

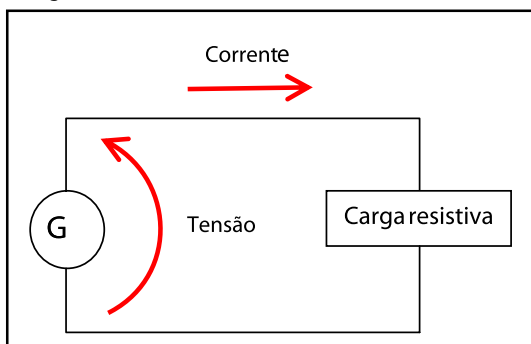
Qualidade de energia elétrica

1 - Introdução

No segmento de eletricidade, um assunto que vem gradativamente ganhando muito destaque é o conceito de qualidade de energia, principalmente pelo fato de que a sua falta pode provocar desligamentos ou mau funcionamento de equipamentos elétricos, o que pode ocasionar perdas financeiras para as empresas, desconforto para os usuários e o comprometimento da segurança das pessoas.

Do ponto de vista da engenharia elétrica, o desenvolvimento teórico necessário no estudo de soluções para problemas relacionados com qualidade de energia é muito trabalhoso em função da grande quantidade de variáveis que direta ou indiretamente afetam a qualidade da energia. Esta é uma área que é muito estudada e pesquisada, requer muita abstração e modelos matemáticos complexos e ainda há muito desenvolvimento a realizar para surgirem resultados e soluções confiáveis e práticas para melhorar a qualidade de energia dentro de custos viáveis e adequados.

A figura a seguir será utilizada para desenvolver de forma simplificada o conceito de qualidade de energia:



Neste circuito elétrico, a fonte G fornece uma tensão que, ao ser interligada a uma carga elétrica, faz circular uma corrente. Em um sistema elétrico alternado com frequência de 60 Hz, a forma de onda da tensão é uma senóide perfeita a 60 Hz e se a carga elétrica for uma resistência, por exemplo, a corrente também será uma senóide perfeita a 60 Hz.

Se a fonte G alimentar ininterruptamente, com tensão constante, a carga elétrica, esta realizará a sua função de forma contínua e teremos um exemplo simples de sistema elétrico com qualidade de energia.

Se a fonte deixar de fornecer a tensão dentro de seus valores nominais ou se a carga sem qualquer defeito deixar de funcionar adequadamente, teremos um exemplo de falta de qualidade de energia.

Portanto, o conceito de boa qualidade de energia está intimamente ligado ao funcionamento adequado e sem falhas das cargas elétricas existentes em um sistema elétrico e pressupõe tensões e frequência dentro de valores nominais e sem oscilações ou perturbações, ou seja, as tensões e as correntes resultantes devem apresentar formas de onda o mais próximo possível da curva senoidal com frequência de 60 Hz.

O conceito de qualidade de energia aplica-se a qualquer sistema elétrico, que pode ser a instalação de um consumidor, seja ele residencial, comercial ou industrial, como pode ser também uma rede elétrica completa de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

As redes elétricas estão em constante crescimento e são interligadas para permitir a transferência de energia em todo território nacional entre geradores

e consumidores. Soma-se a isso a sua associação à evolução tecnológica dos equipamentos elétricos, que nos proporcionam cargas com características não lineares ou cargas muito mais sensíveis a pequenos distúrbios. A contrapartida desses fatos é o aumento dos problemas relacionados à qualidade de energia.

Na sociedade moderna que está acostumada a usufruir os benefícios proporcionados pela eletricidade, o não funcionamento dos equipamentos elétricos devido à má qualidade de energia causa muito desconforto e transtornos. Para as empresas gera prejuízos, principalmente para aquelas em que o insumo eletricidade é primordial para sua atividade. No caso das instalações hospitalares pode colocar em risco a vida das pessoas. Portanto, trata-se de um assunto importante e prioritário e deve ser tratado de forma responsável e competente.

2 - Normas nacionais e internacionais sobre qualidade de energia

2.1 – Regulamentações nacionais

No Brasil, existe uma série de resoluções publicadas pelo órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), que devem ser seguidas pelas distribuidoras atuantes no território nacional relativas à continuidade do fornecimento de eletricidade e às variações de tensão admissíveis no suprimento de energia.

Das resoluções da Aneel existentes destacamos as seguintes:

Resolução N° 024, de 27 de janeiro de 2000 – Define parâmetros técnicos que indicam a continuidade do suprimento de energia elétrica para

o consumidor, tais como:

DEC E FEC – Duração e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora.

