

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

CONDICIONAMENTO E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Por

Lucas Gomes Gueiros

Prof. Wallace do Couto Boaventura

(Orientador)

Belo Horizonte, Novembro/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica

Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica

CONDICIONAMENTO E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Lucas Gomes Gueiros

Orientador: Wallace do Couto Boaventura

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários a obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Belo Horizonte, Novembro/2011

CONDICIONAMENTO E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Lucas Gomes Gueiros

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários a obtenção do *Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica*.

Aprovada em _____ de _____ de _____.

Por:

Prof. Wallace do Couto Boaventura

(Orientador)

Prof. Ivan José da Silva Lopes

(Relator)

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus.

À minha esposa Maria Thereza.

Aos meus pais Dário e Mirian, meus familiares e amigos.

Ao meu orientador e professor Wallace do Couto Boaventura.

Aos professores da especialização.

Aos colegas de turma.

À CHEMTECH.

RESUMO

Considerando-se o constante crescimento mundial na demanda de energia elétrica, durabilidade das reservas energéticas não renováveis e seus impactos sobre o meio ambiente, torna-se imprescindível a utilização de tecnologias que garantam a qualidade e eficiência na transmissão e consumo da energia atualmente disponível. Neste cenário, a utilização de dispositivos FACTS – *Flexible Alternating Current Transmission Systems* – permite controlar dinamicamente a impedância da linha, a tensão, o fluxo de potência ativa e reativa e, quando o armazenamento de energia se torna economicamente viável, também é possível fornecer e absorver potência ativa. Com isso, tem-se maior controle do sistema e conseqüente aumento na capacidade de transferência de potência do sistema. Neste trabalho, inicialmente, são apresentados os principais distúrbios eletromagnéticos que impactam na qualidade de energia elétrica, destacando suas causas e efeitos, em seguida são apresentados os dispositivos FACTS e suas aplicações. Por fim, verificou-se que tais dispositivos agregam, em diversos aspectos, a qualidade de energia, entretanto ainda possuem certas limitações técnicas que os impedem de serem aplicados em todos os níveis e situações inerentes ao sistema.

ABSTRACT

Considering the global growing demand for power, durability of non-renewable energy reserves and their impact on the environment, become essential to use technologies that ensure the quality and efficiency in transmission and consumption of energy currently available. In this scenario, the use of FACTS devices - Flexible Alternating Current Transmission Systems – allows to dynamically control the line impedance, voltage, active and reactive power flow, and when the energy storage becomes economically viable, it's also possible to provide and to absorb active power. Thus, we have greater control of the system and consequent increase in power transfer capability of the system. In this work, initially, are the main electromagnetic disturbances that impact the power of quality, highlighting its causes and effects, then we present the FACTS devices and their applications. Finally, it was found that such devices add, in many ways, the power of quality, but still have certain technical limitations that prevent them from being applied at all levels and situations inherent in the system.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica. Condicionamento da Energia elétrica. Dispositivos FACTS. *Custom Power*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distúrbios de tensão típicos, idealizados	20
Figura 2: Corrente transitória Impulsiva decorrente a uma descarga atmosférica	21
Figura 3: Transitório oscilatório, de baixa frequência, causado pela energização de um banco de capacitores.....	22
Figura 4: Transitório oscilatório, causado pelo fenômeno <i>back-to-back</i> de comutação de capacitores.....	22
Figura 5: Afundamento de tensão devido a uma falta no sistema	24
Figura 6: Afundamento de tensão devido à partida de um motor de indução	25
Figura 7: Salto de tensão devido a uma falta fase – terra no sistema	26
Figura 8: Forma de onda da corrente e espectro harmônico para corrente injetada por um AVV.....	29
Figura 9: Corte de tensão causado por um conversor	30
Figura 10: Exemplo de flutuações de tensão causado pela operação de fornos a arco	31
Figura 11: Curva típica de suscetibilidade.....	35
Figura 12: Modelo de linha sem perdas.....	37
Figura 13: Curvas comparativas de capacidade da linha	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos de sistemas elétricos	16
Tabela 2: Principais causas dos fenômenos eletromagnéticos.....	32
Tabela 3: Perturbações mais Comuns: Causas e Equipamentos Afetados	33
Tabela 5: Perdas Financeiras em Grandes Consumidores Industriais e Comerciais (Interrupções e Afundamentos de Tensão).....	34
Tabela 6: Exemplo de utilização dos dispositivos FACTS	41
Tabela 7: Consumo Mundial de Energia	43

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVV	Acionadores a Velocidade Variável
BSES	Backup Stored Energy System
CBEMA	Computer Business Equipment Manufacturers Association
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções
HVDC	High Voltage Direct Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
ITI	Information Technology Industry
ONS	Operador Nacional do Sistema
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STS	Static Transfer Switch
WEC	World Energy Council

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	12
1.1.1	Definição.....	12
1.1.2	Indicadores, procedimentos e recomendações	14
1.1.3	Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos dos sistemas elétricos	16
1.2	CONDICIONAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA	17
1.2.1	Definição.....	17
1.2.2	Conceito básico de FACTS	18
1.2.3	Conceito básico de “Custom Power”	18
2	PRINCIPAIS DISTÚRBIOS ELETROMAGNÉTICOS	19
2.1	TRANSITÓRIOS	20
2.1.1	Transitórios impulsivos.....	20
2.1.2	Transitórios oscilatórios	21
2.2	VARIAÇÕES DE TENSÃO	23
2.2.1	Variações de tensão de curta duração.....	23
2.2.2	Variações de tensão de longa duração	26
2.3	DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA	27
2.3.1	Componente CC.....	27
2.3.2	Harmônico	28
2.3.3	Inter-harmônico	29
2.3.4	Corte	30
2.3.5	Ruído	30
2.3.6	Flutuações de Tensão.....	31
2.3.7	Variação de Frequência.....	32
2.4	CAUSAS E EFEITOS DOS DISTÚRBIOS	32
2.4.1	Principais causadores de perdas financeiras e suas origens.....	33

3	DISPOSITIVOS FACTS	36
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	36
3.2	COMPENSADOR PARALELO (<i>SHUNT</i>)	38
3.3	COMPENSADOR SÉRIE	39
3.4	COMPENSADOR HÍBRIDO (SÉRIE E PARALELO).....	39
3.5	CONTROLADOR DE ÂNGULO DE TRANSMISSÃO.....	40
3.6	UTILIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS.....	41
4	CUSTOM POWER.....	42
5	CONCLUSÃO	43
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

1.1.1 Definição

Existem diversas definições para qualidade de energia elétrica, justificadas por uma questão de referência diante de sua utilização e aproveitamento. Concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos possuem pontos de vistas distintos quanto à definição conceitual.

Qualidade de energia elétrica pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, transitórios e harmônicos, medidos no ponto de entrega de energia. Esta é uma definição vista sob o enfoque da identificação de qual é o nível de qualidade da energia fornecida pela concessionária. É esperado dos sistemas de transmissão e distribuição das concessionárias, o fornecimento de energia elétrica de forma confiável, sem interrupções e perturbações, com tensão dentro dos limites estabelecidos, contudo a disponibilidade de energia elétrica de forma contínua e isenta de perturbações não se aplica à realidade. Boa qualidade no suprimento não significa energia perfeita.

O uso normal da eletricidade cria perturbações e o surgimento de problemas no sistema elétrico, provocados por eventos naturais ou por ações deliberadas sobre o mesmo, irão recorrentemente estar presente. A tipologia dessas perturbações, sua gravidade e frequência de acontecimentos variam de acordo com a localização dentro do sistema, afetando cargas dos consumidores ou então, sendo afetadas por estas.

Da óptica do consumidor, qualidade de energia é a ausência de variações manifestadas na tensão, corrente ou frequência que promovam falhas ou má operação nos seus equipamentos.

A percepção da qualidade de energia sob o prisma dos consumidores pode ser afetada por perturbações provocadas por outros ou mesmo pela carga do próprio consumidor de eletricidade. Alguns tipos de dispositivos ou equipamentos elétricos, incluindo aqueles com recentes recursos tecnológicos, a exemplo, conversores estáticos, geram perturbações na rede (distorções harmônicas, flutuações e desequilíbrios), que alteram e diminuem a qualidade da energia fornecida pela

concessionária e podem modificar o desempenho ou mesmo danificar outros equipamentos.

A gravidade é maior quando se trata da proliferação da utilização de equipamentos eletrônicos, no âmbito industrial, comercial ou residencial. Além de serem muito sensíveis às variações de tensão, transitórios e harmônicos, contribuem para aumentar o fluxo harmônico no sistema. Todo equipamento é projetado para operar dentro de certa faixa de tensão. A maioria dos problemas de tensão, associados aos computadores e outras cargas sensíveis, como equipamentos microprocessados, são provocados por variações de tensão de curta duração, sendo minoritários quando relacionados à ocorrência de tensões de regime fora da faixa normal de operação. Como a sensibilidade a essas variações de tensão diferem de um equipamento para o outro, o problema torna-se mais complicado. Equipamentos diferentes da mesma categoria, de fabricantes variados, não demonstram níveis iguais de sensibilidade.

A disseminação e desenvolvimento de tecnologias na área da eletrônica de potência, principal gerador de harmônicos, possibilitou que estes equipamentos trabalhem em níveis de tensão cada vez mais elevados. Com isso, tanto os sistemas elétricos dos consumidores quanto os das concessionárias passaram a sofrer com problemas decorrentes da distorção da onda de tensão.

Do ponto de vista acadêmico, qualidade de energia elétrica é a disponibilidade da energia elétrica, com forma de onda senoidal e pura, sem alterações na amplitude, emanando de uma fonte de potência infinita [ALV 10].

Contudo, qualidade de energia elétrica, não pode ser traduzida apenas dessa forma, o termo reúne uma série de antigos e novos conceitos utilizados em engenharia elétrica. Problemas que eram tratados individualmente pelos engenheiros passaram a receber um enfoque sistêmico, existindo algumas razões que justificam esta mudança no modo de tratar a questão [ALV 10]:

- Os equipamentos elétricos são, na atualidade, mais sensíveis a variações de qualidade de energia elétrica do que os equipamentos utilizados no passado. Muitos dos novos equipamentos possuem controles dotados de microprocessadores e dispositivos de eletrônica de potência, sensíveis a diversos tipos de distúrbios.

