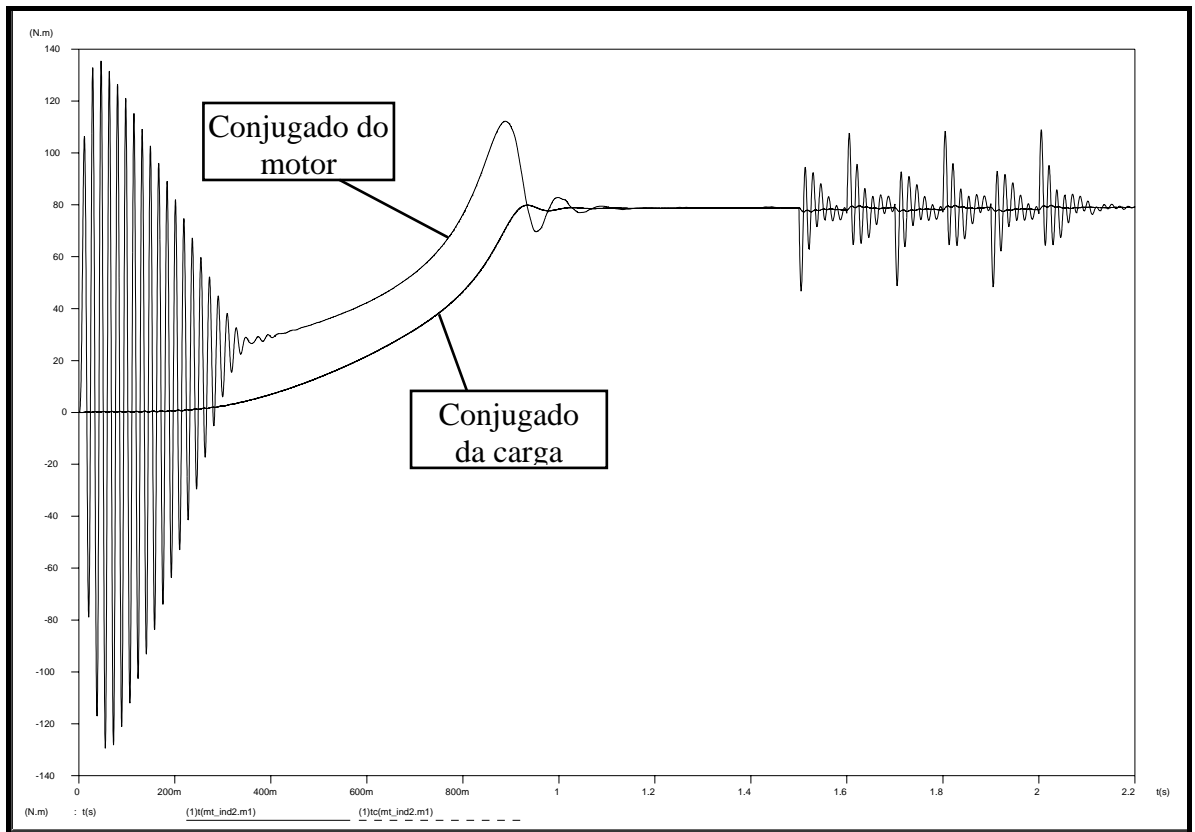


Figura 36 - Motor Submetido a Tensões Oscilantes

Entretanto, o fenômeno *flicker* consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. Este tema merece especial atenção, uma vez que o desconforto visual associado a perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável. A intensidade do efeito *flicker* está associada aos seguintes fatores:

- Amplitude das oscilações;
- Frequência da moduladora e
- Duração do distúrbio ou ciclo de operação da carga perturbadora.

Estes fatores, em conjunto com a perceptibilidade do olho humano, dão origem a curvas que representam os limiares da percepção visual para flutuações de tensão, conforme ilustra a Figura 37.