DIC E FIC – Duração e frequência equivalente de interrupção individual por consumidor.

DMIC – Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora.

Os indicadores acima definem a continuidade do suprimento (duração da falta de tensão e sua frequência de ocorrência) e não abrangem aspectos relacionados às perturbações na forma de onda de tensão.

Esses indicadores, calculados conforme metodologias definidas na resolução, são avaliados periodicamente e informados ao consumidor por faturas de eletricidade e devem ser constantemente melhorados por meio de metas definidas anualmente pela Aneel para cada distribuidora. Apesar da limitação de sua abrangência, estes indicadores dão uma idéia da qualidade do suprimento de energia das distribuidoras e é um parâmetro comparativo entre elas.

Resolução N° 505, de 20 de novembro de 2001

– Define os limites das variações dos níveis de tensão em regime permanente classificando as variações em adequadas, precárias e críticas. Esta resolução define os seguintes indicadores:

DRP – Duração relativa da transgressão da tensão precária.

DRC – Duração relativa da transgressão da tensão crítica.

ICC – Índice de unidades consumidoras com tensão crítica.

Estes indicadores, que são calculados conforme metodologias definidas na resolução, podem ser

utilizados para determinar a compensação financeira devida aos consumidores em que a qualidade do fornecimento não é adequada, ou seja, quando a tensão de suprimento está fora dos limites aceitáveis.

Todas as distribuidoras devem informar aos consumidores pela fatura de eletricidade quais são os limites adequados da variação da tensão de suprimento. A tabela abaixo apresenta as variações consideradas adequadas para algumas categorias de consumidores:

Categoria da tensão de suprimento	Varição considerada adequada
69 kV ≤ TS < 230 kV	95% TS ≤ tensão medida ≤ 105% TS
1 kV < TS < 69 kV	93% TS ≤ tensão medida ≤ 105% TS
Monofásica 127 V	116 V ≤ tensão medida ≤ 132 V

Resolução N° 61, de 29 de abril de 2004 –

Estabelece as disposições relativas ao ressarcimento de danos elétricos em equipamentos elétricos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbação ocorrida no sistema elétrico. Esta resolução permite que o consumidor seja ressarcido pelo dano provocado aos equipamentos devido à falta de qualidade de energia

desde que seja estabelecida a relação entre o dano reclamado e o evento causador.

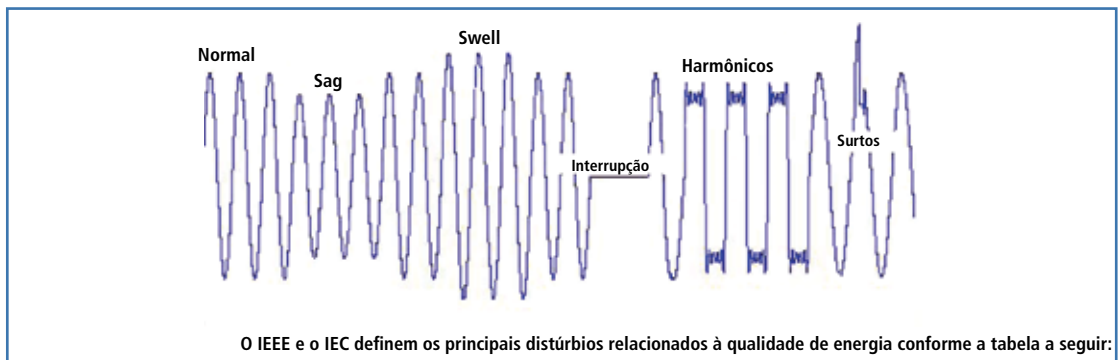
2.2 – Regulamentações internacionais

Na Comunidade Européia, a norma EN50160 trata da qualidade de energia e foi oficialmente adotada por diversos países. Nos Estados Unidos, a norma IEEE 519 de 1992 é uma referência nos assuntos ligados a perturbações harmônicas em redes elétricas e a norma IEEE 1159 de 1995 apresenta a prática recomendada para a monitoração e a interpretação dos fenômenos que causam problemas de qualidade de energia.

O assunto qualidade de energia é estudado por diversas associações de fabricantes com o objetivo de estabelecer padrões de suportabilidade de equipamentos quanto a diversos problemas relacionados com a falta de qualidade de energia.