- Muitos sistemas e/ou processos são conectados em rede. Em processos contínuos, a falha de um dos componentes tem consequências importantes, podendo resultar na interrupção de todo o processo.
- A crescente ênfase na necessidade de obtenção de um aumento global da eficiência do sistema elétrico vem estimulando o aumento do uso de dispositivos que promovam esta eficiência. Dispositivos como acionadores a velocidade variável (AVV), utilizados com esses objetivos, resultam no aumento dos níveis de correntes harmônicas no sistema elétrico, com impacto direto na qualidade da energia elétrica.
- Uma maior conscientização por parte dos consumidores sobre a questão qualidade da energia elétrica faz crescer o nível de demanda sobre informações relativas a questões como, por exemplo, interrupções, afundamentos de tensão, harmônicos e transitórios.

1.1.2 Indicadores, procedimentos e recomendações

Desde 1934, quando houve a criação do Código de Águas, estabelecida pela legislação brasileira, existe a preocupação com a qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores. A partir de então, foram criados os primeiros indicadores, mesmo que incipientes, da qualidade de energia. Abaixo a evolução da legislação brasileira relativa ao tema.

- Código de Águas de 1934
- Decreto 41019 de 1957
- Portarias 046 e 047 do DNAEE, de 1978, instituíram os índices DEC e FEC.
- Portaria 293 de 1992 institui um grupo para revisão dos conceitos DEC e FEC, e identifica novas necessidades.
- A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, institui o Grupo Trabalho Especial – Qualidade de Energia Elétrica, coordenado pelo ONS e constituído por representação dos diversos Agentes, Universidades, Consumidores, etc.
- Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes, Sub-módulo 2.8, preparado pelo ONS, e aprovado pela

Resolução Autorizativa nº 1436/08 de 07/07/2008, que estabelece novos indicadores para aferir a qualidade da energia elétrica da rede básica.

Preocupada apenas em reduzir as horas de interrupção sustentada de energia, até os anos 80, questões como distorções harmônicas e cintilação luminosa (*flicker*) não eram tratadas pela comunidade do setor elétrico nacional, contudo, a partir de então, tais assuntos começaram a ser intensamente discutidos.

Dessas discussões surgiram alguns procedimentos impostos às concessionárias para a qualidade da energia fornecida aos consumidores de cargas industriais, entretanto, tais procedimentos, não faziam parte da legislação brasileira. Apenas em 1990, com a criação do Grupo de Trabalho Especial – Qualidade de Energia Elétrica, instituído pela recém criada ANEEL, todos esses procedimentos foram amplamente revisados e definidos limites aceitáveis para os itens relacionados abaixo:

- Tempo de interrupção temporária;
- Afundamentos e saltos de tensão;
- Sobre e subtensões;
- Transientes impulsivos e oscilatórios;
- Problemas de regime permanente, tais como, harmônicos, desequilíbrios, cortes e cintilações luminosas (*flicker*).

As questões sobre qualidade da energia elétrica relativas ao sistema de distribuição, incluído a subtransmissão, estão cobertas pelo Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Este módulo estabelece os padrões, os indicadores, os protocolos e a metodologia de cálculo e medição que devem ser utilizados na avaliação do desempenho da rede de distribuição brasileira visando uma quantificação da Qualidade de Energia. Visa também o estabelecimento de processos e procedimento sobre a gestão da Qualidade de Energia na rede de distribuição [ALV 10].

Em contrapartida, a regulamentação nacional ainda é um tanto quanto fraca no assunto e o estudo de normais internacionais, como a IEC CIGRE [CIG 04] e IEEE Std. 1159 [IEE 09], pode ajudar a suprir tais deficiências.

1.1.3 Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos dos sistemas elétricos

O “*Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE*”, através do comitê 22 (IEEE SCC22), juntamente com outras entidades internacionais, como, por exemplo, o “*International Electrotechnical Commission – IEC*”, (CIGRE), vem estabelecendo normalizações relativas à qualidade da energia elétrica. A terminologia e a classificação dos fenômenos eletromagnéticos que afetam a qualidade da energia elétrica, de acordo com o documento IEEE Std. 1159, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos de sistemas elétricos
 FONTE: [IEE 09], Pág. 6.

CATEGORIAS	DURAÇÃO TÍPICA	AMP. TENSÃO TÍPICA
1. Transiente		
1.1. Impulsivo (tempo de subida)		
1.1.1. Nanossegundos (5 ns)	< 50ns	
1.1.2. Microssegundos (1 μ s)	50ns - 1ms	
1.1.3. Milissegundos (0,1 ms)	>1ms	
1.2. Oscilatório (Frequência)		
1.2.1. Baixa frequência (< 5 kHz)	0,3 - 50ms	0 - 4pu
1.2.2. Média frequência (5 a 500 kHz)	20 μ s	0 - 8pu
1.2.3. Alta frequência (0,5 a 5 MHz)	5 μ s	0 - 4pu
2. Variação de curta duração		
2.1. Instantânea		
2.1.1. Afundamento de tensão	0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9pu
2.1.2. Salto de tensão	0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8pu
2.2. Momentânea		
2.2.1. Interrupção	0,5 ciclos - 3s	< 0,1pu
2.2.2. Afundamento de tensão	30 ciclos - 3s	0,1 - 0,9pu
2.2.3. Salto de tensão	30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4pu
2.3. Temporária		
2.3.1. Interrupção	3s - 1min	< 0,1pu
2.3.2. Afundamento de tensão	3s - 1min	0,1 - 0,9pu
2.3.3. Salto de tensão	3s - 1min	1,1 - 1,2pu

CATEGORIAS	DURAÇÃO TÍPICA	AMP. TENSÃO TÍPICA
3. Variação de longa duração		
3.1. Interrupção sustentada	> 1min	0,0pu
3.2. Subtensão	> 1min	0,8 - 0,9pu
3.3. Sobretensão	> 1min	1,1 - 1,2pu
3.4. Sobrecorrente	> 1min	
4. Desequilíbrio de:		
4.1. Tensão	Regime	0,5 - 2%
4.2. Corrente	Regime	1,0 – 30%
5. Distorção da forma de onda		
5.1. Componente CC	Regime	0 - 0,1%
5.2. Harmônico	Regime	0 – 20%
5.3. Inter-harmônico	Regime	0 - 2%
5.4. Corte	Regime	
5.5. Ruído	Regime	0 - 1%
6. Flutuação de tensão	Intermitente	0,1 - 7%
7. Variação de frequência	< 10s	±0,10 Hz

1.2 CONDICIONAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA

1.2.1 Definição

Condicionamento da Energia Elétrica pode ser definido como todo processo ou ação que visa adequar ou melhorar o fornecimento de energia às necessidades da carga e/ou melhorar a qualidade da energia absorvida da rede elétrica. Com base nessa definição, podem-se caracterizar como condicionamento da energia elétrica as seguintes ações de controle, não se limitando a elas:

- Regulação e balanceamento da tensão de suprimento;
- Maximização do fator de potência nas cargas;
- Redução do conteúdo harmônico da tensão e da corrente;
- Flexibilização no uso do sistema de energia elétrica.

Para tanto, conceitos como FACTS - "Flexible Alternating Current Transmission Systems" e "Custom Power" se aplicam perfeitamente ao assunto proposto.

1.2.2 Conceito básico de FACTS

Hingorani, pesquisador do EPRI (Electrical Power Research Institute), lançou o conceito básico de FACTS – *Flexible Alternating Current Transmission Systems* [HIN 00], no qual a flexibilização do sistema está fortemente associada à capacidade de controle direto do fluxo de potência na transmissão de energia elétrica.

Essa flexibilidade pode ser obtida por meio da eletrônica de alta potência, em conversores de corrente contínua de alta tensão (HVDC – High Voltage Direct Current), compensadores estáticos reativos, controladores de fluxo de potência, conversores de frequência e sistemas CA/CC, viabilizando o casamento direto entre sistemas de corrente alternada e de corrente contínua em todos os níveis de tensão e de potência [HIN 93]. A incorporação de dispositivos FACTS na operação de sistemas elétricos, além de abrir um enorme campo para a aplicação da tecnologia de controle de alta potência, permite também a melhor utilização da infra-estrutura de transmissão já disponível. Os principais benefícios que a tecnologia FACTS pode trazer são os seguintes [DEC 09]:

- Ampliar a capacidade de transmissão das linhas já existentes;
- Operar linhas em paralelo, mesmo que tenham diferentes capacidades;
- Dirigir o fluxo de potência por caminhos mais adequados;
- Ajustar rapidamente o suporte de reativos durante a operação;
- Estabilizar eficientemente oscilações de tensão e ângulo;
- Fazer a integração entre sistemas CC e CA, aproveitando as vantagens de ambos.

1.2.3 Conceito básico de “Custom Power”

O conceito básico de “*custom power*” é definido pelo IEEE [IEE 03] como o emprego de controladores eletrônicos de alta potência ou estáticos em sistemas de distribuição de média tensão com a finalidade de fornecer um nível de confiabilidade e de qualidade de energia necessária aos consumidores de energia elétrica sensível às variações de qualidade de energia. Dispositivos condicionadores de energia, ou controladores, incluem chaves estáticas, inversores, conversores, transformadores de injeção e módulos de armazenamento de energia que tem a capacidade de

executar a regulação de tensão e corrente em um sistema de distribuição para melhorar a confiabilidade e a qualidade da energia elétrica.

Desta forma, o conceito de “Custom Power”, é uma extensão do conceito de FACTS, aplicado a redes de distribuição, nas quais os aspectos de qualidade de energia se tornam muito mais relevantes do que na rede de transmissão, onde, melhor se aplica o conceito de FACTS.

2 PRINCIPAIS DISTÚRBIOS ELETROMAGNÉTICOS

Segundo recomendações do IEEE, existem três categorias de fenômenos eletromagnéticos onde se pode classificar a maior parte dos problemas de qualidade de energia, são elas:

- Transitórios
- Variações de tensão
- Harmônicos

Por sua vez o IEC classifica as variações de tensão e os componentes harmônicos como fenômenos conduzidos de baixa frequência, os transitórios impulsivos como fenômenos irradiados de alta frequência e os transitórios oscilatórios como fenômenos conduzidos de alta frequência.

A Figura 1 apresenta, de forma didática, essas três categorias.

