



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DISCIPLINA: TRABALHO CONCLUSÃO DE CURSO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ELABORAÇÃO DE UMA EMENTA
PARA A DICIPLÍNA DE QUALIDADE
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Aluno: Thyago Tanouss de Brito Maia

Professor Orientador: S.R. Naidu

Setembro, 2006



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Agradecimentos

Primeiro a Deus pela força e coragem.

Aos meus pais, Fernando e Bernadete, que sempre me incentivaram nos estudos.

Aos meus irmãos, Gustavo e Fernanda, pela força no dia a dia.

Aos meus familiares, em especial Tio Carlos, Isabel, Dona Beta e Thayse, pelo acolhimento.

Ao professor orientador Naidu pela sua atenção e sugestões.

A Naylla pela compreensão e incentivo.

Aos meus amigos que me ajudaram de alguma forma.

Lista de Figuras

Figura 1 – Transitório oscilatório provocado por um chaveamento de banco de capacitores	6
Figura 2 – Afundamento de tensão causada pela partida de um motor de indução	7
Figura 3 – Afundamento de tensão em computadores	8
Figura 4 – Diagrama fasorial para diferentes tipos de faltas	10
Figura 5 – Elevação de tensão causada por uma falta fase-terra	10
Figura 6 – Interrupção causada por um curto-circuito	11
Figura 7 – Figura ilustrativa de uma forma de onda distorcida	14
Figura 8 – Ruído	15
Figura 9 - Efeito do flicker	31
Figura 10 – Razão para o aumento da sensibilidade	34
Figura 11 – Curva CBEMA simplificada	35
Figura 12 – Carga retificadora	36
Figura 13 – Curva de afundamento no lado cc	37
Figura 14 – Curva ITIC	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 -Categorias dos distúrbios	5
Tabela 2 - Relativo ao exemplo 4.1	22
Tabela 3 - Valores dos Pesos C e TIF com relação as frequências	25
Tabela 4 - Tolerância aos afundamentos de vários equipamentos	39

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Sumário	v
1. Introdução	1
2. Objetivos	2
2.1 Objetivos Gerais	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. Metodologia	3
4. Capítulos Desenvolvidos	4
4.1. Introdução (Capítulo 1)	4
4.2. Índices de Qualidade de Energia Elétrica (Capítulo 2)	19
4.3. Curva de Aceitabilidade (Capítulo 3)	33
5. Sugestões	41
6. Conclusão	42
7. Referência Bibliográfica	43

1. Introdução

O tema de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) está ocupando espaço cada vez maior em pesquisas, projetos, discussões, congressos, simpósios e etc.

Muitos dos cursos de engenharia elétrica em universidades do Brasil já possuem a disciplina de QEE, em nível de graduação.

O curso de engenharia elétrica da UFCG possui esta disciplina apenas em nível de pós-graduação, onde brevemente será implantada em sua grade curricular em nível de graduação.

2. Objetivos

2.1-Objetivo Geral

Foi realizado um estudo geral de qualidade da energia elétrica visando elaborar uma ementa para a disciplina de qualidade da energia elétrica em nível de graduação, a ser brevemente implantada na grade curricular do curso de engenharia elétrica da UFCG.

2.2-Objetivo Específico

Mostrar a importância da qualidade da energia elétrica nos sistemas elétricos, relacionando os tipos de distúrbios, seus efeitos, e as soluções para os seus tratamentos. Em paralelo, foram desenvolvidos os três primeiros capítulos da apostila para acompanhamento da disciplina de qualidade da energia elétrica.

3-Metodologia

Foi realizado primeiramente um estudo bibliográfico sobre o assunto dos três primeiros capítulos. Em seguida, a elaboração dos textos na referida seqüência: no primeiro capítulo foi feita uma introdução geral sobre o assunto de qualidade de energia, no segundo capítulo foram mostrados os índices de qualidade de energia utilizados no Brasil e em outros países, e o terceiro capítulo foi direcionado às curvas de aceitabilidade ou também chamadas às curvas aceitáveis. O desenvolvimento destes capítulos foi usado como conteúdo do relatório para o trabalho de conclusão de curso.

4-Capítulos Desenvolvidos

4.1-Capítulo 1: Introdução

Diferentes cargas elétricas apresentam diferentes relações tensão x corrente elétrica. Em cargas puramente resistivas, esta relação é linear, sendo o gráfico tensão x corrente uma reta que passa pela origem e tem inclinação igual à resistência ôhmica da carga. Cargas indutivas ou capacitivas também podem ser consideradas lineares, uma vez que a relação entre corrente e tensão se dá através de derivadas ou integrais. A maioria dos equipamentos eletrônicos, porém, não é composta apenas de resistências ôhmicas, indutâncias e capacitâncias. Possuindo semicondutores como diodos e transistores, o que tornam-se completamente não lineares.

Até alguns tempos atrás, nas instalações de baixa tensão, em geral, predominavam as cargas lineares e as cargas ditas não lineares representavam uma pequena parcela do total das cargas usuais e pouco influenciavam no funcionamento das instalações.

Nos últimos anos, no entanto, vem ocorrendo a chamada “revolução eletrônica”, com o uso intensivo e crescente de microcomputadores, UPSs, acionamentos à velocidades variáveis, etc; em instalações comerciais, industriais e residenciais. Essas cargas eletrônicas, tipicamente não lineares, provocam distorções nas ondas de tensão e corrente e passaram a trazer problemas às instalações de baixa tensão.

A partir daí, começaram as discussões a respeito da qualidade da energia elétrica, que pode ser entendida da seguinte forma:

Qualidade da energia elétrica está relacionada às condições de amplitude, forma de onda e frequência da tensão de um sistema elétrico. Manter esses parâmetros dentro de tolerâncias especificadas é, em geral, o objetivo para termos qualidade na energia elétrica.

Os problemas na qualidade da energia elétrica, chamados de distúrbios, podem ter origem em qualquer local do sistema elétrico, desde a geração até a rede interna do próprio consumidor.

Os distúrbios são classificados em categorias, tais como: os transitórios, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, distorção da forma de onda, flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e variação da frequência do sistema. Os distúrbios são caracterizados através do seu conteúdo espectral, sua duração e amplitude, durante sua ocorrência. Os valores típicos estão indicados na tabela 1.

Tabela 1-Categorias dos Distúrbios.

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
Transitórios Impulsivos:			
<i>Nanosegundo</i>	5 ns	<50ns	
<i>Microsegundo</i>	1 μ s	50 ns – 1ms	
<i>Milsegundo</i>	0,1 ms	> 1ms	
Transitórios Oscilatórios:			
<i>Baixa frequência</i>	< 5 kHz	3-50 ms	0-4 pu
<i>Média frequência</i>	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu
<i>Alta frequência</i>	0,5-5 MHz	5 μ s	0-4 pu
VTCDs Instantâneas:			
<i>Afundamento de tensão</i>		0,5-30 ciclos	0,1-0,9 pu
<i>Elevação de tensão</i>		0,5-30 ciclos	1,1-1,8 pu
VTCDs Momentâneas:			
<i>Interrupção</i>		0,5 ciclos-3 s	<0,1 pu
<i>Afundamento de tensão</i>		30 ciclos-3 s	0,1-0,9 pu
<i>Elevação de tensão</i>		30 ciclos-3 s	1,1-1,4 pu
VTCDs temporária:			
<i>Interrupção</i>		3s-1 minuto	<0,1 pu
<i>Afundamento de tensão</i>		3s-1 minuto	0,1-0,9 pu
<i>Elevação de tensão</i>		3s-1 minuto	1,1-1,2 pu
VTLDs:			
<i>Subtensão sustentada</i>		>1 minuto	0,8-0,9 pu
<i>Sobretensão sustentada</i>		>1 minuto	1,1-1,2 pu
<i>Interrupção sustentada</i>		>1 minuto	0,0 pu
Distorção da forma de onda:			
<i>Harmônicos</i>		Regime permanente	0-20%
<i>Interharmônicos</i>	0-6 kHz	Regime permanente	0-2%
<i>Ruído</i>	Faixa ampla	Regime permanente	0-1%
<i>Nível CC</i>		Regime permanente	0-0,1%
<i>Flutuação de tensão</i>	<25 Hz	Intermitente	0,1-7%
<i>Desequilíbrio de tensão</i>		Regime permanente	0,5-2%
<i>Variação da frequência do sistema</i>		<10 s	

A seguir será descrito, de forma breve, cada um dos distúrbios vistos na tabela 1.