3 - Definição dos distúrbios que afetam a qualidade de energia

A figura a seguir ilustra, a partir de diferentes formas de onda, os distúrbios comumente encontrados em sistemas elétricos que afetam a qualidade de energia.



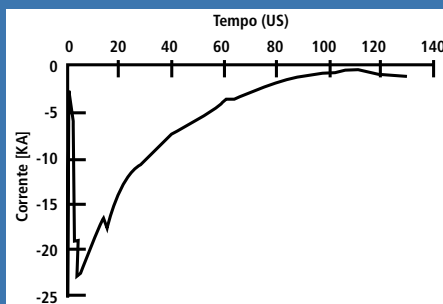
Categorias	Componente espectral típico	Duração típica	Amplitude típica da tensão
Transitórios ou surtos			
> Impulsivos:			
Nanosegundos	5 ns rise	<50 ns	
Microsegundos	1 µs rise	50 ns – 1 ms	
Milisegundos	0,1 ms rise	> 1 ms	
> Oscilatórios:			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 µs – 30 µs	0% – 400%
Média frequência	5 kHz – 500 kHz	20 µs	0% – 800%
Alta frequência	0,5 MHz – 5 MHz	5 µs	0% – 400%
Variações de tensão de curta duração			
> Instantâneas			
Afundamento de tensão	"sag"	0,5 a 30 ciclos	10% – 90%
Salto de tensão	"swell"	0,5 a 30 ciclos	110% – 180%
> Momentâneas			
Interrupção		30 ciclos – 3 s	< 10%
Afundamento de tensão	"sag"	30 ciclos – 3 s	10% – 90%
Salto de tensão	"swell"	30 ciclos – 3 s	110% – 180%
> Temporárias			
Interrupção		3 s – 1 min	< 10%
Afundamento de tensão	"sag"	3 s – 1 min	10% – 90%
Salto de tensão	"swell"	3 s – 1 min	110% – 180%
Variações de tensão de longa duração			
> Interrupção sustentada		> 1 min	0,0%
> Subtensões		> 1 min	80% – 90%
> Sobretensões		> 1 min	110% – 120%
Desequilíbrio de tensões		Contínuo	0,5% – 2%
Distorção de forma de onda			
> Nível CC		Contínuo	0% – 0,1 %
> Harmônicos		0 – 100o harmônico	Contínuo
> Interharmônicos		0 – 6 kHz	Contínuo
> Corte		Contínuo	
> Ruído		espectro banda	Contínuo
Flutuações de tensão		< 25 Hz	Intermitente
Variações de frequência		< 10 s	

4. Transitórios ou surtos

Na engenharia elétrica, o termo transitório caracteriza aqueles eventos indesejáveis no sistema, que são de curta duração, mas podem implicar tensões e correntes nos equipamentos que superam as condições nominais de funcionamento. De forma geral, os transitórios podem ser classificados em duas categorias: impulsivo e oscilatório.

4.1 - Transitórios impulsivos

O transitório impulsivo é normalmente causado por descargas atmosféricas e provoca alterações súbitas nas condições de estado permanente da tensão e corrente e sua polaridade é unidirecional, isto é, positiva ou negativa. A curva a seguir ilustra a característica de um transitório impulsivo.



Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica

Como principal efeito, este distúrbio pode causar degradação ou falha imediata dos isolamentos de equipamentos elétricos.

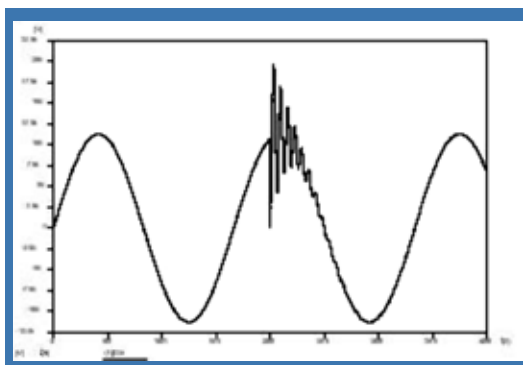
Como medidas preventivas para esse tipo de perturbação, as edificações devem apresentar sistemas de proteção contra descargas atmosféricas devidamente aterrados objetivando drenar o correspondente surto de tensão e/ou corrente para o terra. Adicionalmente, nos alimentadores de alta tensão devem existir pára-raios de linha constituídos de resistores não linear e com o objetivo de drenar o surto transitório para o terra e proteger os equipamentos dos efeitos do transitório.