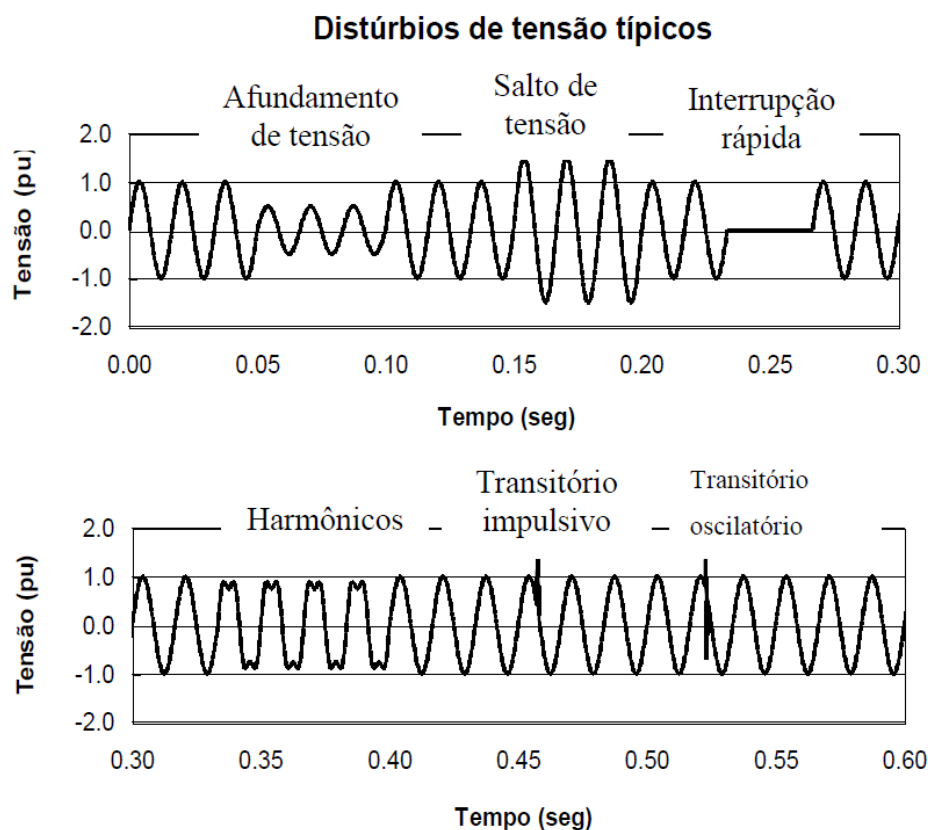


Figura 1: Distúrbios de tensão típicos, idealizados
 FONTE: [ALV 10], Pág. 7

2.1 TRANSITÓRIOS

Os distúrbios transitórios podem ser classificados como impulsivos ou oscilatórios.

2.1.1 Transitórios impulsivos

Os transitórios impulsivos são variações súbitas na tensão, ou na corrente, ou em ambos, em apenas uma direção de polaridade (positiva ou negativa). Estes podem ser caracterizados por seus tempos de subida e descida, pelo conteúdo espectral e pela máxima amplitude alcançada. Como exemplo, um transitório impulsivo indicado por 1,2/50 μ s 2000V atinge seu valor máximo (2000V) em 1,2 μ s e decai à metade deste valor em 50 μ s.

A causa mais comum deste tipo de distúrbio são as descargas atmosféricas. A Figura 2 apresenta a corrente transitória impulsiva decorrente de uma descarga atmosférica. Tais distúrbios podem excitar circuitos ressonantes do sistema elétrico produzindo os transitórios oscilatórios. [IEE 09], Pág. 7

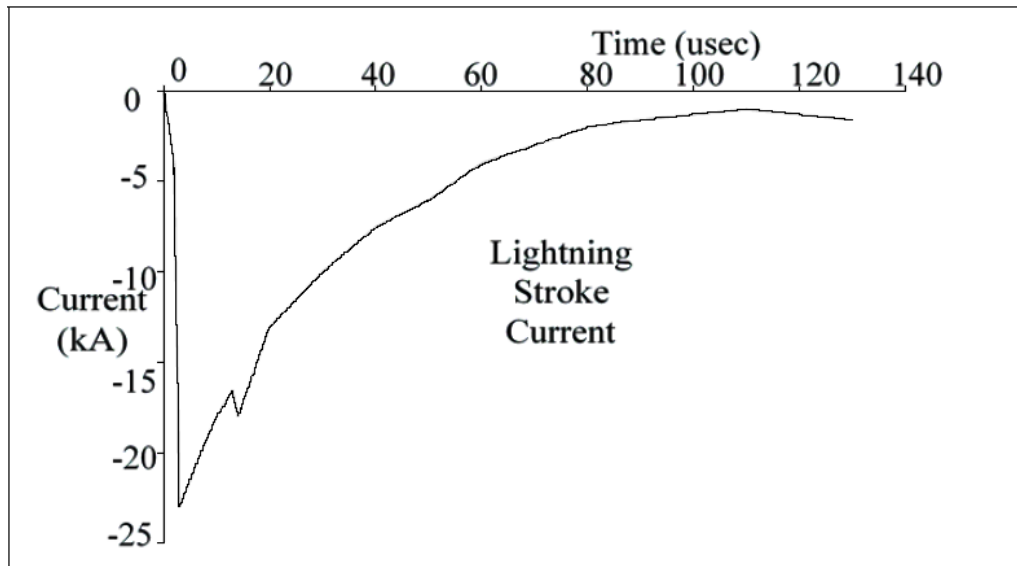


Figura 2: Corrente transitória Impulsiva decorrente a uma descarga atmosférica.
 FONTE: [IEE 09], Pág. 8

2.1.2 Transitórios oscilatórios

Os transitórios oscilatórios são variações bruscas, de polaridade, nos seus valores instantâneos de tensão ou corrente, ou ambos. Tais distúrbios são caracterizados pelo conteúdo espectral de sua frequência predominante, duração e amplitude, e podem ser classificados em três categorias de acordo com sua frequência de oscilação (ver Tabela 1).

Os transitórios oscilatórios ocorrem, adicionalmente, devido a operações de comutação e chaveamento de circuitos elétricos. [ALV 10], Pág. 8

A Figura 3 apresenta o gráfico da tensão no momento de energização de um banco de capacitores.

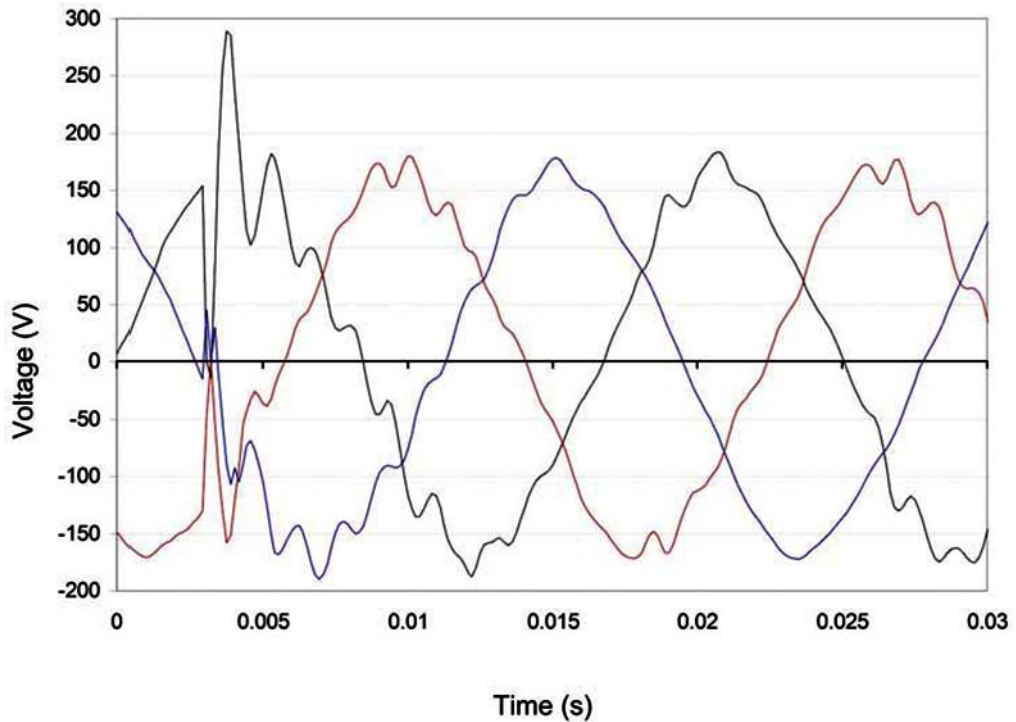


Figura 3: Transitório oscilatório, de baixa frequência, causado pela energização de um banco de capacitores.
 FONTE: [IEE 09], Pág. 9

A energização de um capacitor ou de um banco de capacitores próximo a outro banco de capacitores já energizado é ainda mais grave e pode acarretar no fenômeno chamado de *back-to-back* de comutação. A Figura 4, abaixo, apresenta os transientes oscilatórios causados por este fenômeno. [IRI 06]

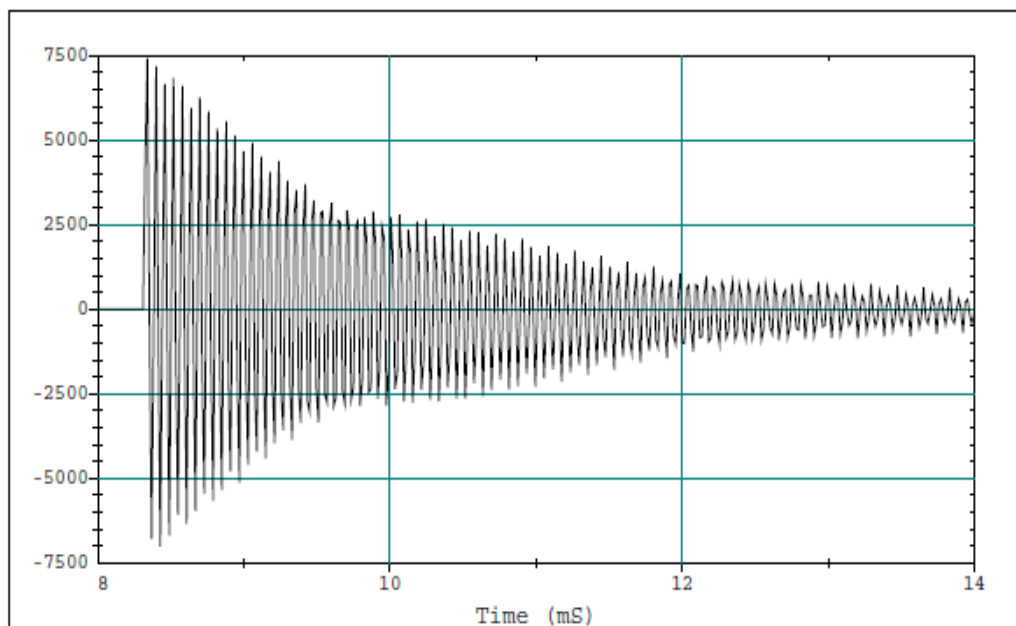


Figura 4: Transitório oscilatório, causado pelo fenômeno *back-to-back* de comutação de capacitores.
 FONTE: [IEE 09], Pág. 9

2.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO

Variações de tensão são alterações no valor médio quadrático (rms) da tensão. Tais variações podem ser classificadas de acordo com sua duração e amplitude (ver Tabela 1).