Os Transitórios:

Os transitórios são classificados em dois grupos: os transitórios impulsivos e os oscilatórios.

Os transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas e pode ser definido como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade positiva ou negativa, e com frequência diferente daquela da rede elétrica [5]. Após uma descarga atmosférica, a chamada corrente de descarga pode causar problemas de qualidade de energia no sistema de aterramento, entre eles temos:

*A elevação do potencial do terra local, em relação a outros terras, em vários kV.

Este tipo de problema pode causar falhas em um computador conectado ao telefone através de um *modem*.

*Indução de altas tensões nos condutores fase.

Os transitórios oscilatórios são decorrentes da energização de linhas, corte de carga indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores (ver figura 1) e transformadores.

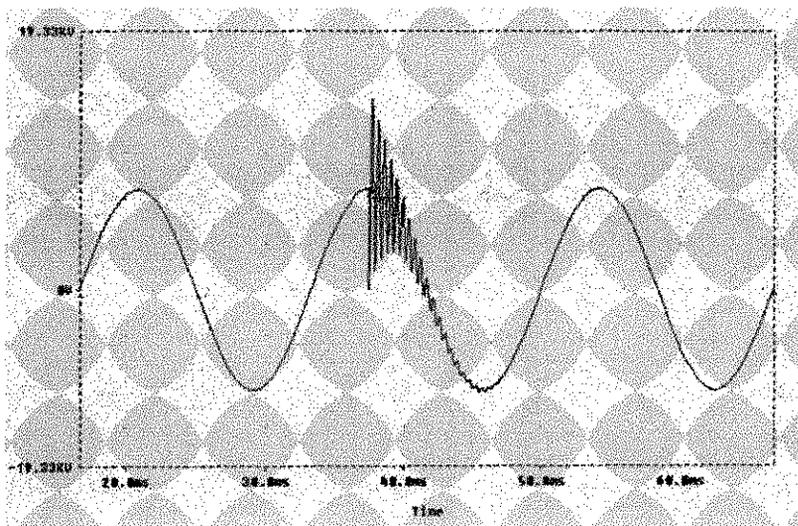


Figura 1 – Transitório oscilatório provocado por um chaveamento de banco de capacitores.

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD):

As VTCDs apresentam duração típica entre 0,5 ciclos a 1 minuto, onde pode ocorrer um afundamento de tensão, elevação de tensão ou até mesmo interrupção. Dependendo do tempo de ocorrência destes fenômenos as VTCDs podem ser subdivididas em instantâneas, momentâneas ou temporárias, como é mostrado na tabela 1 [5].

Afundamento de tensão:

Afundamento de tensão, também conhecido como *voltage sag*, é definido pelo IEEE como sendo a redução do valor rms da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 pu, durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Dependendo da duração do afundamento de tensão, pode-se classificar em:

- *Instantâneos: entre 0,5 ciclo e 30 ciclos;
- *Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- *Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

A figura 2 representa um exemplo de afundamento de tensão provocada pela partida de um motor de indução. Como sabemos, a corrente de partida absorvida pelo motor é de 6 a 10 vezes a corrente nominal, o que resulta em uma queda de tensão na alimentação.

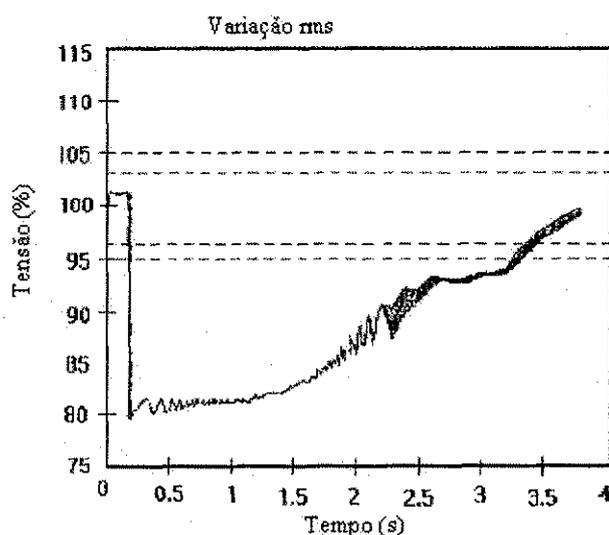


Figura 2 – Afundamento de tensão causada pela partida de um motor de indução.

Para um sistema onde a tensão em regime permanente é considerada 1 pu, um afundamento de 30% significa uma redução na tensão de 0,3 pu, ou seja, a tensão resultante é igual a 0,7 pu. Afundamento de tensão com período inferior a 10 ms e queda na amplitude menor que 10% não são levados em consideração, devido ao fato que os distúrbios com duração inferior a 10 ms são considerados como transitórios e quedas de tensão menor que 10% são tolerados pela maioria dos equipamentos elétricos.

Para análise de qualidade de energia elétrica uma redução da tensão para um patamar abaixo de 0,1 pu é considerado como sendo uma interrupção.

A figura 3 mostra um caso de afundamento na tensão de alimentação que esta suprindo um computador. Para o primeiro caso (sinal superior na figura 3), ocorre um afundamento de 40% com uma duração de 100 ciclos na tensão de alimentação, e a tensão de operação do computador não sofre nenhuma alteração. Já no segundo caso (sinal inferior na figura 3) ocorre um afundamento de 50% na tensão de alimentação com duração de 11 ciclos, fazendo com que ocorra o desligamento do equipamento. Estas relações de amplitude e duração dos distúrbios serão mais bem entendidas no assunto de curva de aceitabilidade vista mais adiante.

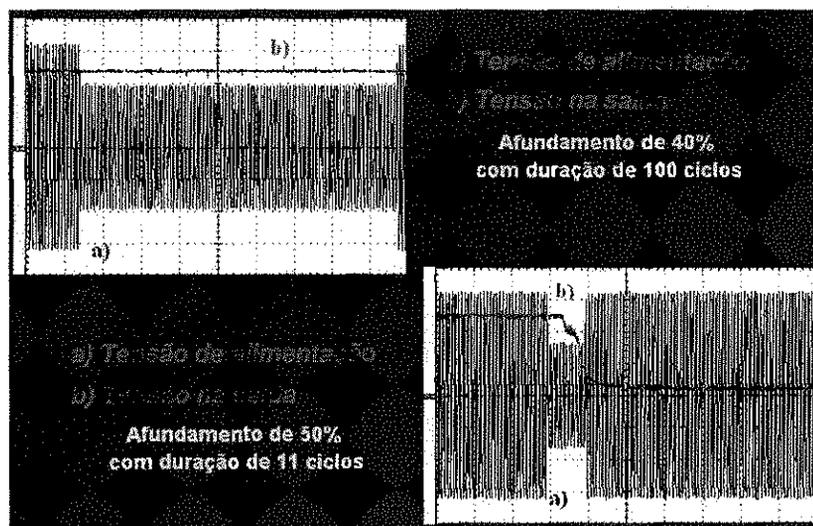


Figura 3 – Afundamento de tensão em computadores.

As causas dos afundamentos de tensão são:

- * Partida de motores de grande porte;
- * Energização de transformadores e de grandes cargas;
- * Ocorrência de faltas nos sistemas de transmissão e distribuição.

A maioria das ocorrências de afundamentos de tensão são devidas às faltas nas linhas aéreas, principalmente nos sistemas de distribuição por estarem, geralmente, desprovidos de cabos guardas.

Os diferentes tipos de faltas que resultam em afundamentos de tensão são mostrados na figura 4, na forma de diagrama fasorial das tensões de fase.

Na figura 4 os fasores com sub-índices N indicam as tensões pré-faltas e com sub-índices F as tensões durante a falta. Na figura 4 (a) tem-se que a amplitude das três fases durante a falta teve um afundamento de mesma intensidade, sendo este fenômeno provocado por uma falta trifásica. Na figura 4 (b) apenas uma das fases esta com sua amplitude reduzida, neste caso tem-se a ocorrência de uma falta fase 'a' para a terra. Na figura 4 (c) tem-se as tensões 'b' e 'c' com amplitudes reduzidas e seus ângulos de fase diferentes de 120° , podendo ter sido provocados por uma falta de uma fase para a terra ou por uma falta fase-fase. E na figura 4 (d) tem-se duas tensões com variações nas amplitudes e fases e outra fase com variações apenas na amplitude, podendo ter sido provocados por uma falta entre uma fase e a terra ou entre fase-fase.