Os transitórios impulsivos podem gerar tensões induzidas nos condutores fase ou em cabos de comando e controle localizados próximos aos condutores de aterramento que drenam a descarga para a malha de terra. Preventivamente, o acondicionamento dos condutores deve ser em calhas metálicas fechadas ou em eletrodutos metálicos devidamente aterrados e os cabos de comando e controle devem ser blindados com malhas de aterramento. Para transmissão de sinais de controle a longas distâncias, uma prática modernamente utilizada é o emprego de fibra ótica com as respectivas interfaces, uma vez que essa tecnologia é totalmente imune a

induções provenientes de transitórios que podem ocorrer nas proximidades da trajetória de interligação.

4.2 - Transitórios oscilatórios

Um transitório oscilatório também é uma súbita alteração não desejável da condição de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, na qual elas incluem valores de polaridade positivos ou negativos. É caracterizado pelo seu conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude da tensão. Esses transitórios são decorrentes da energização de linhas de transmissão, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, etc.



Como o transitório impulsivo, o transitório oscilatório pode causar queima ou outros danos em equipamentos eletroeletrônicos. Os transitórios ou surtos oscilatórios são classificados em função de sua frequência, podendo ser de baixa (< 5 kHz), média (de 5 kHz a 500 kHz) ou alta frequência (> 500 kHz). Esses transitórios estão presentes em sistemas de potência (redes de transmissão e distribuição) e também nas redes elétricas do consumidor.

Cuidados especiais devem ser tomados em instalações elétricas com bancos automáticos de capacitores, pois o chaveamento destes capacitores sempre provocará transitórios que podem danificar equipamentos elétricos mais sensíveis. Filtros de alta frequência e transformadores isoladores são recomendados para proteger as cargas contra esse 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, deve existir uma preocupação especial quanto à possibilidade de estabelecer uma condição de ressonância, devido às oscilações de altas frequências entre o sistema da concessionária e o da indústria, para a amplificação das tensões transitórias. O fenômeno da ressonância é identificado na prática quando ocorrem atuações de proteções (disjuntores e fusíveis) sem a existência de curtos-circuitos.

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.

Os transitórios oriundos de surtos de chaveamento em redes de distribuição podem ter seu grau de incidência e magnitudes reduzidas por meio de uma reavaliação das filosofias de proteção e investimentos para

melhorias nas redes. Esta última medida visa ao aumento da capacidade da rede, evitando que bancos de capacitores venham a ser exigidos.

5 - Variações de tensão de curta duração

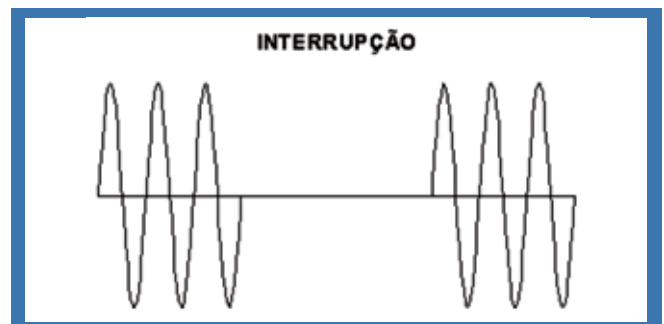
As variações de tensão de curta duração são geralmente causadas por condições de faltas no sistema elétrico e pela energização de grandes blocos de carga que requerem elevadas correntes de partida.

Dependendo da localização da falta e das condições operacionais do sistema, a falta pode causar uma elevação de tensão (swell), uma depressão de tensão (sag) ou, ainda, a perda completa da tensão (interrupção).

5.1 - Interrupção

A interrupção é caracterizada por ser um decréscimo da tensão de suprimento a um valor menor que 10% por um período de tempo de 0,5 ciclos até 1 minuto. As interrupções podem ser resultadas de faltas no sistema elétrico, falhas de equipamentos ou mau funcionamento dos sistemas de controle. A duração da interrupção devido às faltas no sistema é determinada pelo evento que gerou a falta.