2.2.1 Variações de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração possuem tempos de atuação entre 0,5 a 1 minuto e, de acordo com este tempo, podem ser subdivididas em variações instantâneas, momentâneas e temporárias.

Tais variações estão geralmente associadas à energização de grandes cargas, que necessitam de alta corrente de partida, ou por perda intermitente na conexão com o sistema de alimentação ou por decorrência de uma falta no sistema. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, podem ocorrer interrupções, afundamentos de tensão ou saltos de tensão.

2.2.1.1 Interrupções rápidas

A interrupção rápida de tensão ocorre quando a tensão eficaz da fonte cai a um valor abaixo de 0,1 pu, por um intervalo de tempo superior a 0,5 ciclo e inferior a 1 minuto.

Tais interrupções são causadas por faltas no sistema, falhas em equipamentos e mau funcionamento de dispositivos de controle. Quando são decorrentes de falta no sistema da concessionária seu tempo de duração fica determinado pelo tempo de atuação dos dispositivos de proteção (disjuntores / religadores).

2.2.1.2 Afundamentos de tensão

O afundamento de tensão (terminologia mais utilizada no Brasil)¹ acontece quando a tensão eficaz, à frequência de 60Hz, cai a patamares abaixo de 0,9 pu e acima de 0,1 pu, com tempo de duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto. De acordo com este tempo os afundamentos podem ser subdivididos em afundamentos instantâneos, momentâneos e temporários.

¹ Na literatura internacional os termos correspondentes mais utilizados são *voltage sag* e *voltage dip*.

Para correta utilização da terminologia, diz-se que para um “afundamento de 20%” a tensão resultante é de 0,8 pu, ou seja, a tensão de alimentação caiu para 80% da tensão nominal. Os afundamentos são geralmente causados por faltas no sistema, grandes variações de carga e partidas de grandes motores.

Quando da ocorrência de faltas no sistema, os afundamentos de tensão ocorrem devido à circulação de corrente de falta pela impedância do sistema, ocasionando uma queda de tensão no ponto de interesse. Nestes casos os afundamentos têm seu tempo determinado por dispositivos de eliminação de faltas. [ALV 10], Pág. 10

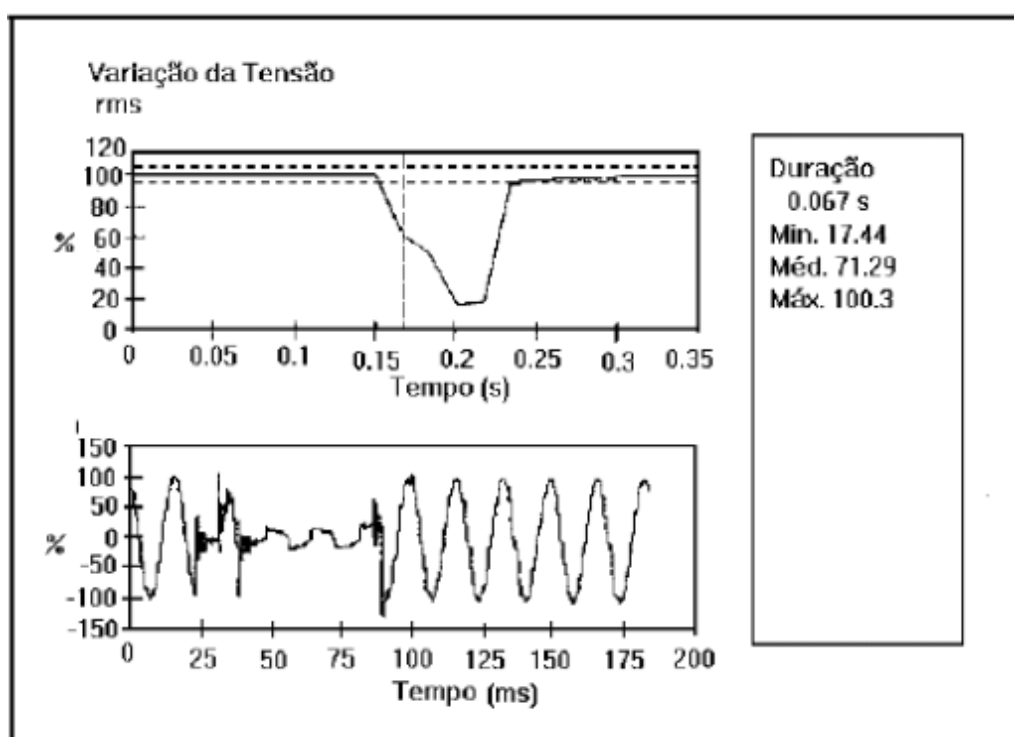


Figura 5: Afundamento de tensão devido a uma falta no sistema
FONTE: [ALV 10], Pág. 11

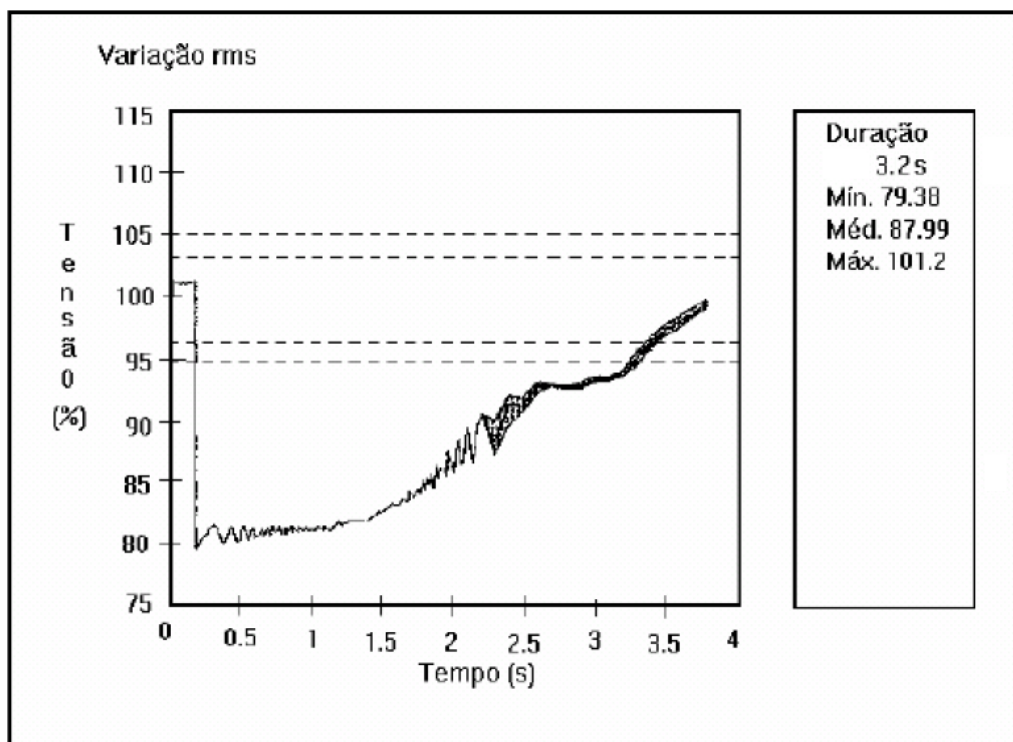


Figura 6: Afundamento de tensão devido à partida de um motor de indução
 FONTE: [ALV 10], Pág. 11

2.2.1.3 Saltos de tensão

O salto de tensão (terminologia mais utilizada no Brasil)² acontece quando a tensão eficaz, à frequência de 60Hz, sobe a níveis acima de 1,1 pu e abaixo de 1,8 pu, com tempo de duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto. De acordo com este tempo os saltos podem ser subdivididos em afundamentos instantâneos, momentâneos e temporários.

Para um uso adequado da terminologia, diz-se que para um “salto de tensão de 20%” a tensão resultante é de 1,2 pu, ou seja, a tensão de alimentação subiu para 120% da tensão nominal. Os saltos de tensão são geralmente causados por faltas no sistema, saída de grandes cargas e energização de bancos de capacitores.

Quando da ocorrência de faltas no sistema, os saltos de tensão ocorrem na fase não atingida pela falta. Nestes casos, a severidade do salto de tensão durante a condição de falta é determinada pela localização da falta, impedância do sistema e características de aterramento. Próximo à subestação haverá pouco ou nenhum salto de tensão pelo fato da usual conexão delta-estrela prover um caminho de baixa impedância de sequência zero para a corrente de falta. [ALV 10], Pág. 12

² Na literatura internacional o termo correspondente mais utilizado é *voltage swell*

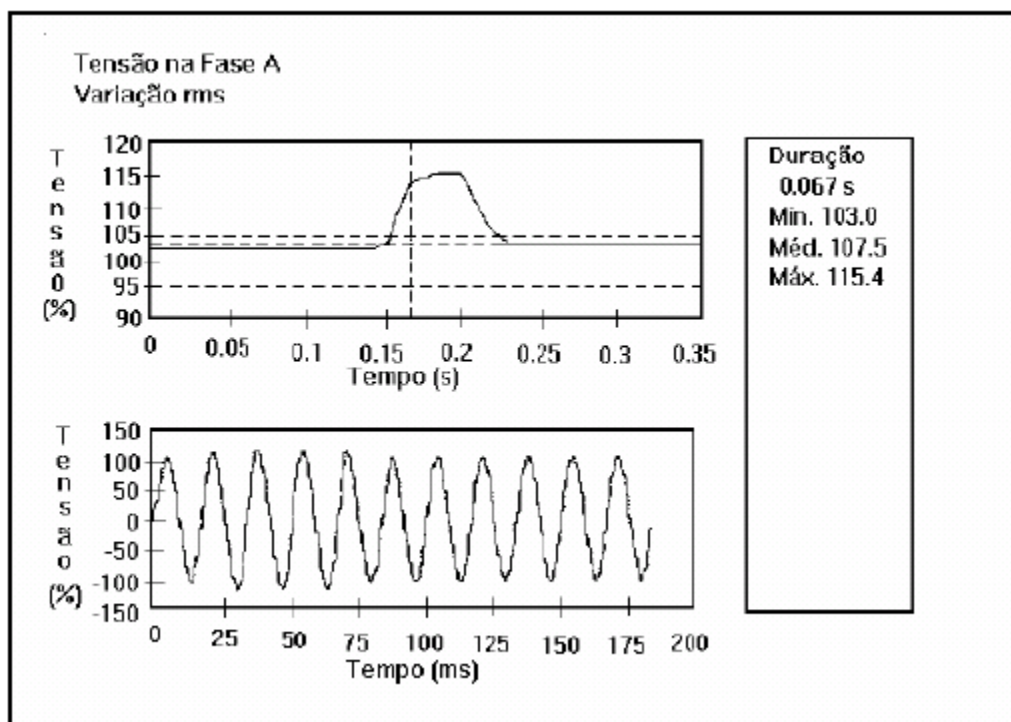


Figura 7: Salto de tensão devido a uma falta fase – terra no sistema
 FONTE: [ALV 10], Pág. 12

2.2.2 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração possuem tempos de atuação maiores do que 1 minuto e são subdivididas em sobretensões e subtensões.