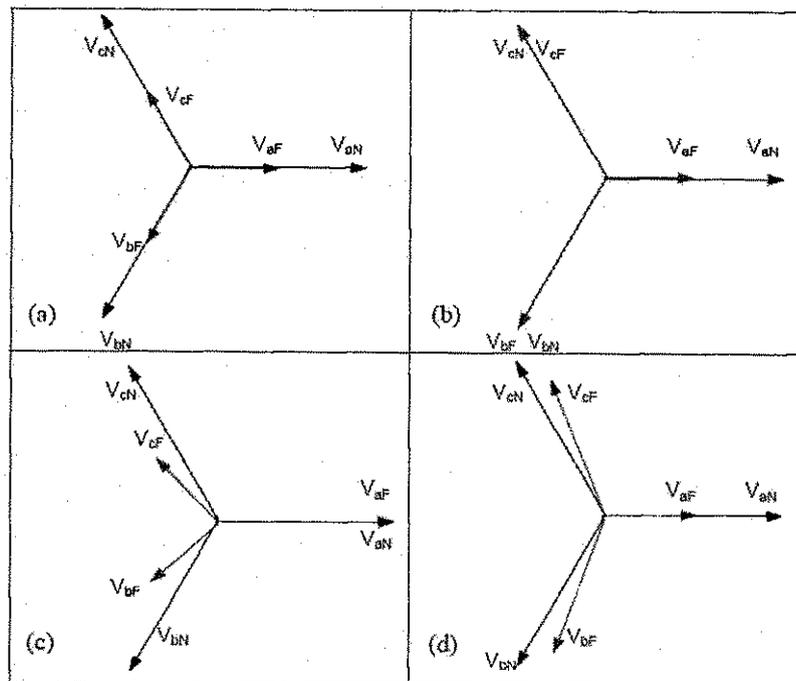


Figura 4 – Diagrama fasorial para diferentes tipos de faltas.

Elevação de tensão:

Elevação de tensão, também conhecida como *voltage swell*, representa um aumento entre 1,1 e 1,8 pu no valor eficaz da tensão na frequência fundamental, podendo ter uma duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. As causas podem ser associadas às faltas no sistema, à eliminação de grandes cargas (como motores e transformadores) ou à energização de grandes bancos de capacitores [5]. A figura 5 representa um exemplo de elevação de tensão provocada por uma falta fase-terra. Durante a ocorrência das faltas, a elevação de tensão é visto apenas na(s) fase(s) ã(s) do circuito.

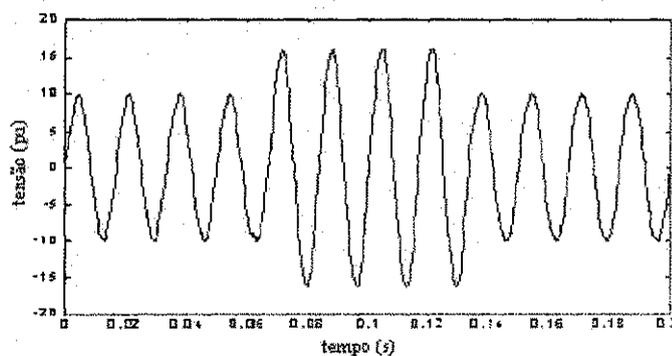


Figura 5 – Elevação de tensão causada por uma falta fase-terra.

Interrupção:

Uma interrupção de curta duração pode ser caracterizada por uma queda na tensão a um valor inferior a 0,1 pu da tensão eficaz por um período de tempo inferior a 1 minuto. Este tipo de interrupção pode ser causado por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle [5]. A figura 6 representa uma interrupção momentânea causada por um curto-circuito, onde se percebe que houve um afundamento de tensão antes da interrupção. O afundamento de tensão ocorre entre a falta do sistema e a operação do sistema de proteção. As interrupções são responsáveis pela saída de operação de diversos equipamentos, interrompendo processos produtivos e causando enormes prejuízos às indústrias.

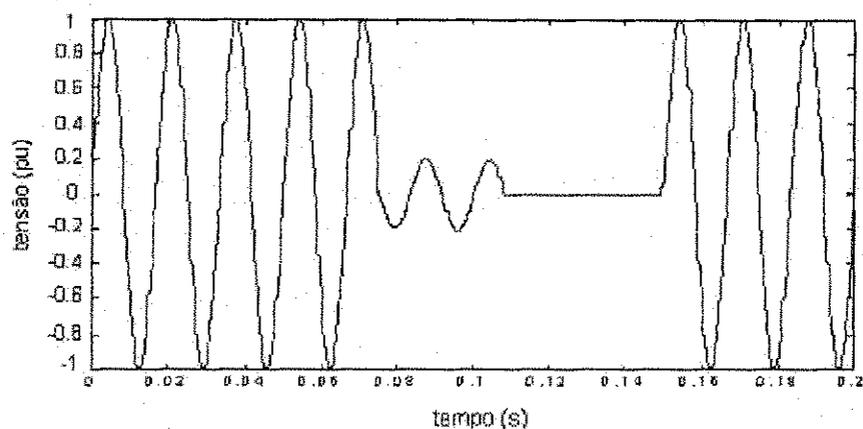


Figura 6 – Interrupção causada por um curto-circuito.

Variação de Tensão de Longa Duração (VTLDs):

As VTLDs são caracterizados como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência fundamental, com tempo de ocorrência maior que 1 minuto. As VTLDs são classificadas em subtensões, sobretensões ou interrupções sustentadas.

Subtensões Sustentadas:

Uma subtensão sustentada é caracterizada por um decréscimo no valor da tensão eficaz a valores menores que 0,9 pu, na frequência fundamental, com tempo de ocorrência maior que 1 minuto.

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. Os 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 reativos transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potencia ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão.

Temos a seguir alguns problemas causados por subtensões de longa duração:

- * Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, como computadores e controladores eletrônicos,
- * Redução de índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente.

As opções para o melhoramento da regulação de tensão são:

- * Instalar reguladores de tensão para elevar o nível de tensão;
- * Instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância;
- * Instalar capacitores *shunt* para reduzir a corrente do circuito;
- * Instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva.

Sobretensões Sustentadas

Uma sobretensão sustentada é caracterizada por um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 pu, na freqüência fundamental, por um tempo de duração maior que 1 minuto [5].

As sobretensões sustentadas podem ser o resultado do desligamento de grandes cargas ou da energização de um banco de capacitores.

Com relação às conseqüências das sobretensões sustentadas, estas podem resultar em falha dos equipamentos. Os dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensão, embora transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs entre

outros, geralmente não apresentem problemas imediatos. Mas, estes equipamentos quando submetidos a este tipo de distúrbio poderão ter suas vidas úteis diminuídas.

Uma das alternativas para solucionar este tipo de distúrbio seria trocar os bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, possibilitando assim um maior controle do nível da tensão.

Interrupções Sustentadas

Interrupção sustentada se define quando a tensão de suprimento permanece em zero por um tempo superior a 1 minuto. Interrupções de tensão por um tempo superior a 1 minuto são freqüentemente permanentes e requerem intervenção da concessionária para reparar o sistema e restaurar o fornecimento de energia.

Existe a chamada interrupção planejada, onde normalmente é feita para executar operações no sistema, como manutenção e reparos na rede.

O sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que o número de interrupções seja mínimo, que dure o mínimo possível e o número de consumidores afetados seja pequeno. As concessionárias utilizam-se de índices para mensurar este tipo de distúrbios, os quais serão descritos mais adiante, no assunto sobre índices de qualidade de energia elétrica.

Uma das soluções para as interrupções que causam desligamento em equipamentos é a utilização de UPS (*Uninterruptible Power Supplies*).

Distorções da Forma de Onda:

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na freqüência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral.

Os principais tipos de distorção da forma de onda são:

*Harmônicos;

*Interharmônicos;

*Ruídos;

*Nível CC.

Harmônicos:

Uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação e com amplitudes diferentes para cada ordem harmônica. As ordens harmônicas são: 1ª harmônica com frequência de 60 Hz, 2ª harmônica com frequência de 120 Hz, 3ª harmônica com 180 Hz, ou seja, nª harmônica com frequência de $n \times 60$ Hz, com n pertencente aos números inteiros. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são originários de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia.

Na figura 7 mostra de forma ilustrativa, uma forma de onda distorcida devido a presença de harmônicos.