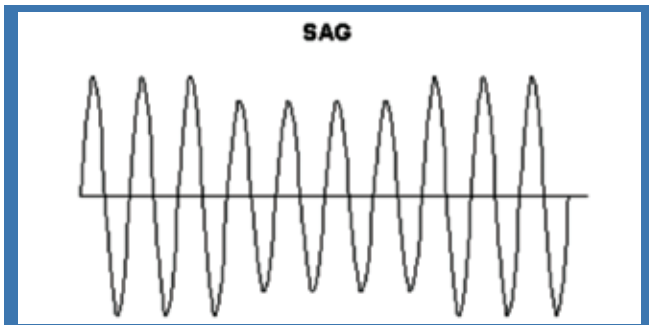
De modo geral, as interrupções quase sempre irão causar o desligamento ou mau funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos. Em alguns casos, podem até causar defeitos em chaves estáticas (soft-starters) e, dependendo da sua duração, podem promover o desligamento de todos os equipamentos, com exceção daqueles que possuem suprimento alternativo de energia.



As soluções para estas interrupções normalmente devem partir das concessionárias, que devem mudar a filosofia de proteção, objetivando limitar a quantidade de consumidores afetados por essas interrupções. Do lado dos consumidores devem ser instalados sistemas ininterruptos de suprimento (nobreaks) para as cargas críticas e mais sensíveis a essas interrupções.

5.2 - Depressão de tensão (Sag)

A depressão de tensão é uma redução momentânea do valor eficaz da tensão da ordem de 10% a 90% com duração entre 0,5 ciclos até 1 minuto. Geralmente está associada a faltas no sistema, mas também pode ser gerada pela entrada de cargas ou partida de grandes motores.



A depressão de tensão pode provocar a parada de equipamentos eletroeletrônicos e interrupções de processos produtivos, o que tem sido alvo de preocupações em órgãos de pesquisa em qualidade da energia.

Determinar os níveis de sensibilidade de tais equipamentos torna-se uma tarefa difícil, devido à necessidade de manter equipamentos de medição para coleta de dados permanentemente, pois a ocorrência deste evento é totalmente imprevisível.

Seguem alguns níveis de sensibilidade que foram determinados

a partir de estudos de casos realizados pelo EPRI (Electric Power Research Institute), pela ANSI (American National Standards Institute) e pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) do Projeto SIDAQEE:

a) Equipamentos de condicionamento ambiente

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

b) Acionamento em corrente contínua e eletrônica de potência

Utilizado em grande escala em processos industriais. É importante que se mantenha uma qualidade no suprimento de energia dessas cargas. A partir de resultados preliminares de monitorações, ele se mostra sensível quando a tensão é reduzida para próximo de 88% da nominal, ou seja, apresenta um alto nível de sensibilidade.

c) PLCs – Controladores Lógicos Programáveis

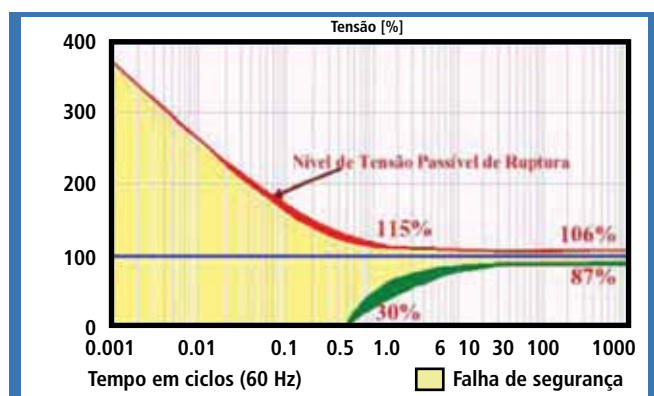
Os controladores lógicos programáveis mais antigos são menos sensíveis e admitem zero de tensão por até 15 ciclos. No entanto, os mais modernos, dotados de uma eletrônica mais sofisticada, começam a apresentar problemas na faixa de 50% a 60% da tensão nominal.

d) Equipamentos de robótica

Robôs geralmente requerem uma tensão estritamente constante para garantir uma operação apropriada e segura. Portanto, essas máquinas são freqüentemente ajustadas para saírem de operação ou desconectadas do sistema de distribuição quando a tensão atinge níveis de 90% da nominal.

e) Computadores

Os computadores são 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 abaixo, em que 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 fortemente dependente do período de duração do distúrbio.



f) Videocassetes, forno de microondas e equipamentos digitais

Estas cargas são essencialmente domésticas e, de certa forma, são pouco sensíveis às variações de tensão.

A solução mais empregada para minimizar os efeitos dessas perturbações e para alimentação das cargas mais sensíveis é o emprego de sistemas nobreaks, UPS (Uninterruptible Power Supply) ou, ainda, a utilização de transformadores ferro-ressonantes conhecidos também como CVTs (Constant Voltage Transformers).