Diferentemente das variações de curta duração, as de longa duração não estão associadas à falta no sistema, mas, sim, a variações de carga e operações de chaveamentos no sistema elétrico.

2.2.2.1 Sobretensões

As sobretensões acontecem quando a tensão eficaz, à frequência de 60Hz, sobe a níveis entre 1,1 pu a 1,2 pu, com tempo de duração superior a 1 minuto.

Sobretensões podem ser resultado da comutação de grandes cargas, ou variações na compensação reativa no sistema, como por exemplo, energização de banco de capacitores. Sistemas com pouco poder de regulação e com ajuste incorreto do TAP de transformadores estão sujeitos a ocorrência deste fenômeno. [IEE 09], Pág. 15

2.2.2.2 Subtensões

Uma subtensão é uma diminuição na tensão eficaz, à frequência de 60Hz, tipicamente entre 0,8 pu a 0,9 pu, por um intervalo de tempo superior a 1 min.

São resultados de eventos opostos aos que causam sobretensões. A entrada de grandes blocos de carga no sistema ou a saída de bancos de capacitores até que os dispositivos de regulação de tensão do sistema tragam a tensão de volta para os limites de tolerância. Circuitos sobrecarregados também podem resultar em subtensões. [IEE 09], Pág. 15

2.2.2.3 Interrupções sustentadas

São consideradas interrupções sustentadas, toda redução de tensão, abaixo de 0,1 pu, por um período de tempo superior a 1 minuto. São geralmente permanentes e requerem intervenção humana para a restauração do sistema.

O termo interrupção sustentada, no contexto da monitorização de qualidade de energia, não tem relação com confiabilidade ou outra estatística de continuidade de serviço. Refere-se simplesmente a um fenômeno específico.

2.3 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA

Distorção da forma de onda é qualquer desvio da forma ideal, senoidal, da tensão ou da corrente, em regime permanente, caracterizada principalmente pelo seu conteúdo harmônico.

Deve-se salientar que esses fenômenos devem ser tratados como sendo de regime permanente e seus efeitos devem estar presentes, continuamente, por pelo menos alguns segundos.

Existem cinco tipos principais de distorção da forma de onda:

- Componente CC
- Harmônico
- Inter-harmônico
- Corte
- Ruído

2.3.1 Componente CC

A presença de uma tensão ou corrente CC em um sistema de energia é denominada de componente CC. Este fenômeno pode ocorrer como resultado de uma perturbação geomagnética ou devido ao efeito de retificação de meia onda. Componentes CC em redes de corrente alternada podem ser prejudicial devido a um

aumento na saturação do transformador e, conseqüentemente, um maior aquecimento associado, estresse adicional do isolamento, e outros efeitos adversos. [IEE 09], Pág. 19

2.3.2 Harmônico

Harmônicos são tensões ou correntes com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (60 Hz). Combinados com a tensão ou a corrente fundamental, os harmônicos produzem distorções na forma de onda. Estas distorções harmônicas ocorrem devido à característica não linear dos dispositivos e cargas do sistema [IEE 09], Pág. 19

Os maiores causadores da distorção harmônica são os equipamentos baseados em eletrônica de potência. Devido ao crescente desenvolvimento e conseqüente utilização desses equipamentos, a distorção harmônica tem se tornado uma preocupação para muitos.

Os Níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro completo das harmônicas com magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônica. Também pode ser mensurado pela distorção harmônica total (THD³). A Figura 8 mostra a forma de onda e espectro harmônico da corrente injetada por um AVV.

³ Sigla designada para denominar distorção harmônica total (Total Harmonic Distortion), utilizada pelo International Electrotechnical Commission (IEC) em sua série normativa 61000, pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) em sua norma 519 de 1992 e pela Energy Networks Association (ENA) em sua recomendação de engenharia G5/4-1 de 2005. O Operador Nacional do Sistema (ONS) determina a sigla DTHT no seu Procedimento de Rede Rev.3 para determinação similar da distorção harmônica total de tensão. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina a sigla DTT no seu Procedimento de Distribuição Rev.0 para determinação similar da distorção harmônica total de tensão

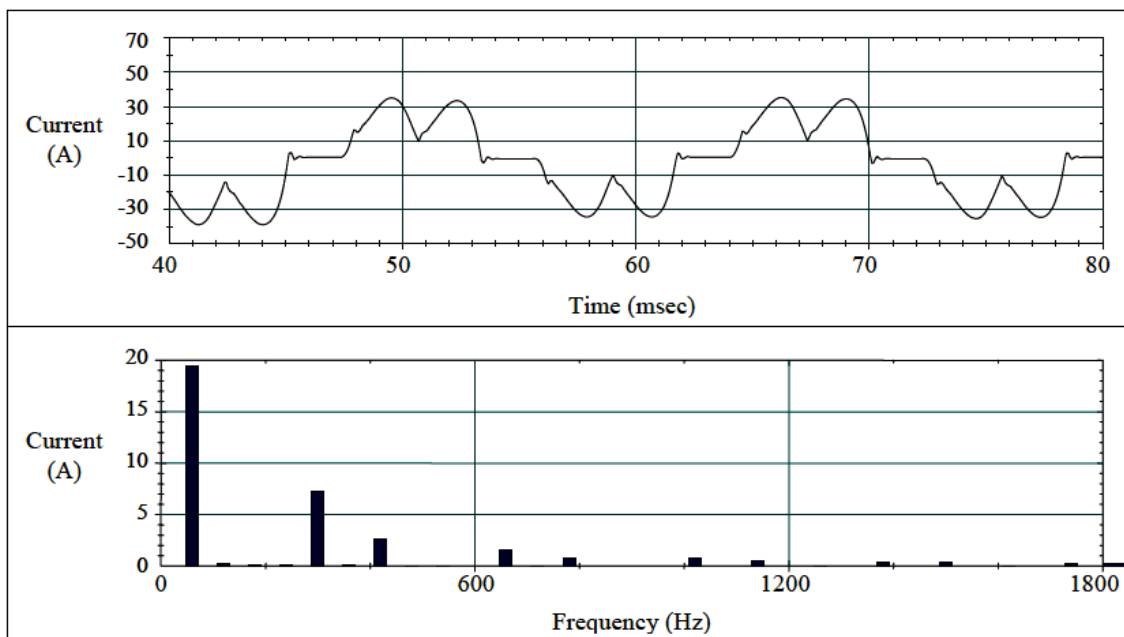


Figura 8: Forma de onda da corrente e espectro harmônico para corrente injetada por um AVV
 FONTE: [IEE 09], Pág. 20

2.3.3 Inter-harmônico

Por sua vez os inter-harmônicos são tensão ou correntes com frequências não múltiplas da frequência fundamental (60 Hz). Combinados com a tensão ou a corrente fundamental, os harmônicos produzem distorções na forma de onda. Estes podem aparecer como frequências discretas ou como um espectro de banda larga. Inter-harmônicos podem ser encontrados em redes de todas as classes de tensão.

De forma geral, as componentes de frequências inter-harmônicas, de tensão e corrente, são geradas nos sistemas elétricos através da operação de cargas que possuem basicamente, as seguintes características [MAC 09]:

- Variação ou flutuação da amplitude da componente fundamental e/ou de componentes harmônicas ao longo do tempo, como, por exemplo, verificado nos fornos a arco elétrico, máquinas de solda, etc;
- Frequência de chaveamento estático, através de elementos de eletrônica de potência, de forma não sincronizada com a frequência fundamental do sistema, como verificado nos cicloconversores e demais equipamentos com topologia de dupla conversão (CA-CC para CC-CA), os quais estão cada vez mais presentes na vida cotidiana das pessoas. Um importante exemplo deste tipo de carga são as lâmpadas fluorescentes compactas.

2.3.4 Corte

O corte é uma perturbação periódica da tensão causada pelo funcionamento normal de dispositivos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. O corte de tensão representa um caso especial que é periódico, mas possui conteúdo de frequência bastante elevado. Assim, possui atributos que poderiam ser considerados tanto transientes quanto de distorção harmônica.

Desde que ocorra continuamente (regime permanente), pode ser caracterizado através do espectro harmônico da tensão afetada. No entanto, apesar dos componentes de frequência associadas ao corte serem elevados, não são facilmente caracterizados por equipamentos de medição normalmente utilizada para a análise harmônica [IEE 09], Pág. 21.

Conversores trifásicos, que produzem saída CC, são a causa mais importante do corte de tensão (Figura 9). Os cortes ocorrem quando a corrente comuta de uma fase para outra. Durante este período, há um curto-circuito momentâneo entre as duas fases. O corte é descrito em detalhes no padrão IEEE 519-1992 [IEE 92].