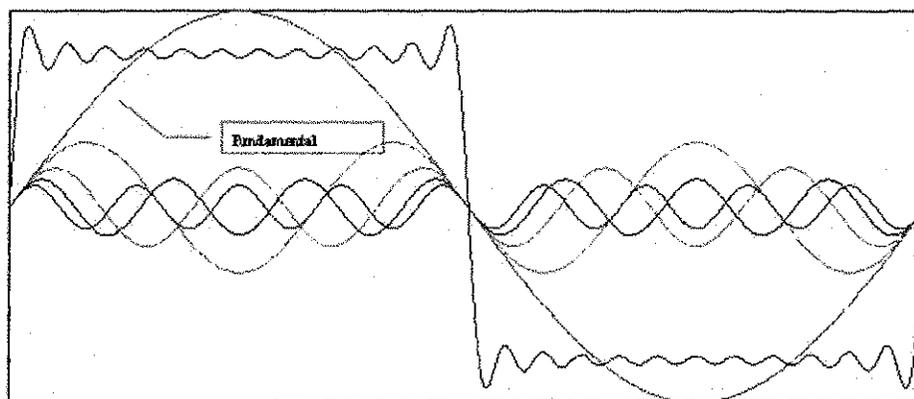


Figura 7 – Figura ilustrativa de uma forma de onda distorcida.

Mesmo a tensão de alimentação sendo senoidal, cargas não lineares produzem correntes não senoidais.

O fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor, prejudica não apenas o consumidor responsável, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

Os efeitos causados pelas distorções harmônicas podem ser enquadrados em problemas de perda da vida útil de transformadores, maquinas rotativas, bancos de capacitores e cabos elétricos; e também em operação errônea ou na falha completa de um equipamento.

Interharmônicos:

As interharmônicas de tensão ou corrente são sinais senoidais com frequências não múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema alimentador.

As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, motores de indução e equipamentos a arco.

Ruídos:

O ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 Hz, as quais são superpostas às tensões ou às correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro em linhas de transmissão.

Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potencia, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido, fontes chaveadas e aterramentos impróprios.

A figura 8 mostra a presença de ruído em um sinal senoidal.

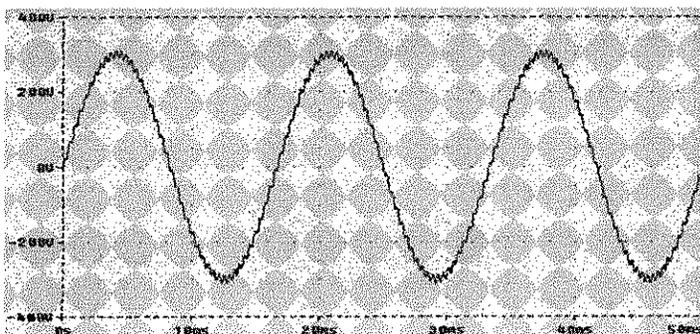


Figura 8 – Ruído.

Nível CC:

A presença de tensão ou corrente CC em um sistema pode ocorrer como resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. Esta tensão ou corrente é chamada de *DC offset*.

Os efeitos que podem ser causados por este tipo de distúrbio são: saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil e também pode causar corrosão dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

Flutuações ou Oscilações de Tensão:

A flutuação de tensão caracteriza-se por uma série de variações na amplitude do sinal, de forma aleatória, repetitiva ou esporádica, dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Os principais causadores das flutuações de tensão são:

- *Fornos a arco elétrico;
- *Laminadores;
- *Máquina de solda elétrica;
- *Motores (partida e cargas intermitentes pesadas).

O efeito mais visível da flutuação é a variação da luminosidade das lâmpadas, a chamada cintilação luminosa (Flicker). Os principais fatores influentes são: a magnitude das variações de tensão que é da faixa de 0,25% e a frequência no valor de aproximadamente 10 Hz (sabendo que a faixa de sensibilidade do olho humano é de 1 a 25 Hz).

Desequilíbrios de Tensão:

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

Um sistema trifásico ideal, livre de desequilíbrios, considerando a fase A como referência e numa seqüência de fase positiva, é dada por:

$$\bar{V}_A = 1,0 \angle 0^\circ$$

$$\bar{V}_B = 1,0 \angle -120^\circ$$

$$\bar{V}_C = 1,0 \angle +120^\circ$$

Os desequilíbrios podem ser caracterizados como a relação entre a componente de seqüência negativa pela componente de seqüência positiva dos sinais de correntes ou tensões trifásicas.

Uma das causas dos desequilíbrios de tensões são as distribuições inadequadas das cargas monofásicas, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa.

Variações na Frequência do Sistema Elétrico:

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema. No sistema elétrico brasileiro a frequência fundamental é de 60 Hz.

As variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente, que é de $60 \pm 0,5$ Hz, podem ser causadas:

- *Faltas em sistemas de transmissão;
- *Saída de um grande bloco de cargas;
- *Saída de operação de uma grande fonte de geração.

A importância em buscar soluções para se ter em um sistema a qualidade da energia elétrica, esta relacionada a fatos como:

*Sensibilidade dos equipamentos: com a diminuição da tensão dos circuitos lógicos dos equipamentos eletrônicos, os equipamentos estão se tornando mais sensíveis as variações da tensão de suprimento;

*Maiores exigências dos consumidores: o aumento de equipamentos eletrônicos nas residências e nos locais de lazeres (como shopping centers) vem proporcionando um maior

conforto e comodidade a sociedade. Um mau funcionamento de tais equipamentos por questão de falta de qualidade na energia elétrica, já é motivo de reclamações à concessionária responsável pelo seu suprimento. Esse é um dos grandes motivos para o aumento da concorrência entre as concessionárias na venda da energia.

*Medidas para a racionalização e eficiência da energia: muitos programas de racionalizações e de eficiência energética (como o PROCEL) vêm surgindo nos últimos anos, com o objetivo principal de economizar energia elétrica. Sendo que muita das ferramentas utilizadas nos programas vem “poluindo” a rede elétrica, causando assim uma perda de qualidade de energia elétrica;

*Questão econômica: a falta de energia elétrica para alguns consumidores (como residenciais), por um curto período, pode não ser tão relevante como para os consumidores industriais. Os custos estimados para uma interrupção de processos por causa de alguns distúrbios, podem chegar a valores altíssimos. O setor siderúrgico é o que sofre mais. Para se ter uma idéia, o custo estimado devido à interrupção de um processo por um intervalo inferior a 1 minuto, neste setor, pode atingir um valor de 600 mil dólares.

4.2-Capítulo 2: Índices de Qualidade de Energia Elétrica

Após a privatização da maioria das concessionárias de energia elétrica, a ANEEL criou o conceito de consumidor livre, que são consumidores de energia elétrica com demanda acima de 3 MW e alimentados com tensão igual ou superior a 69 kV, que possui o direito de compra de energia elétrica não apenas da concessionária que possui a concessão da área onde o consumidor está instalado.

Neste ambiente de livre mercado, cresce muito a importância na qualidade da energia elétrica entregue e o seu acompanhamento. No Brasil, o desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido pela ANEEL através de indicadores específicos, denominados de DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC.

4.1.1 DEC:

O DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) indica o número de horas, em média, que um consumidor fica sem energia elétrica em um determinado intervalo de tempo, normalmente mensal.

Cálculo do DEC:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)T(i)}{Cs} \quad (4.1)$$

i = número de interrupções de 1 a n ;

$T(i)$ = tempo de duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerados;

$Ca(i)$ = número de consumidores do conjunto considerado, atingido pela interrupção;

Cs = número de consumidores do conjunto considerado.

4.1.2 FEC:

O FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora) indica quantas vezes, em média, houve interrupção por unidade consumidora.

Cálculo do FEC:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{Cs} \quad (4.2)$$

4.1.3 DIC:

O DIC (duração de interrupção por unidade consumidora) indica quanto tempo uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado.

Cálculo do DIC:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.3)$$

t_i = duração da i -ésima interrupção durante um período determinado.

Só devem ser consideradas as interrupções cuja duração seja igual ou maior que 1 minuto.

4.1.4 FIC:

O FIC (frequência de interrupção por unidade consumidora) indica quantas vezes uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado.

Cálculo do FIC:

$$FIC = n \quad (4.4)$$

n = número de interrupção com duração igual ou maior que 1 minuto.

4.1.5 DMIC:

O DMIC (duração máxima de interrupção por unidade consumidora) é o indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo.

4.2 Índices em outros países

Os principais índices de qualidade de energia em outros países são *THD*, *TIF*, produtos *V.T* e *I.T*, *DIN*, índice *C*, flicker.

