



**UFPR**



## TE 991 - Tópicos Avançados em Eletrônica I

### Cap. 1 - Introdução à QEE

Prof. Mateus Duarte  
Teixeira



# 1. A Motivação de Estudar a QEE

## Os equipamentos tornaram-se mais sensíveis

- Equipamentos eletrônicos e baseadas em eletrônica de potência se tornaram mais sensíveis a distúrbios de tensão
- As empresas se tornaram mais sensíveis à perda de tempo de produção
- Redução de margens de lucro
- A eletricidade é considerada um direito básico, que deve estar sempre presente
- A interrupção levará a reclamações, mesmo que não haja danos ou custos relacionados a ela

# 1. A Motivação de Estudar a QEE

## Equipamentos causam distúrbios de tensão

- Atuação de equipamentos devido a distúrbios na tensão de alimentação é detectado pelos clientes como “má qualidade de energia”
- As concessionárias veem os distúrbios por meio dos equipamentos do usuário final
- Equipamentos eletrônicos modernos não são apenas sensíveis a distúrbios de tensão, mas também causam distúrbios para outros clientes
- Equipamento acionado por conversor, grande número de pequenos equipamentos eletrônicos de consumo,...

# 1. A Motivação de Estudar a QEE

## Crescente necessidade de padronização

- Hoje as concessionárias têm que tratar os consumidores como “clientes”
- A eletricidade é vista como produto com certas características (além do preço), que devem ser medidas, garantidas, melhoradas,... (qualidade)
- Necessidade de critérios de padronização e desempenho
- Privatização e desregulamentação do setor elétrico
- Competição aberta
- Quem é responsável pela confiabilidade e qualidade



# 1. A Motivação de Estudar a QEE

## Concessionárias querem entregar um bom produto

- Muitos desenvolvimentos de qualidade de energia são impulsionados pelas concessionárias
- A maioria das empresas de serviços públicos deseja fornecer um bom produto e está comprometida com isso há muitas décadas
- Projetar um sistema com alta confiabilidade de fornecimento por um custo limitado é um desafio técnico

# 1. A Motivação de Estudar a QEE

## As fontes de alimentação estão melhores

- Alta qualidade da tensão de alimentação
- Longas interrupções tornaram-se raras na maioria dos países industrializados
- Impressão errada de que a eletricidade é algo que está sempre disponível e sempre de alta qualidade
- Em países onde o fornecimento de eletricidade tem uma alta indisponibilidade, a qualidade da energia não parece ser um problema tão grande quanto em países com disponibilidade acima de 99,9%.



# 1. A Motivação de Estudar a QEE

## A qualidade da energia pode ser medida

- A disponibilidade de dispositivos eletrônicos para medir e exibir formas de onda contribuiu para o interesse na qualidade da energia
- Correntes harmônicas, quedas de tensão, flicker eram difíceis de medir em grande escala no passado
- As medidas eram restritas à tensão rms, frequência e longas interrupções.

## 2. Definições de QEE

### O que é "boa qualidade de energia"

- Se a tensão:
  - Tem uma forma de onda senoidal constante, apenas contendo frequência fundamental
  - Forma um sistema de energia trifásico simétrico
  - Tem um valor constante rms, inalterado ao longo do tempo
  - Não é afetado por alterações de carga
  - É confiável, ou seja, disponível quando necessário



## 2. Definições de QEE

- Qual termo usar para interações concessionária-cliente (carga do sistema)
- Não se pode falar sobre a qualidade de uma quantidade física como a potência
- O termo “qualidade de energia” não fornece uma descrição perfeita de um fenômeno
- IEC em seus documentos padrão usa o termo compatibilidade eletromagnética, que não é o mesmo que a qualidade da energia.

## 2. Definições de QEE

- Definição IEEE de qualidade de energia: Qualidade de energia é o conceito de energização e aterramento de equipamentos sensíveis em termos do que é adequado para a operação desse equipamento.
- Definição IEC de compatibilidade eletromagnética: Compatibilidade eletromagnética é a capacidade de um equipamento ou sistema funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético sem introduzir perturbações eletromagnéticas intoleráveis a qualquer “coisa” nesse ambiente.