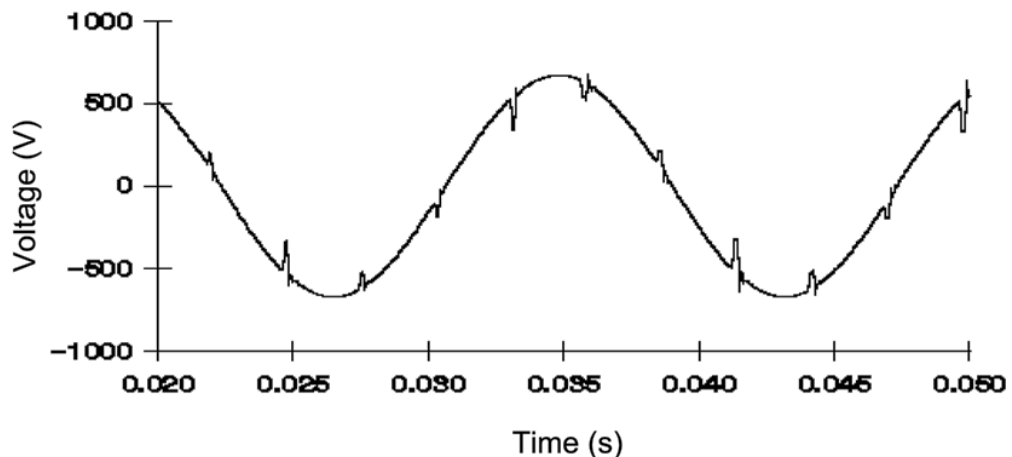


Figura 9: Corte de tensão causado por um conversor
FONTE: [IEE 09], Pág. 21

2.3.5 Ruído

O ruído são sinais elétricos indesejáveis com conteúdo espectral de banda larga normalmente inferior a 200 kHz sobreposta à tensão de sistema de energia ou corrente nos condutores de fase ou sinais elétricos indesejáveis encontrados em

condutores de neutro. Basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejada do sinal de força que não pode ser classificado como distorção harmônica ou transiente. Ruído, em sistemas de energia, pode ser causado por Dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas. Problemas de ruído são muitas vezes agravados por aterramento inadequado [IEE 09], Pág. 21.

2.3.6 Flutuações de Tensão

Flutuações de tensão são variações sistemáticas do envelope de tensão ou uma série de variações de tensão aleatória, a magnitude da tensão normalmente não excede os intervalos especificados pelo ANSI C84.1-2006 [ANS 06] de 0,95 pu a 1,05 pu. A flutuação de tensão pode ser percebida visualmente por mudanças na intensidade da iluminação da lâmpada.

Qualquer carga com variações cíclicas significativas, especialmente na componente reativa, pode causar flutuações de tensão. Cargas que apresentam variações rápidas e contínuas na magnitude da corrente de carga podem causar flutuação de tensão [IEE 09], Pág. 22.

O termo *flicker* é erroneamente utilizado para denominar esse tipo de distorção, no entanto, flutuação de tensão é um fenômeno eletromagnético, e *flicker* é o resultado indesejável desse fenômeno. Um exemplo da forma de onda da tensão, que produz *flicker*, devido a um forno a arco é mostrado na Figura 10

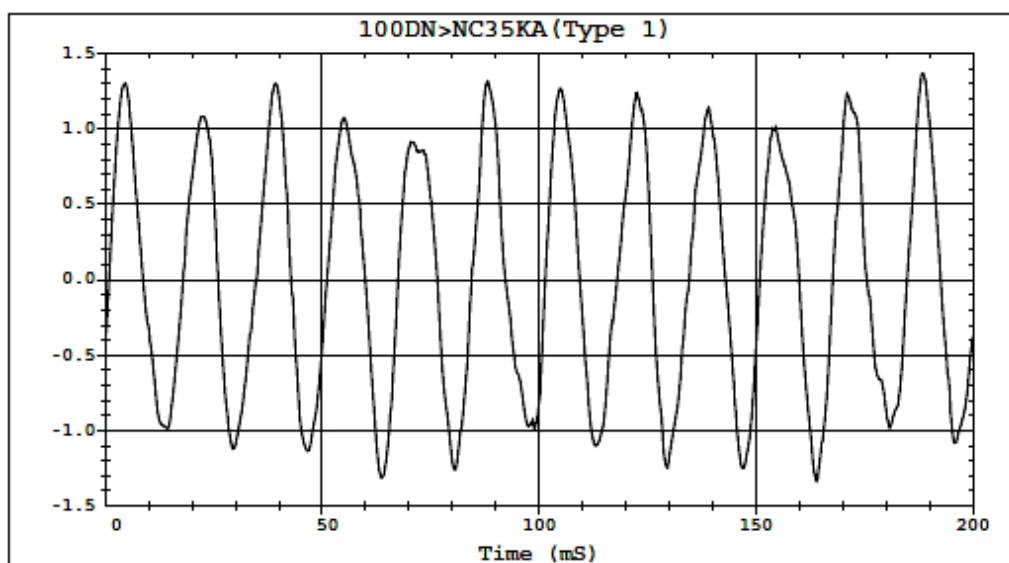


Figura 10: Exemplo de flutuações de tensão causado pela operação de fornos a arco
FONTE: [IEE 09], Pág. 21

2.3.7 Variação de Frequência

Variação de frequência é o desvio da frequência fundamentais do sistema de energia de seu valor nominal especificado (60 Hz). O regime permanente da frequência do sistema de energia está diretamente relacionado com a velocidade de rotação dos geradores no sistema. Em qualquer instante, a frequência depende do equilíbrio entre a carga e a capacidade de geração disponível. Quando esse equilíbrio dinâmico muda, pequenas mudanças na frequência ocorrem. [IEE 09], Pág. 23.

Saída de grandes blocos de cargas ou perda de um grande gerador podem causar variações na frequência.

2.4 CAUSAS E EFEITOS DOS DISTÚRBIOS

Os distúrbios descritos acima podem ter diversas causas, desde operações normais de cargas ou dispositivos, a fenômenos naturais que atingem o sistema. A tabela abaixo resume os distúrbios e suas respectivas possíveis causas.

Tabela 2: Principais causas dos fenômenos eletromagnéticos
FONTE: [IEE 09] citado por [ALV 10], Pág. 8.

CATEGORIAS	PRINCIPAIS CAUSAS
Transitórios	
Impulsivos	Descargas atmosféricas
Oscilatórios	Energização de bancos de capacitores
Variações de curta duração	
Afundamentos de tensão	Faltas, chaveamento de cargas pesadas, partida de grandes motores
Salto de tensão	Faltas - Curto circuito fase-terra provocando elevação de tensão na fase sem falta
Interrupção	Faltas, falhas em equipamentos, disfunção de controle
Variações de longa duração	
Interrupção sustentada	Falhas de natureza permanente e que necessitam de intervenção manual para sua restauração
Subtensões	Ligação de cargas, desligamento de banco de capacitores
Sobretensões	Desligamento de cargas, ligação de banco de capacitores
Desequilíbrio de tensão	Desbalanceamento de cargas, anomalias em bancos de capacitores

CATEGORIAS		PRINCIPAIS CAUSAS
Distorção da forma de onda		
Nível CC	Distúrbios geomagnéticos, retificação de meia onda	
Harmônicos	Características não lineares de cargas e dispositivos	
Interharmônicos	Conversores estáticos de frequência, ciclo conversores, motores de indução e dispositivos a arco	
Cortes	Operação normal de dispositivos de eletrônica de potência	
Ruído	Dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas	
Flutuações de tensão	Fornos a arco	
Variações de frequência	Saída de grande bloco de cargas ou perda de um grande gerador	

2.4.1 Principais causadores de perdas financeiras e suas origens

Como não existe equilíbrio entre as expectativas do consumidor e as limitações da concessionária, estes não se entendem e não entram em acordo com relação à resolução dos problemas de qualidade de energia. A concessionária poderia informar sobre a qualidade de energia entregue e conhecer as necessidades do consumidor relacionadas aos prejuízos causados e o consumidor, por sua vez, poderia procurar entender melhor as limitações da concessionária e aplicar as devidas medidas mitigadoras dos distúrbios.

Dentre os fenômenos relacionados nos itens acima, destacam-se os afundamentos de tensão e os harmônicos como os que impõem a maior parte dos prejuízos associados à qualidade da energia elétrica. As tabelas seguintes ilustram esta afirmação.

Tabela 3: Perturbações mais Comuns: Causas e Equipamentos Afetados
 FONTE: Ribeiro, P., Workshop on Power Quality, II SBQEE, nov. 1997 citado por [ALV 10], Pág. 16

CAUSAS				EQUIPAMENTOS AFETADOS	
CONSUMIDOR		CONCESSIONÁRIA			
Aterramento Indevido	28%	Afundamentos de Tensão	55%	Computadores e Microprocessadores	43%
Defeitos em Equipamentos	28%	Perda de Tensão	13%	Acionamentos a Velocidade Variável	13%

CAUSAS				EQUIPAMENTOS AFETADOS	
CONSUMIDOR		CONCESSIONÁRIA			
Afundamento e Saltos de Tensão	24%	Aterramento	10%	Iluminação (<i>flicker</i>)	8%
Harmônicos	17%	Surtos	6%	Motores	5%
Surtos	3%	Outros	16%	Relés	1%
				Outros	30%

Dentre todos os distúrbios já referidos neste trabalho, o afundamento de tensão é o principal deles. Sendo este o que mais afeta a indústria causando, muitas vezes, perdas irreparáveis.

Menos severo e mais comum do que a interrupção momentânea, o afundamento de tensão pode causar danos com a mesma gravidade e impactos financeiros. Dependendo da severidade do afundamento e da suscetibilidade e robustez do equipamento, o afundamento pode causar a atuação de proteções ou o desligamento de equipamentos essenciais ao processo, acarretando a paralisação do processo industrial que podem levar horas ou dias para serem restabelecidos.

Por vezes, as exigências do processo não são do conhecimento da concessionária e por isso não dão a devida atenção a esse tipo de distúrbio.

Tabela 4: Perdas Financeiras em Grandes Consumidores Industriais e Comerciais (Interrupções e Afundamentos de Tensão)
 FONTE: [ALV 10], Pág. 16

OCORRÊNCIAS	HORAS DE PRODUÇÃO PERDIDA	PERCENTUAL DA PLANTA PARADA	PERDAS FINANCEIRAS MÉDIAS (US\$)
Desligamento de 4 horas SEM notificação	6,67	91%	74.835,00
Desligamento de 1 hora SEM notificação	2,96	91%	39.459,00
Desligamento de 1 hora COM notificação	2,26	91%	22.973,00
Afundamento de Tensão (até 3s)	0,36	37%	7.694,00

Valores médios, USA. Pesquisa realizada no início dos anos 90

Não obstante, é economicamente inviável eliminar todas as falhas do SEP, para que não haja afundamentos de tensão. Como alternativa, é possível adequar os sistemas dos consumidores para que se tornem menos suscetíveis aos afundamentos. Abaixo as curvas típicas de suscetibilidade dos contactores de motor e dos Acionadores a Velocidade Variável (AVVs).