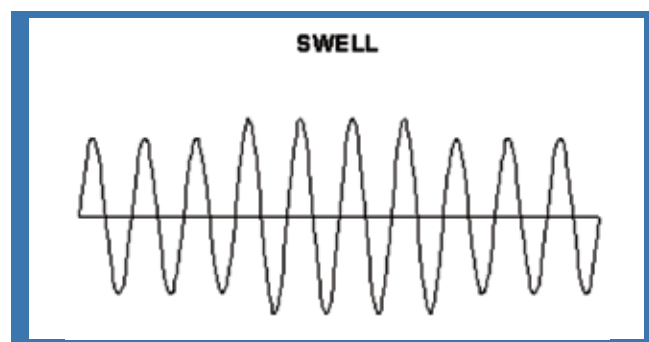
No caso dos afundamentos de tensão provocados por partida

de motores, modernamente são empregados os sistemas de partida suave (soft-start), que proporcionam a partida do motor de forma gradativa e controlada, eliminando os picos de corrente existentes nas partidas convencionais.

5.3 - Salto de Tensão (Swell)

O salto de tensão é caracterizado pelo incremento do valor eficaz da tensão na faixa de 110% a 180% e com duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto.

O salto de tensão é, geralmente, associado a condições de falta desequilibrada no sistema, saída de grandes blocos de carga e entrada de bancos de capacitores.



O salto de tensão (swell) pode causar a degradação ou falha imediata dos isolamentos de equipamentos e fontes eletrônicas, queima de varistores e de diodo zener.

6 - VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

As variações de tensão de longa duração englobam variações do valor eficaz da tensão durante um tempo superior a 1 minuto. Portanto, são consideradas distúrbios de regime permanente. São classificadas em sobretensões, subtensões ou interrupções sustentadas.

6.1 - Interrupções sustentadas

Considera-se uma interrupção sustentada a redução de tensão de suprimento a zero por tempo superior a 1 minuto. São de natureza permanente e requerem intervenção manual para restabelecimento da energia elétrica do sistema.

As interrupções sustentadas podem ocorrer de forma inesperada ou planejada. A maioria delas acontece inesperadamente e as principais causas são a atuação dos disjuntores de proteção, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, etc. Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção ou ampliação na rede de distribuição.

Em qualquer situação de interrupção sustentada (inesperada ou planejada), 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;
- o número de consumidores afetados seja pequeno.

Ao ocorrer uma falta de caráter permanente, o dispositivo de proteção do alimentador principal executa três ou quatro operações na tentativa de restabelecer o sistema até que o bloqueio definitivo seja efetuado. A duração desta interrupção pode atingir vários minutos ou horas, dependendo do local da falta, do tipo, da gravidade do 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, é necessário 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 que em redes aéreas.

Qualquer desligamento de equipamentos de forma sustentada nas indústrias acarreta prejuízos elevados. Nos casos de instalações hospitalares, devem ser previstos sistemas de alimentação de emergência, tais como grupos geradores para assumir a alimentação das cargas prioritárias. Em prédios comerciais e residenciais, são empregados também grupos geradores para manter os circuitos dos elevadores e de iluminação em operação.

6.2 - Subtensões

Subtensões são definidas como uma redução no valor eficaz da tensão para 80% a 90% por um período superior a 1 minuto. A entrada de carga ou a saída de um banco de capacitores pode provocar subtensões até que os equipamentos de regulação de tensão do sistema atuem e retornem a tensão a seus limites normais.

Subtensões também podem ser causadas por sobrecargas em alimentadores. As subtensões causam o aumento das perdas por aquecimento em motores de indução, parada de operação de dispositivos eletrônicos e desligamento de sistemas de comando de motores.

As medidas corretivas para subtensões é a instalação de estabilizadores de tensão no caso de cargas mais sensíveis e de menor potência ou, ainda, transformadores com comutadores sob carga comandados por reguladores de tensão para a alimentação de cargas elétricas de maior potência.

No caso em que a tensão de suprimento é permanentemente baixa

durante todas as horas do dia ao longo de uma semana completa, é possível ajustar os taps dos transformadores de força para que a tensão de saída seja maior e próxima do valor nominal.

Se a subtensão foi verificada na entrada de energia, a distribuidora deverá ser imediatamente comunicada para a regularização da tensão de suprimento.