Os objetivos dos índices de qualidade de energia são:

- Quantificar:
 - O grau de distorção da onda de tensão.
 - As perdas adicionais, devido essas distorções.
 - O impacto sobre os sinais de telefonia e comunicação.
- Condensar informação em um número.
- Servir como uma base de comparação.

4.2.1 Distorção Harmônica Total – *THD*

Seja $v(t)$ um sinal periódico, com frequência fundamental f_1 , composta de componentes harmônicas com valores eficazes $V_2, V_3, V_4, \dots, V_i$ nas frequências $f_2, f_3, f_4, \dots, f_i$, respectivamente. Então, a *THD* é expressa da seguinte forma:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2}}{V_1} \quad (4.5)$$

Frequentemente a *THD* é expressa em porcentagem, multiplicando-se a equação (4.5) por 100.

O truncamento no somatório normalmente é feito na 25ª harmônica, já que os instrumentos (TPs e TCs) são limitados a uma frequência de 1.6 kHz.

Para um sistema trifásico equilibrado, as três fases terão a mesma *THD*, diferentemente para o caso de um sistema trifásico desequilibrado, onde para cada sinal (tensão ou corrente) de fase terá uma *THD* diferente.

Propriedades:

- A *THD* é zero para uma senoidal perfeita;
- À medida que a distorção aumenta a *THD* também aumenta;
- Em sistemas de distribuição a *THD* não deve exceder 5%;

A *THD* tem a vantagem de ser facilmente calculada e de forma rápida.

Exemplo 4.1

Para cada sinal da tabela 2, calcule a *THD*.

Sinal	Tensão Fundamental (Valores Eficazes)	Tensões Harmônicas (Valores Eficazes)							
		5	7	11	13	17	19	23	25
1	444.9	70.9	50.0	39.1	25.0	20.0	10.0	2.1	10.0
2	440.9	71.0	12.9	6.2	5.2	0.9	1.5	57.2	36.9
3	440.9	12.3	12.8	5.9	5.1	10.1	8.3	20.0	55.7
4	439.7	13.0	8.5	5.7	5.1	0.8	1.7	17.8	49.7

Tabela 2- Relativo ao exemplo 4.1

Para o sinal 1, temos

$$THD = \frac{\sqrt{70.9^2 + 50.0^2 + 39.1^2 + 25.0^2 + 20.0^2 + 10.0^2 + 2.1^2 + 10.0^2}}{444.9}$$

$$THD = 0.228$$

Em resumo:

Sinal	<i>THD</i>
1	22.8%
2	22.6%
3	14.4%
4	12.6%

4.2.2 Fator da Influência Telefônica-TIF

A *TIF* é um índice que está relacionado com a percepção auditiva humana e também na interferência imposta pelo circuito de potencia, no circuito de comunicação adjacente, levando em conta a indução eletromagnética entre dois circuitos.

A *TIF* é definida como:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (\rho_i V_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (V_i)^2}} \quad (4.6)$$

Onde ρ_i é o peso da *i*-ésima harmônica.

Estes pesos ρ_i são tabelados (tabela 3) e são funções da frequência. Como estes estão relacionados à percepção auditiva humana e sabendo que a característica auditiva é mais sensível na banda de frequência entre 2400-2880 Hz, podemos observar na tabela 3 que para esse intervalo de frequência os pesos ρ_i são maiores.

Se somente a *i*-ésima harmônica está presente na adição com a frequência fundamental, podemos escrever a equação (4.6) da seguinte forma:

$$TIF = \frac{\sqrt{\rho_1^2 + \rho_i^2 \left(\frac{V_i}{V_1}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_i}{V_1}\right)^2}} = \frac{\sqrt{\rho_1^2 + \rho_i^2 THD^2}}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Neste caso, a $THD = \left(\frac{V_i}{V_1}\right)$.

Elevando ambos os membros da equação anterior ao quadrado, temos:

$$TIF^2 = \frac{\rho_1^2 + \rho^2 THD^2}{1 + THD^2} \quad (4.7)$$

A TIF é normalmente aplicada a corrente de linha, já que a natureza da indução eletromagnética está relacionada com a corrente de linha. Ou seja, a corrente de linha do circuito de potência (circuito trifásico) faz induzir uma tensão no circuito de comunicação (circuito monofásico) adjacente. Com isso, as correntes das três fases do circuito de potência irão induzir três tensões, defasadas de 120°, na fase do circuito de comunicação.

Considerando as seqüências de fase da corrente do circuito de potências, pode-se observar que não haverá diferença entre a interferência causada pela corrente de seqüência positiva e a de seqüência negativa. Pois, a tensão induzida resultante no circuito de comunicação será uma soma fasorial das três componentes de tensão induzida. Para a seqüência zero, em um circuito trifásico equilibrado, as três correntes estão em fase. Neste caso, a tensão induzida total no circuito de comunicação será a soma algébrica das três componentes de tensão induzida. Com isso, tem-se que a interferência causada pela corrente de seqüência zero é mais relevante que as de seqüência positiva ou negativa.

Se for levada apenas em consideração a seqüência positiva e negativa para o cálculo da *TIF* ou da *THD*, consideram-se no numerador apenas as harmônicas de seqüência positiva e negativa. As correntes de seqüência positiva e negativa são chamadas correntes balanceadas e para o caso de corrente de seqüência zero, utiliza-se o termo corrente residual. Com isso temos que,

$$TIF^2 = TIF_{balance.}^2 + TIF_{resid.}^2 \quad (4.8)$$

Ou, para o caso da *THD*,

$$THD^2 = THD^2_{balanc.} + THD^2_{resid.} \quad (4.9)$$

Onde,

$$THD_{Balanc.} = \sqrt{THD^2_{+} + THD^2_{-}}$$

$$THD_{Resid.} = THD_0$$

Em resumo, a *TIF* é um índice especialmente útil para avaliar o grau de interferência nos circuitos de comunicação analógico. Mas, atualmente há casos onde o circuito de comunicação é o PCM (*Pulse Code Modulate*), e a *TIF* não terá como medir essa interferência.

Frequência (Hz)	Harmônicos de 60 Hz	Pesos C de mensagens	<i>TIF</i> ρ_i	Frequência (Hz)	Harmônicos de 60 Hz	Pesos C de mensagens	<i>TIF</i> ρ_i
60	1	0.0017	0.5	1740	29	0.841	7320
120	2	0.0167	10.0	1800	30	0.841	7570
180	3	0.0333	30.0	1860	31	0.841	7820
240	4	0.0875	105	1920	32	0.841	8070
300	5	0.1500	225	1980	33	0.841	8330
360	6	0.222	400	2040	34	0.841	8580
420	7	0.310	650	2100	35	0.841	8830
480	8	0.396	950	2160	36	0.841	9080
540	9	0.489	1320	2220	37	0.841	9330
600	10	0.597	1790	2280	38	0.841	9590
660	11	0.685	2260	2340	39	0.841	9840
720	12	0.767	2760	2400	40	0.841	10090
780	13	0.862	3360	2460	41	0.841	10340
840	14	0.912	3830	2520	42	0.832	10480
900	15	0.967	4350	2580	43	0.822	10600
960	16	0.977	4690	2640	44	0.804	10610
1020	17	1.000	5100	2700	45	0.776	10480
1080	18	1.000	5400	2760	46	0.750	10350
1140	19	0.988	5630	2820	47	0.724	10210
1200	20	0.977	5860	2880	48	0.692	9960
1260	21	0.960	6050	2940	49	0.668	9820
1320	22	0.944	6230	3000	50	0.645	9670
1380	23	0.923	6370	3300	55	0.490	8090
1440	24	0.924	6650	3600	60	0.359	6460
1500	25	0.891	6680	3900	65	0.226	4400
1560	26	0.871	6790	4200	70	0.143	3000
1620	27	0.860	6970	4500	75	0.0812	1830
1680	28	0.840	7060	4990	83.3	0.0336	840

Tabela 3-Valores dos Pesos C e TIF com relação às frequências.

4.2.3 Produto $V.T$ e $I.T$

O índice THD não dá informação sobre a amplitude do sinal, por exemplo, um sinal de tensão com um THD de 5%, pode ser um sinal de alta ou baixa tensão. O produto $V.T$ e $I.T$ são índices alternativos na qual incorpora a amplitude do sinal.

O produto $V.T$ é definido como:

$$V.T = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (\rho_i V_i)^2} \quad (4.10)$$

Onde ρ_i são os pesos da TIF e V_i são as tensões linha-linha das componentes harmônicas 'i'.

Às vezes utiliza-se a notação $KV.T$, onde esse K denota que o índice está sendo multiplicado por 1000.