## 2. Definições de QEE

### Qualidade de tensão

- Em relação aos desvios da tensão ideal - onda senoidal de frequência única constante e magnitude constante
- Abrange apenas aspectos técnicos
- Distorções de corrente são refletidas na distorção de tensão (impedância)
- Regularmente utilizado em publicações europeias
- Interpretado como a qualidade do produto entregue pela concessionária aos clientes
- Usada pelo PRODIST e pelo ONS

## 2. Definições de QEE

### Qualidade da Corrente

- Definição complementar
- Desvios da corrente do ideal
- Requisito adicional, a corrente está em fase com a tensão de alimentação
- Qualidade da corrente está relacionada com o consumidor
- Se a corrente ou a tensão se desviarem do ideal, é difícil para o outro seguir ideal

## 2. Definições de QEE

### Qualidade da Energia

- Combinação de qualidade de tensão e qualidade de corrente
- Desvios de tensão e/ou corrente do ideal
- Qualidade de energia não tem nada a ver com desvios do **produto** de tensão e corrente (**a energia**) de qualquer forma ideal

## 2. Definições de QEE

### **Qualidade do Fornecimento**

- Inclui parte técnica (qualidade de voltagem) mais uma parte não técnica, às vezes chamada de “qualidade de serviço”
- O segundo abrange a interação entre o cliente e a concessionária
- As responsabilidades do cliente não estão incluídas

## 2. Definições de QEE

### **Qualidade do Consumo**

- Termo complementar de qualidade de fornecimento
- Conteria a qualidade da corrente
- Cliente é quem paga a conta da eletricidade

## 2. Definições de QEE

### **Compatibilidade eletromagnética (EMC)**

- Usada em padrões IEC
- Interações mútuas entre equipamentos e interações entre equipamentos e fonte
- “emissão” é poluição eletromagnética produzida por um dispositivo
- "Imunidade" é a capacidade do dispositivo de suportar a poluição eletromagnética
- Emissão está relacionada com a qualidade a corrente
- Imunidade está relacionada com a qualidade da tensão



### 3. Por que se preocupar com a QEE

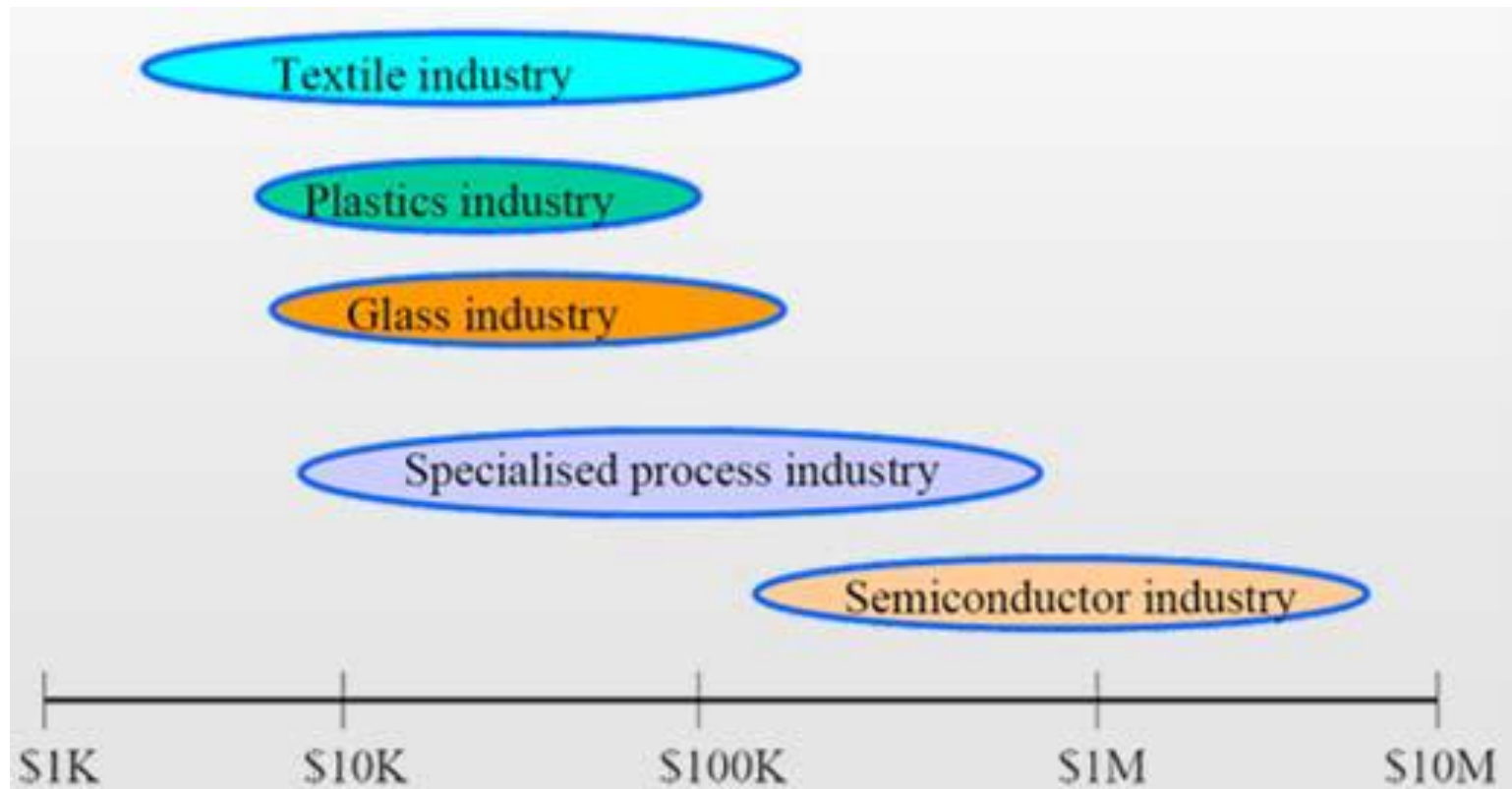
- Valores econômico
- Impactos econômicos nas concessionárias, seus clientes e fabricantes de equipamentos (carga)
- Consequências financeiras diretas para clientes industriais e concessionárias
- As concessionárias estão interessadas em atender às expectativas dos clientes e manter a confiança - custos indiretos (competição entre concessionárias)
- Fabricantes de equipamentos
  - mercado competitivo
  - características do equipamento para