Se a subtensão for interna nos circuitos alimentadores de maior comprimento, deverá ser revisto o dimensionamento dos condutores, aumentando a sua bitola e, com isso, reduzindo a impedância do cabo e a queda de tensão resultante.

6.3 - Sobretensões

As sobretensões são caracterizadas pelo aumento do valor eficaz da tensão para 110% a 120% durante um tempo superior a 1 minuto. Elas podem ter origem devido à saída de grandes blocos de carga, entrada de banco de capacitores ou devido ao ajuste incorreto de "taps" de transformadores.

As sobretensões ocorrem com menor frequência e, nos casos em que sua presença for constatada na entrada de energia, a distribuidora deverá ser imediatamente comunicada para a regularização da tensão de suprimento.

Se a sobretensão for constatada internamente de forma permanente, poderão ser ajustados os taps dos transformadores de força.

Em instalações com bancos de capacitores, podem ser verificadas sobretensões nos períodos de baixa carga elétrica e, nessa situação, deve ser prevista a possibilidade de desligamento total ou parcial dos capacitores existentes.

7. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens desses desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa. Este problema é agravado 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 ser resultado da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

Dentre os problemas decorrentes de desequilíbrios de tensão destacamos:

- Aquecimentos dos motores em função do conjugado interno pulsante gerado pelo desequilíbrio;
- Aumento das perdas nos motores síncronos e de indução;
- Sistemas retificadores geração de componentes de 3° harmônicas, além das intrínsecas do seu funcionamento.

Caso este desequilíbrio de tensão for verificado na entrada de energia, a distribuidora deverá ser imediatamente notificada para regularização.

Caso este desequilíbrio for provocado internamente na instalação,

deverão ser verificados todos os circuitos alimentadores para identificar as fases mais sobrecarregadas e realizar o balanceamento de cargas monofásicas entre as três fases.

8. DISTORÇÕES DE FORMA DE ONDA

A distorção de forma de onda é o desvio, em regime permanente, da forma de onda da corrente ou tensão em relação ao sinal senoidal puro.

São cinco os tipos principais de distorção de forma de onda:

- **Desvio do nível CC**
- **Harmônicos**
- **Interharmônicos**
- **Corte (Notch)**
- **Ruídos**

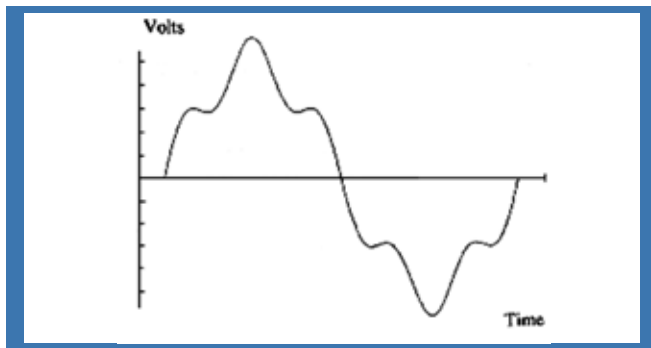
8.1 - Desvio no nível CC

A presença de tensão CC ou corrente CC em sistemas CA é denominada desvio no nível CC. Este fenômeno pode ocorrer devido ao efeito da retificação 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.

8.2 - Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais que têm frequências múltiplas da frequência fundamental (50 Hz ou 60 Hz). Somados às componentes fundamentais de tensão e corrente, os harmônicos causam distorção na forma de onda conforme indicado na figura a seguir.



A distorção harmônica ocorre devido à operação de cargas não lineares no sistema elétrico, tais como: fornos a arco, fornos de indução, conversores estáticos, inversores de frequência, máquinas de solda, lâmpadas fluorescentes, etc.

O nível de distorção harmônica pode ser caracterizado pelo espectro de frequência com suas magnitudes e ângulos para todas as componentes harmônicas. É comum utilizar-se para a quantificação deste distúrbio, a distorção total de tensão ou de corrente.

A injeção de corrente harmônica, por parte dos consumidores, pode causar distorção na forma de onda da tensão do sistema da concessionária.