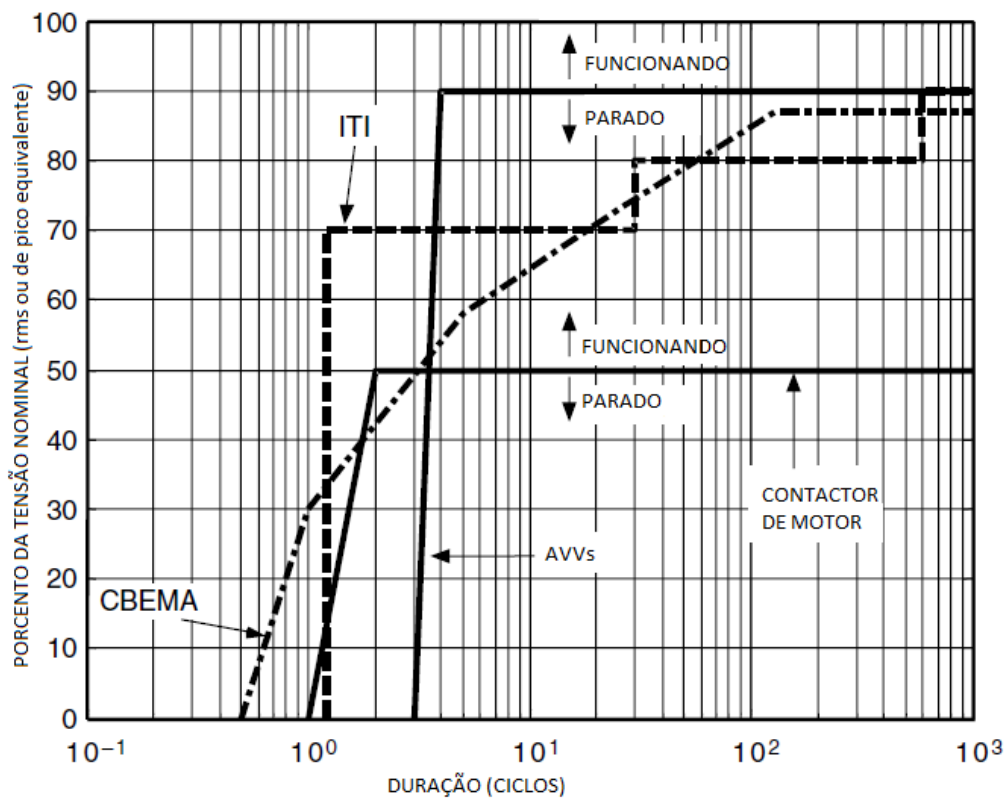


Figura 11: Curva típica de suscetibilidade
 FONTE: [DUG 96], Pág. 50

Sendo assim, é preciso que seja feito um estudo de viabilidade para cada caso, para cada consumidor ou até mesmo para cada carga que sofre os afundamentos. Se o custo para se reduzir o número de afundamentos for maior do que os prejuízos causados por este, as ações de mitigação do distúrbio tornam-se inviáveis. Medidas simples, a exemplo, mudanças nas especificações dos equipamentos podem gerar uma redução significativa no número de paralisações do processo.

O afundamento de tensão é um problema de análise complexa, pois possui uma grande quantidade de parâmetros envolvidos, como por exemplo, características do SEP e das cargas, tipo de falta que o desencadeia, proteção do sistema etc. Assim, é preciso conhecer bem as características do distúrbio, com

probabilidade de ocorrência e outras informações estatísticas, sensibilidade dos equipamentos e quantização dos prejuízos causados ou que ainda possam ser causados.

3 DISPOSITIVOS FACTS

Os dispositivos FACTS - Flexible AC Transmission System - definido pelo IEEE como: "Sistemas de transmissão de corrente alternada, incorporando controladores baseados em eletrônica de potência e outros controladores estáticos, a fim de aprimorar a controlabilidade e aumentar a capacidade de transferência de potência do sistema", é uma alternativa para eliminação ou mitigação dos distúrbios relacionados nos itens anteriores.

Estes dispositivos podem controlar dinamicamente a impedância da linha, a tensão, o fluxo de potência ativa e reativa e, quando o armazenamento de energia se torna economicamente viável, também é possível fornecer e absorver potência ativa.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para melhor compreensão do princípio básico de funcionamento dos dispositivos FACTS e flexibilização proporcionada por eles, basta analisar o efeito na capacidade de transmissão de energia, resultante do controle da reatância série de uma linha.

Sabendo que o fluxo de potencia ativa através de uma linha sem perdas entre dois pontos "k" e "l" é dado por:

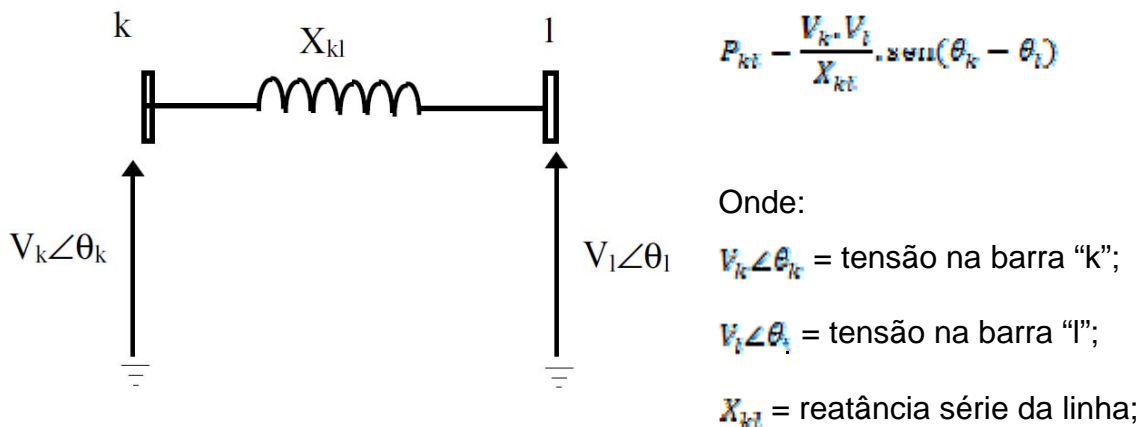
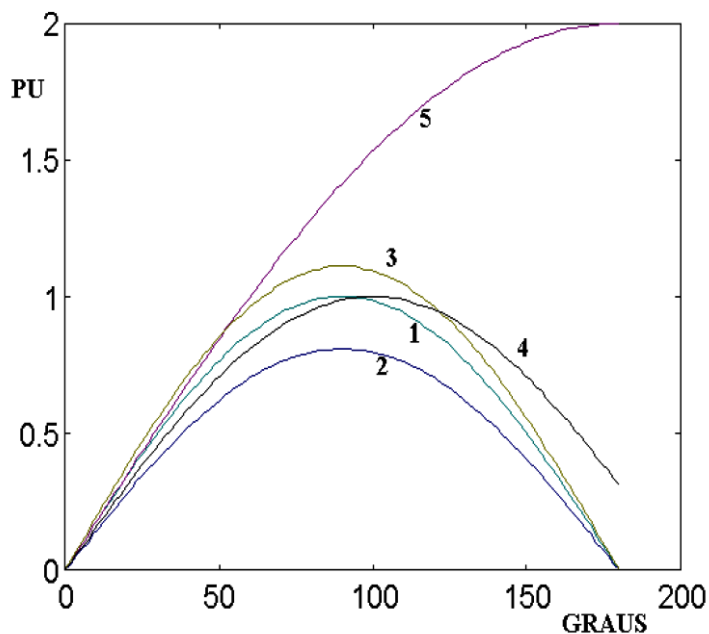


Figura 12: Modelo de linha sem perdas
 FONTE: [DEC 09], Pág. 1-4

À análise da equação, percebe-se a possibilidade de aumentar a capacidade de transmissão, variando-se as tensões V_k e V_l , entretanto, esta interferência possui suas restrições, pois pode afetar a operação das cargas ligadas ao sistema. É possível, também, controlar o fluxo de potência alterando o ângulo de abertura, $(\theta_k - \theta_l)$, porém este tipo de controle envolve medição de altas potências. Assim, a alternativa mais simples e factível seria o controle da reatância equivalente da linha, X_{kl} .



- 1. Condição normal
- 2. Redução de 10% da tensão

- 3. Redução de 10% da reatância série

- 4. Compensação de 10% da abertura angular
- 5. Compensação *shunt* no meio da linha

Figura 13: Curvas comparativas de capacidade da linha
 FONTE: [DEC 09], Pág. 1-5

A instalação de um controlador de tensão no meio da linha permitiria aumentar a capacidade de transmissão, entretanto, seria necessária a construção de uma subestação para instalação do regulador.

Com a utilização dos dispositivos FACTS é possível controlar diretamente a reatância equivalente da linha, X_{lt} , através da compensação *shunt*. Um compensador capacitivo, por exemplo, poderia ser instalado em qualquer ponto da linha, onde já exista uma subestação.

Assim, com o controle da reatância série, em regime permanente, é possível monitorar e direcionar o fluxo de potencia através da rede, amortecendo controladamente as oscilações de potência na rede devido a entradas e saídas de cargas no sistema.

Os dispositivos FACTS podem ser classificados em três categorias:

- Compensador paralelo (*shunt*);
- Compensador série;
- Compensador híbrido (série e paralelo) e
- Controlador de ângulo de transmissão

3.2 COMPENSADOR PARALELO (*SHUNT*)

A Compensação *shunt* é usada para influenciar as características elétricas naturais da linha de transmissão, para aumentar a capacidade de transmissão de potência da linha e controlar o perfil de tensão ao longo da mesma. São exemplos de compensadores *shunt*:

- *Static VAR Compensator (SVC)*;
- *Static synchronous compensator (STATCOM)*;
- *Thyristor-Controlled and Thyristor-Switched Reactor (TCR e TSR)*;
- *Thyristor-Switched Capacitor (TSC)*.

Ao fazer uso de um controlador *shunt* no meio da linha, a tensão pode ser controlada de tal forma que os valores das tensões no meio e no fim da linha sejam os mesmos. Isto possibilita um aumento na capacidade de transmissão da linha

De outra forma, se o compensador *shunt* estiver localizado no final da linha, em paralelo com a carga, é possível regular a tensão neste ponto e, assim, evitar instabilidade de tensão causada por variações de carga ou no gerador.

Como a compensação *shunt* é capaz de alterar o fluxo de potência do sistema, durante ou após distúrbios dinâmicos, também é possível realizar um amortecimento das oscilações causadas pela aceleração e desaceleração de máquinas ligadas ao sistema [GAB 05].