## 4. Valores Econômicos

- Custos de qualidade de energia inadequados
  - Perda de produção
  - Perda de materiais
  - Avaria do equipamento
  - Envelhecimento acelerado do equipamento
  - Perdas de energia adicionais
- Economia
  - Materiais não utilizados
  - Conta de luz
  - As economias são muito menores que os custos

## 4. Valores Econômicos

- Perdas por afundamentos de tensão em diferentes indústrias (US\$)



## 4. Valores Econômicos

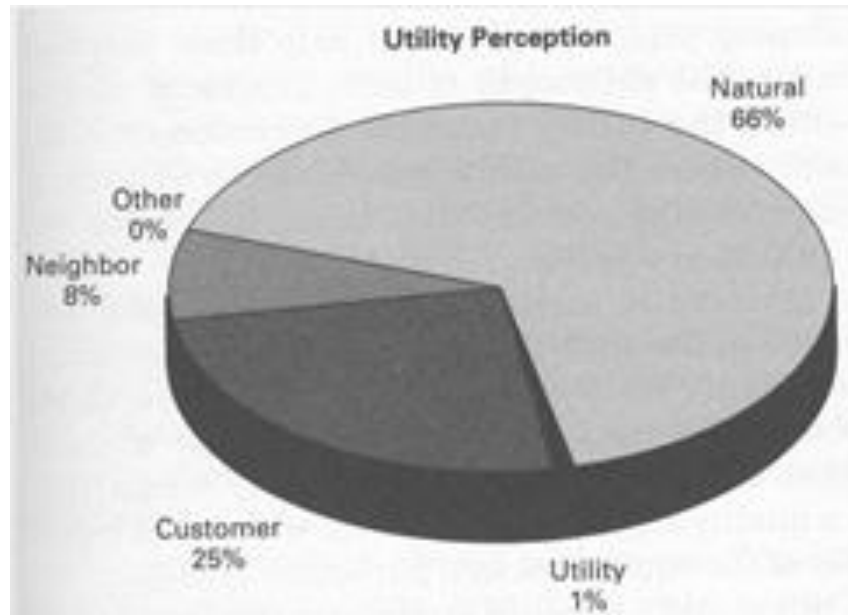
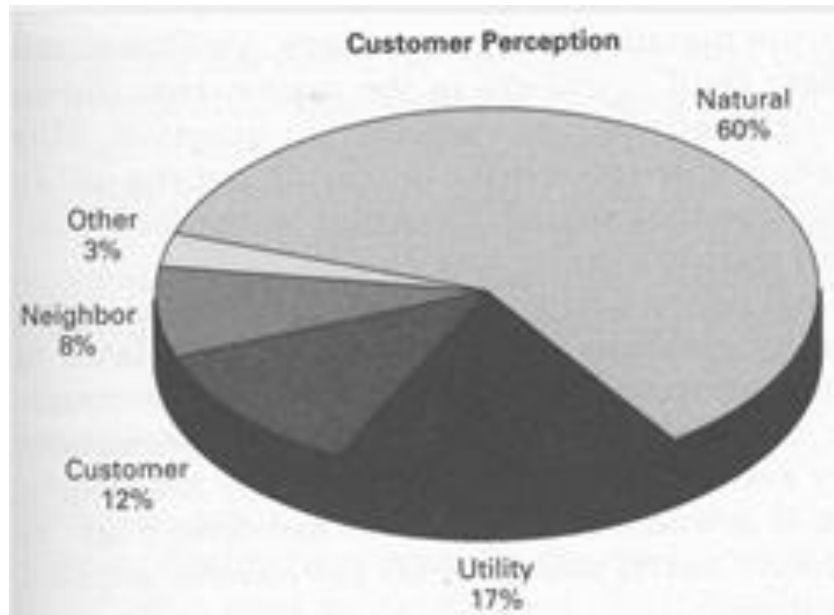
- Custos estimados de interrupção de energia (EUA, 1992, pesquisa em 210 grandes clientes industriais)
- custo médio por evento:
  - 4h de interrupção (acidental) - 74.835 \$
  - 1h de interrupção (acidental) - 39.459 \$
  - 1h de interrupção (pré-agendada) - 22.973 \$
  - afundamento de tensão - 7.694 \$
  - interrupção momentânea - 11.027 \$