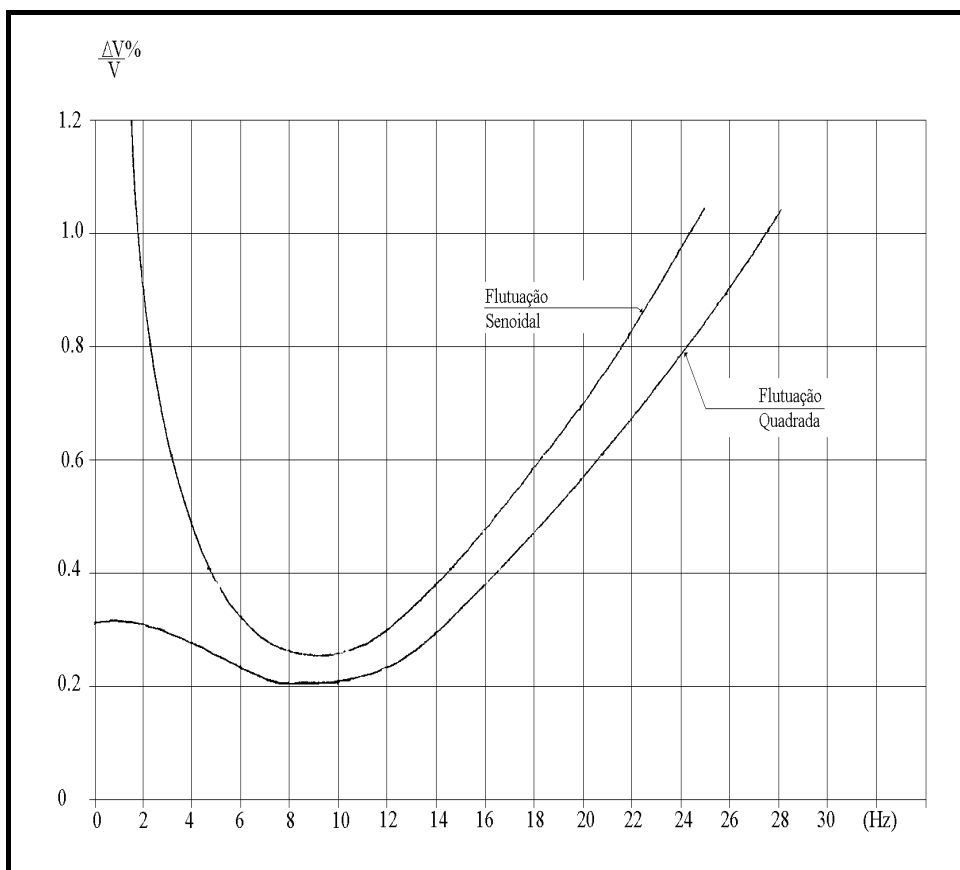


Figura 37 - Limites da Percepção Visual para Flutuações de Tensão Associadas a Ondas Senoidais e Quadradas

Como pode ser observado na figura anterior, variações da ordem de 0,25% da tensão nominal são perceptíveis quando ocorrem em baixas frequências (1 a 15 Hz). Entretanto, para as variações graduais, o que ocorre é uma acomodação visual, provocando um nível de irritação visual de menor intensidade e tolerável pelo ser humano.

VARIAÇÕES NA FREQUÊNCIA DO SISTEMA

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como o desvio no valor da frequência fundamental deste, de seus valores nominais especificados (50 ou 60 Hz).

A frequência do sistema de potência está diretamente relacionado à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Há estreitas variações na frequência com o balanço dinâmico entre cargas e mudanças na geração. A amplitude da variação e sua duração depende das características da carga e da resposta do sistema de controle de geração às alterações na carga.

Variações na frequência que ultrapassem dos limites para a operação em regime permanente podem ser causadas por faltas no sistema de transmissão, desconexão de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