3.3 COMPENSADOR SÉRIE

A compensação série variável é altamente eficaz tanto no controle do fluxo de potência da linha quanto na melhoria da estabilidade do sistema. Com a compensação série, a impedância total de transmissão pode ser arbitrariamente reduzida de forma a influenciar o fluxo de energia ($P = \frac{V^2}{X} \cdot \sin \delta$). Esta capacidade de controlar o fluxo de energia pode ser efetivamente usada para aumentar o limite de estabilidade transitória e fornecer amortecimento de oscilação de energia [GAB 05]. São exemplos de compensadores série:

- *Thyristor-Switched Series Capacitor (TSSC);*
- *Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC);*
- *GTO Thyristor-Controlled Series Capacitor (GCSC);*
- *Static Synchronous Series Compensator (SSSC);*
- *Thyristor Controlled Serie Reactor (TCSR).*

3.4 COMPENSADOR HÍBRIDO (SÉRIE E PARALELO)

Como os controladores série impactam diretamente o fluxo de corrente e potência, se o objetivo da aplicação é controlar e amortecer as oscilações de fluxo de corrente e potência, estes são várias vezes mais poderosos do que os controladores *shunt*.

Já os controladores *shunt* são como fontes de corrente – retiram ou injetam corrente na linha. Assim, são mais indicados para controlar a tensão próximo ao ponto de conexão através da injeção de corrente reativa. Como os STATCOMs podem inserir tanto corrente ativa como reativa, estes são capazes de proporcionar um controle de tensão mais eficaz como também amortecer oscilações na tensão.

Isso não significa que os controladores série não possam ser usados no controle de tensão, visto que as flutuações de tensão são em grande parte consequência da queda de tensão na impedância série de linhas, transformadores e geradores, a utilização de um compensador série pode ser a opção com a melhor relação custo-benefício. No entanto, um controlador *shunt* é muito mais eficaz na manutenção de um perfil de tensão necessária em um barramento da subestação. Isso acontece porque o controlador *shunt* atende ao nó do barramento de forma independente das linhas individuais conectados ao barramento.

A partir das considerações acima, pode-se concluir que a combinação do controlador série e *shunt* pode fornecer o melhor de ambos, ou seja, um controle efetivo do fluxo de potência, corrente e tensão de linha [GAB 05]. São exemplos de compensadores *shunt*:

- *Unified Power Flow Controller (UPFC)*;
- *Interline Power Flow Controller (IPFC)*;
- *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*;

3.5 CONTROLADOR DE ÂNGULO DE TRANSMISSÃO

Os controladores do ângulo de fase são capazes de resolver problemas referentes ao ângulo de transmissão que não podem ser tratadas pelos compensadores citados anteriormente. Embora estes reguladores, baseados no arranjo clássico de mudança de *TAP* do transformador, não sejam capazes de fornecer ou absorver potência reativa, estes são capazes de trocar energia ativa com o sistema. Além disso, os modernos reguladores de tensão e ângulo de fase são usados para melhorar a estabilidade transitória, proporcionar amortecimento das oscilações de potência e minimizar a sobrecarga causada por perturbação e quedas de tensão [GAB 05]. São exemplos de compensadores *shunt*:

- *Phase Angle Regulators (PAR)*
- *Phase Shifting Transformers (PST)*

3.6 UTILIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FACTS

A aplicação dos dispositivos depende do problema que precisa ser resolvido. A Tabela 5, fornece uma visão geral dos problemas que ocorrem na rede e quais dispositivos podem ser utilizados na sua resolução ou mitigação.

Tabela 5: Exemplo de utilização dos dispositivos FACTS
 FONTE: [GAB 05], Pág. 27

TÓPICO	PROBLEMA	AÇÃO CORRETIVA	FACTS
Limites de Tensão	Subtensão em alta carga	Fornecer energia reativa	SVC, STATCOM
		Reduzir a reatância da linha	TCSC
	Sobretensão em baixa carga	Absorver potência reativa	SVC, STATCOM
	Sobretensão após interrupção	Absorver potência reativa	SVC, STATCOM
	Subtensão após interrupção	Fornecer potência reativa	SVC, STATCOM
Limites Térmicos	Sobrecarga no circuito de transmissão	Aumentar capacidade de transmissão	TCSC, SSSC, UPFC
Fluxo de Carga	Distribuição de energia em linhas paralelas	Ajuste das reatâncias de linha	TCSC, SSSC, UPFC
		Ajuste do ângulo de fase	UPFC, SSSC, PAR
	Inversão do fluxo de carga	Ajuste do ângulo de fase	UPFC, SSSC, PAR
Curto-circuito	Alta corrente de curto-circuito	Limitar corrente de curto-circuito	TCSC, UPFC
Estabilidade	Potência de transmissão limitada	Diminuir reatância da linha	TCSC, SSSC

4 CUSTOM POWER

Os dispositivos classificados como “custom power” fazem parte de uma classe especial de condicionadores de energia. Estes dispositivos geralmente são usados para corrigir os problemas de qualidade de energia enfrentados pelos usuários finais, problemas estes mencionados anteriormente (ex. afundamentos e interrupções de tensão, flicker e distúrbios harmônicos). Enquanto o termo FACTS não possui limite de tensão, o termo “custom power” é limitado pelo IEEE P1409 - Distribution Custom Power Task Force - [IEE 03] para tensões entre 1 a 38 kV. O IEEE P1409 [IEE 03] limita também o local de instalação ao sistema primário de distribuição (média tensão). No entanto, as tecnologias utilizadas em média e baixa tensão são, com frequência, muito semelhantes.

Como os consumidores de energia não possuem acesso ao sistema de transmissão e distribuição de energia, a instalação de equipamentos condicionadores de energia é a única forma de mitigação dos efeitos causados pelos distúrbios. Geralmente, a melhor solução, de maior custo benefício, é a instalação destes equipamentos para proteção das cargas mais sensíveis dentro das instalações do usuário final.

Podem ser citados como mais usados nesse nível de tensão:

- Compensadores série estáticos (SSC);
- Reguladores estáticos de tensão (SVR);
- Armazenamento de energia (BSES);
- Chave estática de transferência (STS)

A aplicação destes condicionadores de energia tem crescido drasticamente nos últimos anos. Tal fato pode ser atribuído ao grande número de novas cargas menos tolerantes as variações de qualidade de energia, tais como os equipamentos eletrônicos de controle de processo e os Acionadores a Velocidade Variável (AVVs). Com as cargas se tornando cada vez mais sensíveis, e o tempo de planta para cada vez mais caro, a aplicação de equipamentos condicionadores de energia passa a ser indispensável.

5 CONCLUSÃO

De acordo com estudos realizados pelo *World Energy Council* (WEC) em conjunto com o *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) para três cenários de crescimento do consumo energético mundial, nota-se que o consumo de energia elétrica poderá, no cenário A, por exemplo, quase dobrar.

Tabela 6: Consumo Mundial de Energia
FONTE: [ISA 03], Pág. 3 – Tabela 1

	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
	2000	2030	2000	2030	2000	2030
Energia Primária (10^{12} Btu)	400	720	400	620	390	440
Energia Elétrica (10^3 TWh)	15	28	14	23,5	13	18

Sendo assim, com o aumento progressivo da carga energética do país e do mundo, o controle do fluxo de potência, torna-se cada vez mais necessário, pois é preciso, operar, com segurança, próximos do limite de carregamento dos equipamentos. Entretanto, os atuais equipamentos, baseados nos tiristores, possuem limitações devido à impossibilidade de controle total dos interruptores, que não podem ser comandados para o desligamento, os principais esforços na área da eletrônica de alta potência se concentram em aperfeiçoar a tecnologia de chaves eletrônicas totalmente controladas, do tipo GTO (Gate Turn-Off Thyristor), IGCT (Integrated Gate Controlled Thyristor) e IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor), que podem ligar e desligar circuitos com muito maior rapidez e repetitividade do que os tiristores e que compõem os circuitos dos dispositivos FACTS.

Com a evolução destes dispositivos, espera-se ser possível nos próximos anos dotar todo o sistema elétrico de potência de recursos para o controle dinâmico do fluxo de potência em todos os níveis, desde a geração até o consumo. Como consequência, novos sistemas de proteção e rotinas de supervisão da operação também deverão ser implementados, baseados no fato de que os parâmetros e a estrutura do sistema poderão variar continuamente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ALV 10] ALVES, Mário Fabiano. Tópicos Avançados em Engenharia Elétrica QEE - Qualidade da Energia Elétrica, 2007
- [ANS 06] ANSI C84.1-2006, American National Standard for Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hz), 2006
- [CIG 04] CIGRE WG C4.07 / CIRED, Power Quality Indices and Objectives, IEC - International Electrotechnical Commission, 2004
- [DEC 09] DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS, 2009.
- [DUG 96] DUGAN, R. C. MCGRANAGHAN, M. F. BEATY, H. W., Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 1996
- [GAB 05] GABRIELA Glanzmann, FACTS Flexible Alternating Current Transmission Systems, EEH - Power Systems Laboratory, ETH Zürich, 2005.
- [HIN 00] HINGORANI, Narain G.; GYUGYI Laszlo. Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press, New York, 2000.
- [HIN 93] HINGORANI, Narain G.; STAHLKOPF, K. E. High-Power Electronics, Scientific American, Nov., 78-85, 1993
- [IEC 05] International Electrotechnical Commission, IEC 61000-3-2, Harmonics Standards Overview, 2005
- [IEE 03] IEEE P1409 Custom Power Task Force, acessível em <http://grouper.ieee.org/groups/1409/>, 2003
- [IEE 03] SABIN, Daniel D., Senior Member, IEEE, e AMBRA Sannino. IEEE P1409, Custom Power Application Guide, 2003
- [IEE 09] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 1159™, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.
- [IEE 92] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 519 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1992.
- [IRI 06] IRIZARRY, Miguel, VÉLEZ, Tomás, Mitigation of Back-to-Back Capacitor Switching Transients on Distribution, PREPA, 2006

- [ISA 03] ISAIAS Carvalho de Macedo, Estado da arte e tendências tecnológicas para energia, CTenerg – Secretaria Técnica de Fundo Setorial de Energia, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação, 2003.
- [KAZ 04] KAZEMI A., ANDAMI H., FACTS Devices in Deregulated Electric Power Systems: A Review, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004), Kong, 2004
- [MAC 09] MACEDO JR, José Rubens, Uma contribuição à análise das componentes inter-harmônicas e seus efeitos nos indicadores de flutuação de tensão, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2009.
- [MIH 93] MIHALIC, R., ZUNKO, P., PAPIC, I., POVH, D, Improvement of Transient Stability By Insertion of Facts Devices. IEEE Power Tech. Conf., Athen, 1993.