Da equação (4.6) e (4.10), podemos escrever:

$$TIF_v V_{RMS} = V.T \quad (4.11)$$

sabendo que $V_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (V_i)^2}$.

Da equação (4.10), temos para uma frequência 'i' qualquer que:

$$V.T_i = \rho_i V_i \quad (4.12)$$

Logo,

$$V.T = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (V.T_i)^2} \quad (4.13)$$

A mesma análise pode ser feita para o produto $I.T$, ou seja,

$$I.T = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (\rho_i I_i)^2} \quad (4.14)$$

$$TIF_i I_{RMS} = I.T \quad (4.15)$$

$$I.T_i = \rho_i I_i \quad (4.16)$$

$$I.T = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (I.T_i)^2} \quad (4.17)$$

Na qual I_i são as correntes de linha das componentes harmônicas.

Exemplo 4.2

Uma carga resistiva está ligada em um barramento de 69 kV. Medições na subestação indicam que a tensão no barramento é de 69.1 kV e a potência entregue, na frequência fundamental, é de 16 MVA, com fp igual a 1.0. As medições indicam que a tensão na 3ª harmônica é de um 1 kV linha-linha, e na 5ª harmônica é de 500 V. A frequência fundamental é de 60 Hz. Calcular a *THD* e *TIF* para a tensão e corrente de carga. Também calcular os produtos *K.VT* e *I.T*.

Solução:

Cálculo da corrente na frequência fundamental:

$$|I_1| = \frac{P/3}{V_1/\sqrt{3}} = \frac{16M/3}{69.1k/\sqrt{3}} = 133.685 \text{ A/ fase}$$

Cálculo da resistência da carga:

$$R = \frac{V_1/\sqrt{3}}{I_1} = \frac{69.1k/\sqrt{3}}{133.685} = 298.425\Omega / \text{fase}$$

Cálculo da amplitude da corrente da 3ª e 5ª harmônica:

$$|I_3| = \frac{V_3/\sqrt{3}}{R} = \frac{1000/\sqrt{3}}{298.425} = 1.935 \text{ A/ fase}$$

$$|I_5| = \frac{V_5/\sqrt{3}}{R} = \frac{500/\sqrt{3}}{298.425} = 0.967 \text{ A/ fase}$$

Cálculo das *THD* residual, balanceadas e total:

Para tensão,

$$THD_{resid.} = \frac{\sqrt{(1.0)^2}}{69.1} = 0.01447$$

$$THD_{balanc.} = \frac{\sqrt{(0.5)^2}}{69.1} = 0.00724$$

$$THD_{total.} = \frac{\sqrt{(1.0)^2 + (0.5)^2}}{69.1} = 0.01618$$

Para corrente,

$$THD_{resid.} = \frac{\sqrt{(1.935)^2}}{133.685} = 0.01447$$

$$THD_{balanc.} = \frac{\sqrt{(0.967)^2}}{133.685} = 0.00723$$

$$THD_{total.} = \frac{\sqrt{(1.935)^2 + (0.967)^2}}{133.685} = 0.01618$$

Cálculo das *TIF* residual, balanceada e total:

Obs.: na tabela (4.2) temos que os pesos da *TIF* para as frequências de 60, 180 e 300 Hz são respectivamente 0.5, 30 e 225.

Então,

Para tensão,

$$TIF_{resid.} = \frac{\sqrt{30(1.0)^2}}{\sqrt{(69.1)^2 + (1)^2 + (0.5)^2}} = 0.07925$$

$$TIF_{balanc.} = \frac{\sqrt{(225 \times 0.5)^2 + (0.5 \times 69.1)^2}}{\sqrt{(69.1)^2 + (1)^2 + (0.5)^2}} = 1.70290$$

$$TIF_{total.} = \frac{\sqrt{(0.5 \times 69.1)^2 + (30 \times 1)^2 + (225 \times 0.5)^2}}{\sqrt{(69.1)^2 + (1)^2 + (0.5)^2}} = 1.75736$$

4.2.4 Índice de distorção (DIN)

Utilizado na Europa, o índice de distorção é definido como:

$$DIN = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2}{\sum_{i=1}^{\infty} (V_i)^2}} \quad (4.18)$$

Elevando ambos os membros ao quadrado e relembrando a equação (4.5), temos

$$DIN^2 = \frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2}{\sum_{i=1}^{\infty} (V_i)^2} = \frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2}{(V^{(1)})^2 + \sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2} = \frac{(V_1)^2 THD^2}{(V_1)^2 + (V_1)^2 THD^2}$$

Simplificando,

$$DIN^2 = \frac{THD^2}{1 + THD^2}$$

Com isso, temos as seguintes relações entre a *DIN* e a *THD*:

$$DIN = \frac{THD}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (4.19)$$

E,

$$THD = \frac{DIN}{\sqrt{1 - DIN^2}} \quad (4.20)$$

Ou seja, conhecendo a *THD* encontra-se a *DIN* e vice-versa.

Observa-se que para pequenas distorções a *DIN* é aproximadamente igual à *THD* e para grandes distorções a *DIN* se torna unitário e a *THD* infinita.

4.2.5 Pesos C de Mensagens

São pesos usados no cálculo de interferência com sistemas de transmissão de informação, através do índice C, que é definido como:

$$C = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (c_i I_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (I_i)^2}} \quad (4.21)$$

Também podendo ser aplicado ao sinal de tensão.

Os pesos c_i são tabelados, ver tabela (4.2), e possui uma relação com os pesos TIF ρ_i mostrado a seguir:

$$\rho_i = 5if_0 c_i \quad (4.22)$$

4.2.6 Flicker

Flicker é a flutuação na amplitude de um sinal de tensão, numa frequência muito menor que a frequência nominal.

Considerando um sinal de tensão $V_m \cos(\omega_0 t)$ e a flutuação senoidal de frequência ω_f , modulamos o sinal de tensão com o sinal $V_f \cos(\omega_f t)$, onde V_f é amplitude flicker.

Com isso a componente flicker no sinal de tensão é:

$$v_f(t) = V_f \cos(\omega_f t) V_m \cos(\omega_0 t) \quad (4.23)$$

Então, o sinal de tensão total é:

$$v(t) = V_m \cos(\omega_0 t) + V_f \cos(\omega_f t) V_m \cos(\omega_0 t)$$

Ou,

$$v(t) = V_m \cos(\omega_0 t) (V_f \cos(\omega_f t) + 1) \quad (4.24)$$

Podemos especificar a relação entre a amplitude da flutuação com a amplitude do sinal de tensão, através do índice de flicker (F):

$$F = \frac{|\Delta V|}{V_m} \quad (4.25)$$

Onde $|\Delta V|$ é a variação da amplitude da flutuação.

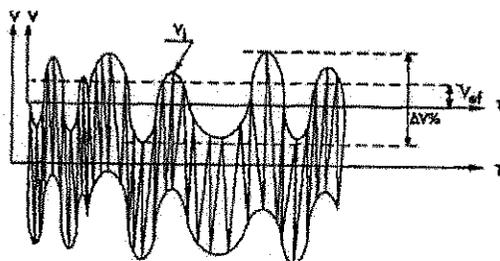


Figura 9 – Efeito do flicker

Exemplo 4.3

Considere um sistema de distribuição com tensão nominal de 4400 V. Um processo industrial alimentado pelo sistema é responsável pelo flicker. A amplitude da tensão cai para 4205 V (linha-linha), quando o processo está em operação e sobe para 4440 V quando sai de operação. Neste caso o fator de flicker é:

$$F = \frac{|4440 - 4205|}{4400} = 5.3\%$$

4.2.7 Ambigüidades entre os índices de Qualidade

a) A *THD* caracteriza a amplitude dos harmônicos em relação à amplitude fundamental, sendo que em alguns sinais a fundamental não está presente. Por exemplo,

$$i(t) = I_1 \cos(2\pi 60t + \phi_1) + I_2 \cos(2\pi 68t + \phi_2)$$

Neste caso, o sinal é periódico e contém duas frequências (60 e 68 Hz). A frequência fundamental é 4 Hz.

Já o índice de distorção (*DIN*) evita o problema da ausência da amplitude fundamental.

b) Os índices apresentados são definidos para sinais periódicos. Uma proposta para a *THD* ser aplicado a sinais aperiódicos é fazer:

$$THD = \frac{I_{RMS} - I_1}{I_1} \quad (4.26)$$

$$\text{Onde, } I_{RMS} = \lim_{t \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t+T} I^2 dt}$$

4.3-Capitulo 3: Curva de Aceitabilidade

Antes de começar a descrever sobre a curva de aceitabilidade, é interessante ter uma visão geral sobre os equipamentos sensíveis.