A corrente harmônica e a distorção da tensão provocam no sistema elétrico:

- Sobreaquecimento em máquinas rotativas e transformadores, com

conseqüente redução da vida útil destes equipamentos;

- Sobreensões harmônicas, resultando no aumento das solicitações do isolamento dos dispositivos, o que, em muitos casos, causa a ruptura do dielétrico;
- Operação indevida dos sistemas de proteção, medição e controle de equipamentos elétricos;
- Redução da vida útil dos capacitores e o seu sobreaquecimento. Os capacitores, por sua vez, amplificam os harmônicos existentes, podendo criar ressonância na rede elétrica.
- Perturbações no funcionamento de microcomputadores, equipamentos de telefonia e equipamentos de controle microprocessados.

A presença de harmônicos compromete a qualidade de energia da instalação e as providências necessárias são as seguintes:

- Instalação de filtros passivos: são constituídos basicamente de componentes R, L e C por meio dos quais são obtidos 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 se destacam: o alto custo, a complexidade de sintonia e a possibilidade de ressonância paralela com a impedância do sistema elétrico.
- Instalação de 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. A tendência é a redução do custo dos filtros ativos ao longo do tempo.
- Isolar as cargas geradoras de harmônicos por meio de transformadores de isolamento uma vez que a sua impedância será um filtro para atenuar as perturbações no restante da rede elétrica.

É recomendável que, quando da aquisição de cargas não lineares, sejam solicitados aos fabricantes o fornecimento dos filtros de harmônicos apropriados para as características do equipamento com o objetivo de minimizar a geração dos harmônicos e a sua circulação na rede elétrica.

8.3 – Interharmônicos

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 Hz 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, ciclo-conversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais “carrier” em linhas de potência também podem ser considerados como inter-harmônicos.

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

8.4 – Corte (NOTCH)

Corte é um distúrbio periódico da tensão, causado pela operação normal dos equipamentos que utilizam a eletrônica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para a outra. Durante este período ocorre um curto-circuito momentâneo entre as duas fases.

Este distúrbio representa um caso especial que se enquadra entre transitórios e distorção harmônica. Desde que o efeito do corte ocorra continuamente (estado permanente), ele pode ser caracterizado pelo espectro harmônico. A principal fonte causadora de corte de tensão são os conversores trifásicos.

8.5 – Ruído

O fenômeno conhecido como ruído é um sinal indesejável, com espectro de frequência amplo, menor que 200 kHz, de baixa intensidade, superposto à corrente ou tensão nos condutores de fase ou encontrado nos condutores de neutro.

Normalmente, este tipo de interferência é resultado de operações defeituosas de equipamentos, instalação inadequada de componentes no sistema da concessionária ou dos consumidores e aterramentos impróprios. Podem se propagar até atingir cargas susceptíveis em algum ponto do sistema, tais como microcomputadores e controladores programáveis.

O problema pode ser atenuado com o uso de filtros atenuadores, transformadores isoladores e condicionadores de linha.

9. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Flutuações de tensão são variações sistemáticas no perfil da tensão ou uma série de variações aleatórias da magnitude da tensão, as quais, normalmente, não excedem o limite especificado de 95% até 105%.

Qualquer carga que apresenta variação de corrente, principalmente da componente reativa, pode causar flutuação de tensão; fornos a arco, laminadores e máquinas de solda são as cargas mais comuns que geram este distúrbio em sistemas de distribuição e transmissão.

Como principal efeito da flutuação de tensão, pode-se destacar o fenômeno “Flicker”, que é observado pelo olho humano por meio do sistema de iluminação.



10 - VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA

Em sistemas elétricos, a frequência está diretamente relacionada à rotação dos geradores do sistema. Em qualquer instante, a frequência depende do balanço entre a carga e a geração disponível. Quando este equilíbrio é alterado, pequenas variações de frequência deverão ocorrer.

Variações de frequência que ultrapassam os valores limites das condições normais de regime permanente são, normalmente, causadas por faltas no sistema de transmissão, desconexão de grandes blocos de carga e saída de grandes parques de geração.

As variações de frequência podem afetar a operação normal de máquinas rotativas, mas, devido a interconexão dos sistemas elétricos modernos, estes distúrbios são raros de ocorrer. Elas são mais prováveis de acontecer em sistemas de consumidores que possuam geração própria, quando passam a operar na configuração isolada.

Referência bibliográfica

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. Wayne. *Electrical Power Systems Quality*. MCGRAW-HILL, 1996.

OLESKOVICS, Mario. *Qualidade de energia elétrica*. Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Elétrica, USP, 2007.

Julian Villelia Padilla é engenheiro eletrícista pela Escola de Engenharia Mauá, diretor da Enerenge Engenharia, consultor e palestrante nas áreas de eficiência energética e correção de reativos.