Nos modernos sistemas interconectados de energia, variações significantes de frequência são raras. Variações consideráveis e frequentes podem mais comumente ocorrer para cargas que são supridas por geradores de sistemas isolados das concessionárias. Em sistemas isolados, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-GALIL, T. K.; EL-SAADANY, E. F. and SALAMA, M. M. A. (2003). “Power quality event detection using Adaline”. *Electric Power Systems Research*, vol. 64, 137-144.
- ANGRISSANI, L.; DAPONTE, P. ; APUZZO, M. D. and TESTA, A. (1998) “A measurement method based on the *wavelet* transform for power quality analysis”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.13, No.4, Oct.
- ARRUDA, E. F., DELMONT, O. F., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. (2002) Um Estudo das Famílias Waveltes Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica. *Congresso Brasileiro de Automática – CBA2002*, 6p,2002, Natal/RN.
- COURY, D. V., SANTOS, C. J. and TAVARES, M. C. “Transient Analysis resulting from Shunt Capacitor Switching in an Actual Electrical Distribution System”, *The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 14-16 October 1998, Athens, Greece.
- DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F. and WAYNE BEATY, H. (1996). “*Electrical Power Systems Quality*”, MCGRAW-HILL.
- GAOUDA, A. M.; SALAMA, M. M. A.; SULTAN, M. R. & CHIKHANI, A.Y. (1999). “Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 14, No.4, Oct.
- GAOUDA, A. M.; KANOUN, S. H. and SALAMA, M. M. A. (2001). “On-line disturbance classification using nearest neighbor rule”, *Electric Power Research*, No. 57, pp. 1-8.
- GOMES, J. e VELHO, L. (1998) *From Fourier Analysis to Wavelets Course Notes – Siggraph*, IMPA Rio de Janeiro, 1998, Brasil.
- HUANG, S. J.; HSIEH, C. T. and HUANG, C. L. (1998). “Application of wavelet to classify power system disturbances”, *Electric Power Systems research*, No. 47, pp. 87-93.

- HWAN KIM, C. and AGGARWAL, R. (2000). “Wavelet transforms in power systems. Part 1 General introduction to the wavelet transforms”, *Power Engineering Journal*, pp. 81-87, Apr.
- HWAN KIM, C. and AGGARWAL, R. (2001). “Wavelet transforms in power systems. Part 2 Examples of application to actual power systems transients”, *Power Engineering Journal*, pp. 193-202, Aug.
- IEEE Power Engineering Review (2002), February, vol. 22, No. 2, ISSN 0272-1724.
- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, Inst. of Elect. & Electronic, ISBN: 1559375493, 1995.
- MACEDO, R. A.; SILVA, D. F. e COURY, D. V. (2002). “Algoritmos genéticos aplicados à estimação de componentes harmônicos em sistemas elétricos de potência”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, RN, Anais do congresso.
- MATH H. J. Bollen and MATHIAS H. J. Bollen (1991), “Understanding Power Quality Problems: Voltage Sagas and Interruptions”.
- MOURA, C. C. M.; TOSTES, M. E.; SANTOS, E. P.; OLIVEIRA, R. C. L.; BRANCO, T. M e BEZERRA, U. H. (2002). “Aplicação de algoritmos genéticos para determinar os parâmetros de um filtro harmônico passivo utilizado em consumidores de baixa tensão”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, RN, Anais do congresso.
- Normas e recomendações técnicas do IEEE e CIGRÉ.
- Normas IEC e Norma Européia (EN).
- Norma Sul Africana NRS.
- OLIVEIRA, J. C. (2000). Projeto SIDAQEE (2000). *Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de qualidade*. Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.
- POISSON, O.; RIOUAL, P. and MEUNIER, M.(1999). “New signal processing tools applied to power quality analysis”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.14, No.2, Apr.

- POISSON, O.; RIOUAL, P. and MEUNIER, M. (2000). “Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.15, No.3, Jul.
- SABIN & SUDARAM (1996) “Quality Enhances Reliability”, *IEEE Spectrum*, Feb.
- SANTOS, C. J., COURRY, D. V., TAVARES, M. C. and OLESKOVICZ, M. “An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System”, *International Conference on Power System Simulation IPST'2001*, 24-28 June 2001, Rio de Janeiro, Brazil.
- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. and HOLFMANN, P. (1996). “Power quality assessment via wavelet transform analysis”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 11, No2, Apr.
- SANTOSO, S.; GRADY, W. M.; POWERS, E. J.; LAMOREE, J. and BHATT, S. C. (2000.) “Characterization of distribution power quality events with *Fourier* and wavelet transforms”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15, No.1, Jan.
- SCHLABBACH *et al.* (2001), “Voltage Quality in Electrical Power Systems”, Institution of Electrical Engineers, ISBN: 0852969759.
- ZHENG, T.; MAKRAM, E. B. and GIRGIS, A. A. (1999.) “Power system transient and harmonic studies using wavelet transform”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 14, No.4, Oct.