Os equipamentos sensíveis são encontrados quase em todos os escritórios, fábricas, estabelecimentos comerciais, em hospitais, universidade e em muitas outras localizações. Essa categoria de equipamentos não inclui apenas computadores e periféricos usados para processamento de dados, mas também servidores de internet, equipamentos de telecomunicações, instrumentação, controle de computadores, etc [3].

A maior necessidade desses equipamentos é uma fonte de energia confiável, um sistema de aterramento e um sistema de proteção contra transitórios.

Quando qualidade de energia é discutida, frequentemente erra-se assumindo que somente o computador é afetado. Isso se deve ao fato de que os computadores processadores de dados estão dentro das primeiras cargas significantes, que nem sempre operavam de forma confiável com a energia fornecida pela concessionária. Entretanto com a chegada do microprocessador, passou-se a existir muitos equipamentos que operam com os níveis de tensão similar aqueles dos computadores processadores de dados.

O problema que surge com esses equipamentos é que à medida que a velocidade de operação dos circuitos desses equipamentos aumenta, ocorre a redução das tensões lógicas. Tal relação não é acidental. O motivo é que quanto mais transistores e outros dispositivos são “empacotados” juntos na mesma superfície, o espaço entre eles é diminuído. Esta distancia reduzida entre os componentes ajuda a diminuir a velocidade da resposta do circuito. Por outro lado, se a tensão do circuito permanece a mesma, a montagem muito próxima dos circuitos aumentaria a probabilidade da corrente procurar um caminho mais curto para a terra, causando uma falha no isolamento entre dois componentes adjacentes. A

forma de prevenir isto é reduzir a tensão do circuito. A desvantagem é que estes circuitos são mais susceptíveis aos mesmos pulsos de ruído existentes nas redes de energia elétrica.

A figura 10 mostra a razão para o aumento da sensibilidade. Com os maiores níveis do sinal de tensão em (A), os pulsos de ruído são sobrepostos pelo sinal lógico de tensão. Com esta alta relação sinal-ruído, o circuito responde só ao sinal apropriado.

No ponto (B), a taxa de subida e descida dos sinais digitais lógicos tem sido acelerado e ao mesmo tempo o nível de tensão diminuído, como já dito. Com o nível do sinal reduzido de 20-30 V para 3-5 V, o mesmo nível de ruído previamente mostrado, agora se torna um problema. O circuito lógico pode interpretar os picos de tensão-ruído como sinais normais e conseqüentemente gerar respostas de processamento errados.

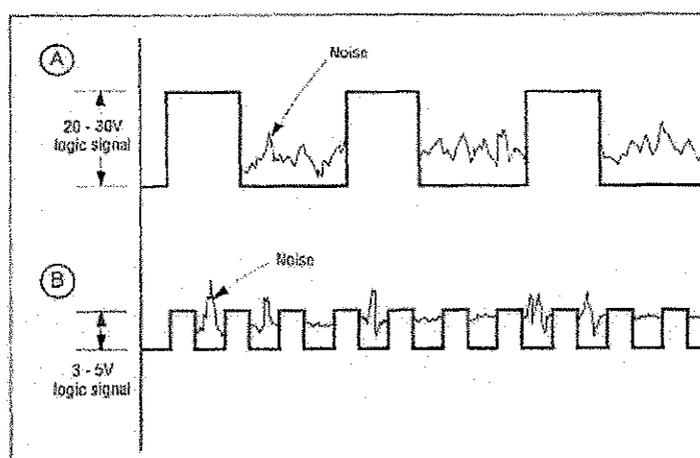


Figura 10 – Razão para o aumento da sensibilidade

Atualmente, a situação é a ainda mais crítica. Circuito lógico tem agora sido gerado entre 0,5-1 V, onde até aquele que era considerado o menor ruído é agora uma ameaça em potencial para a operação correta do sistema [3]. Onde agora o lado de tentar solucionar este problema seria em reduzir as condições de ruído.

Há vários tipos de distúrbios de energia que podem afetar equipamentos eletrônicos. A curva CBEMA ajuda a entender como cada tipo que tem sido registrado influenciará na operação do sistema.

Esta curva foi desenvolvida por varias pessoas na indústria de computadores para indicar caminhos em que a confiabilidade do sistema poderia ser provida para seus equipamentos eletrônicos.

A curva é um perfil da susceptibilidade. Para melhor explicar o seu significado, temos a curva simplificada na figura 11 [3]. O eixo vertical é o percentual de tensão que é aplicado ao circuito, e o eixo horizontal é o tempo (em μs à s). O centro do gráfico é uma área aceitável e fora dessa área é uma área de risco acima e abaixo. A zona de risco acima envolve tolerância de equipamento à nível de tensão. A zona de risco abaixo envolve a tolerância do equipamento a redução da energia aplicada. Seguindo esse raciocínio observamos que se a fonte de tensão permanecer na área aceitável o equipamento de estado sólido ira operar bem. Com isso, é de grande importância que as concessionária tenham também as curvas relacionadas aos pontos de entrega da energia, para que se faça uma comparação com as curvas dos equipamentos utilizados pelos seus clientes. Com o intuito de possíveis ajustes necessários.

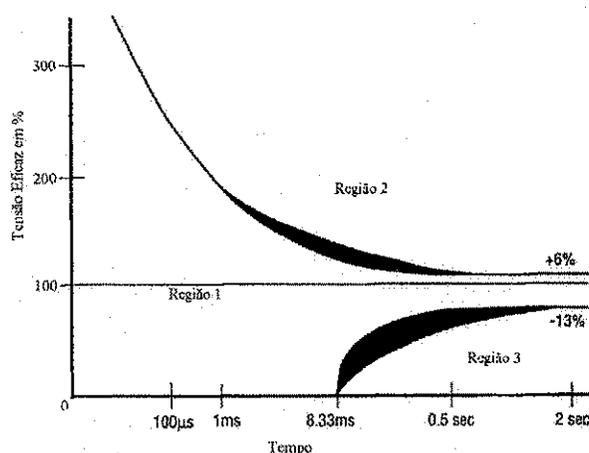


Figura 11 – Curva CBEMA simplificada

Na figura 11 observa-se que em regime, a tensão deve estar limitada a uma sobretensão de 6% e uma subtensão de 13%. Observa-se que quanto menor tempo a perturbação, maior a alteração é admitida, uma vez que os elementos armazenadores de

energia interna ao equipamento devem ser capazes de absorver-la. Assim, por exemplo, a tensão pode ir a zero por meio ciclo (8,33 ms) ou ainda haver um surto de tensão com 3 vezes o valor nominal, desde que, com duração inferior a 100 μ s.

As curvas definem um envelope dentro do qual deve estar o valor eficaz da tensão suprimida ao equipamento. Ou seja, quando os limites forem violados, o sistema de alimentação ininterrupto deve atuar, no sentido de manter a alimentação dentro de valores aceitáveis.

Na figura 11 observam-se três regiões:

Região 1: Região de tolerância para computadores.

Região 2: Região sujeita a danos ao equipamentos por elevação de tensão.

Região 3: Região sujeita a mau funcionamento ou desligamento do equipamento por afundamento de tensão.

Demonstração da curva CBEMA:

A melhor maneira de demonstrar a curva CBEMA é por meio de um padrão de tensão aplicado ao circuito retificador.

Considera-se uma ponte retificadora com carga RLC no lado cc, como mostra a figura 12.

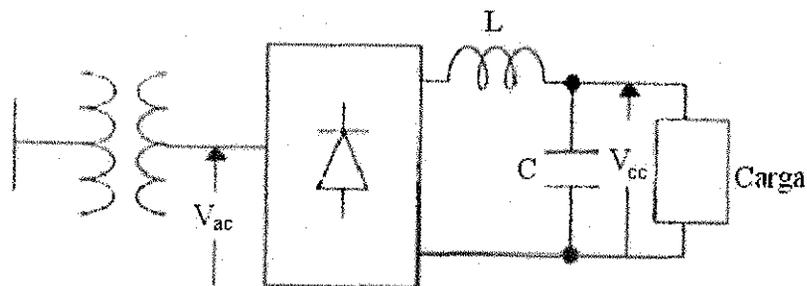


Figura 12 – Carga retificadora.