## 4. Valores Econômicos

- Custos estimados por perturbação
  - 6 \$/kVA de carga (Europa)
  - 40 \$/kVA de carga (EUA)
- Custo estimado de um único mergulho (EUA)
  - 50.000 \$ - 1.000.000 \$
- Empresas de dados: interrupção de £1M/min
- Custo médio do tempo de inatividade
  - comunicações móveis 41.000 \$/hora
  - reservas de passagens aéreas 90.000 \$/hora
  - operações com cartão de crédito 2.580.000 \$/hora
  - operações de corretagem 6.480.000 \$/hora

## 4. Responsabilidades

- Muitos mal-entendidos em relação às causas dos problemas de qualidade de energia
- A perspectiva da concessionária e do consumidor são, muitas vezes, muito diferentes:



## 4. Responsabilidades

- Pesquisa com indústrias de médio porte nos EUA:
  - 87% das concessionárias são responsáveis pela entrega de energia “limpa” na entrada do serviço principal
  - 11% das concessionárias são responsáveis por todos os problemas
  - 2% da planta é responsável por todos os problemas:

## 4. Responsabilidades

- Normatização
- A concessionária é responsável pela qualidade da tensão
- Os clientes são responsáveis pela qualidade da corrente
- Localização de perturbações
  - medições
  - métodos diferentes
  - dificuldades em alguns casos (distorção harmônica)
  - atribuição de custos para medidas de mitigação



## 4. Responsabilidades

- O estabelecimento de indicadores para o controle e avaliação do produto “energia elétrica” é bastante complexo e apresenta peculiaridades técnicas que dificultam seu tratamento de forma simples:
  - Caráter aleatório nas ocorrências dos distúrbios de QEE;
  - Inevitabilidade técnica de ocorrências destes distúrbios;
  - Variado nível de sensibilidade dos consumidores, uma vez que cada consumidor percebe a qualidade da energia de forma diferenciada;
  - Dificuldade de executar controle prévio da QEE, como ocorre com outros produtos, visto que a geração, transmissão, distribuição e consumo da energia ocorrem simultaneamente;
  - Extensa área de vulnerabilidade do sistema elétrico, representado por milhares de quilômetros de linhas de transmissão, subtransmissão e distribuições aéreas.

## 5. Causas dos Distúrbios

### **Dos distúrbios originados externamente às instalações industriais:**

- Ações provocadas pela obra da natureza como: descargas atmosféricas, contato de galhos de árvores, ventos fortes, contatos de animais, gelo, etc.
- Eventos de causas aleatórias como: atividades de construção, acidentes envolvendo veículos motores, falhas de equipamentos.
- Operações normais da empresa como chaveamentos, operações com bancos de capacitores e atividades de manutenção.

## 5. Causas dos Distúrbios

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

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



## 6. A necessidade de uma terminologia de QEE comum

- Necessidade de terminologia comum para:
  - Evitar confusão de muitos termos diferentes que têm significados semelhantes
  - Desenvolver padrões para caracterizar e categorizar os resultados de monitoramento
  - Permitir a análise estatística de dados obtidos de diferentes fontes
  - Facilitar a comunicação ao descrever problemas encontrados.