Com uma tensão de 1 pu no lado ca, tem-se no lado cc uma tensão de valor nominal 1 pu. Para um afundamento de tensão no lado ca, a tensão cc irá afundar para um novo valor, como pode ser visto na figura 13.

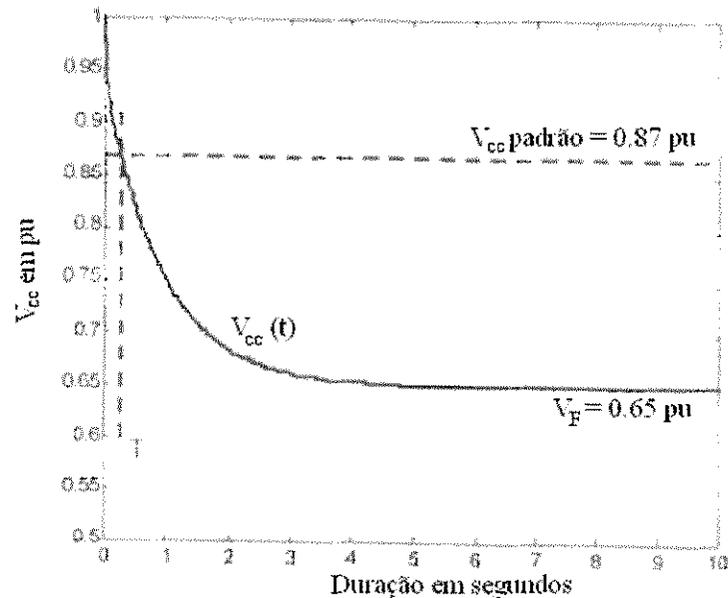


Figura 13 – Curva de afundamento no lado cc.

A variação de $V_{cc}(t)$ da figura 13 é dada por:

$$V_{cc}(t) = A + Be^{-bt} + Ce^{-ct}$$

Onde 'b' e 'c' são constantes que dependem da carga ou filtro localizado no lado cc.

Para $t = 0$, temos:

$$V_{cc}(t) = A + B + C = 1$$

$$C = 1 - A - B$$

Para $t \rightarrow \infty$, temos:

$$V_{cc}(t) = A = V_F$$

Onde V_F é o valor final da tensão cc após ter no lado ca um afundamento de tensão.

Logo,

$$V_{cc}(t) = V_F + Be^{-bt} + (1 - V_F - B)e^{-ct}$$

Seja $V_{cc}(T) = V_T$ a tensão padrão. Isto é, a tensão do barramento cc não pode

“afundar” para um valor menor que V_T .

Sendo assim,

$$V_T = V_F + Be^{-bT} + (1 - V_F - B)e^{-cT}$$

Sabendo que $\Delta V = V_F - 1$ é o afundamento em pu, temos:

$$\Delta V = \frac{V_T - B(e^{-bT} - e^{-cT}) - 1}{1 - e^{-cT}} \quad (4.27)$$

Seja T_x a duração aceitável para $\Delta V = -1$,

Então,

$$-1 = \frac{V_T - B(e^{-bT_x} - e^{-cT_x}) - 1}{1 - e^{-cT_x}}$$

Isolando B,

$$B = \frac{e^{-cT_x} - V_T}{e^{-cT_x} - e^{-bT_x}} \quad (4.28)$$

Substituindo (4.28) em (4.27),

$$\Delta V = \frac{V_T + \frac{(e^{-cT_x} - V_T)}{e^{-cT_x} - e^{-bT_x}}(e^{-cT} - e^{-bT}) - 1}{1 - e^{-cT}}$$

$\Delta V = f(T)$ é uma curva de CBEMA.

A curva da figura 13 foi obtida para $V_T = 0.87$ pu, $b = 1,06$, $c = 23,7$.

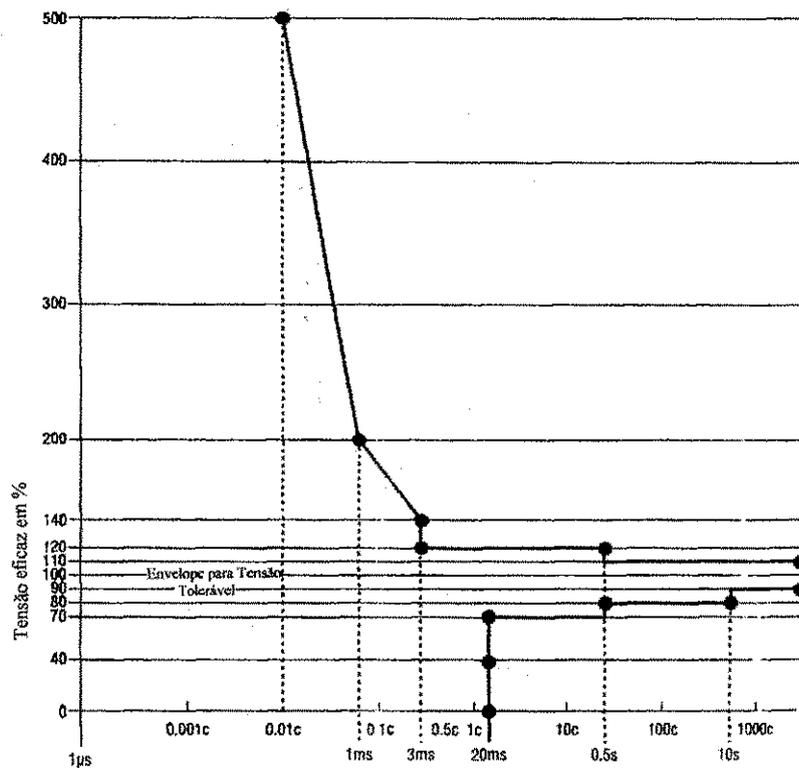
A curva de aceitabilidade de potencia pode ser construída para qualquer carga, aplicando-se este conceito de padrão.

A tabela 4 fornece um levantamento de tolerância aos afundamentos para vários equipamentos.

Equipamento	Tolerância de tensão		
	Limite superior	Valor médio	Limite inferior
CLP	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
CLP, placa de entrada	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
Acionamento de 5 cv	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
Relé de controle CA	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
Partida de motor	20 ms, 60%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
PC	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

Tabela 4 - Tolerância aos afundamentos de vários equipamentos.

Apesar da curva CBEMA ter sido originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores, ela tem sido também utilizada para outros equipamentos eletro-eletrônicos. Com isso, ela foi revisada e modificada para caracterizar melhor a sensibilidade destes equipamentos, surgindo então a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*). A curva pode ser vista na figura 14.



Duração do distúrbio em ciclo (c) e em segundos (s)

Figura 14 – Curva ITIC.

5. Sugestões

Depois da abordagem de forma geral sobre qualidade de energia elétrica, descrevendo brevemente sobre os tipos de distúrbios, descrevendo sobre os índices de qualidade e sobre a curva de aceitabilidade, pode-se dizer que foi dado o passo inicial no estudo deste complexo tema sobre a qualidade da energia elétrica.

Para uma continuação deste tema, em nível de graduação, é sugerido acrescenta um capítulo para cada um dos seguintes assuntos:

- * Capítulo 4: Afundamentos de tensão;
- * Capítulo 5: Harmônicos;
- * Capítulo 6: Flicker.

6. Conclusão

Durante as pesquisas sobre o tema de QEE em livros, apostilas, teses de mestrado, *sites* e entre outros; foi visto a importância e o empenho que está sendo dado a este tema.

Há interesse das universidades, através de pesquisas, em explicar as origens, efeitos e possíveis soluções para uma melhor QEE.

As concessionárias procuram manter o fornecimento de energia elétrica com qualidade aos seus consumidores, gerando assim as concorrências entre elas.

Os consumidores estão cada vez mais conscientes dos problemas que envolve a QEE.

Diante deste cenário atual, surge então a necessidade do curso de engenharia elétrica da UFCG implementar, em nível de graduação, a disciplina de Qualidade de Energia Elétrica, fortalecendo ainda mais os conhecimentos dos alunos e os integrando

7. Referencias Bibliográficas

- [1] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Beaty, H. W. *Electrical Power Systems Quality*.USA,1997.
- [2] Heydt, G. T.. *Electric Power Quality*.USA,1991.
- [3] *Quality Power for Sensitive Electronic Equipament*. Second edition, EC&M Books.
- [4] Lopez, R. A.. *Qualidade na Energia Elétrica*. Artliber Editora, São Paulo, 2001.
- [5] Filho, Odilon Delmont. *Utilização da transformada Wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica*. Dissertação de Mestrado. São Carlos, 2003. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.