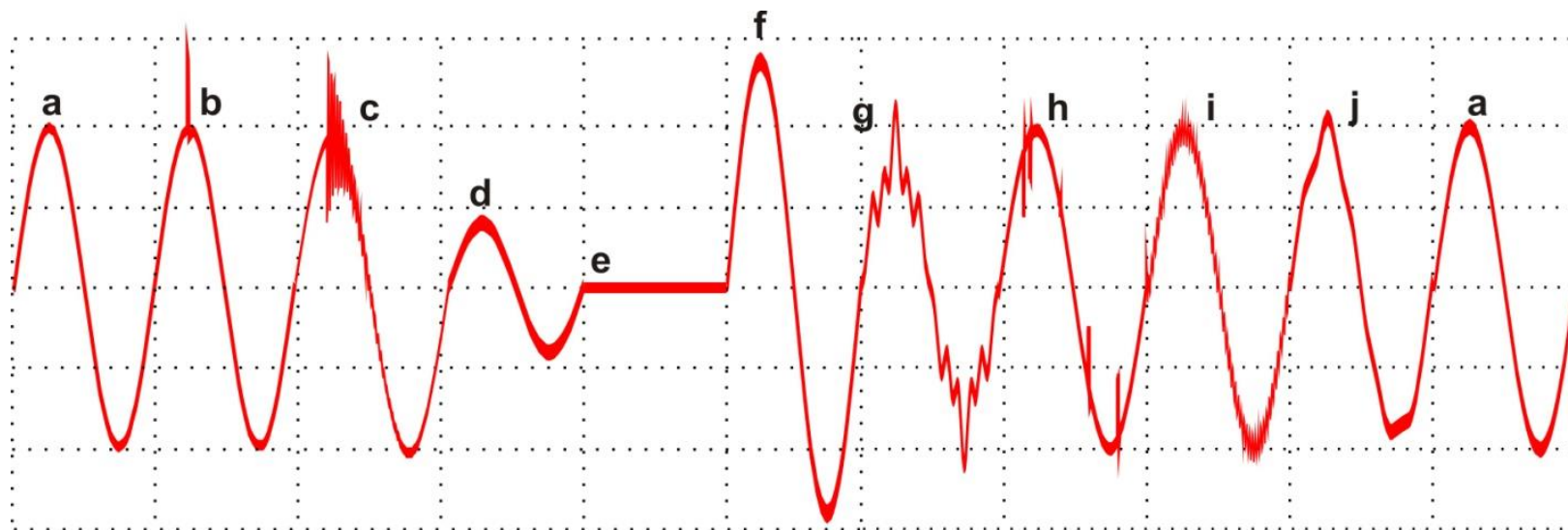
## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Duas principais categorias de variações de qualidade de energia**

- Distúrbios
  - Transitórios
  - Variações de tensão de curta duração - VTCD
  - Interrupções de fornecimento
- Fenômenos em regime permanente
  - Regulação de tensão
  - Distorção harmônica
  - Flutuação de tensão
  - Desequilíbrio de tensão

## 6. Categorias de problemas de QEE

Duas principais categorias de variações de qualidade de energia



a - tensão senoidal

b - transitório impulsivo

c - transitório oscilatório

d - afundamento de tensão

e - interrupção

f - elevação de tensão

g - harmônico

h - corte de tensão

i - ruídos

j - interharmônicos

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Transitórios**

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Existem dois tipos de transitórios: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Variações de Tensão de Curta Duração**

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Dependendo do local da falha e das condições do sistema, o resultado pode ser um afundamento momentâneo de tensão ("sag"), uma elevação momentânea de tensão ("swell"), ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico.



## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Variações de Tensão de Longa Duração**

As variações de tensão de longa duração são fenômenos semelhantes aos fenômenos de curta duração, porém com a característica de se manterem no sistema elétrico por tempos superiores a 3 minutos. São causados por saídas de grandes blocos de carga, perdas de fase, dentre outras.

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Desequilíbrios;**

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária



## 6. Categorias de problemas de QEE

### **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 frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda:

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Harmônicos:**

Tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (50 ou 60 Hz) na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados no sistema de energia.

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Interharmônicos**

Componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60Hz). Elas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais "carrier" em linhas de potência também podem ser considerados como interharmônicos. Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas admite-se que os mesmos podem afetar a transmissão de sinais "carrier" e induzir "flicker" visual no display de equipamentos como tubos de raios catódicos.

## 6. Categorias de problemas de QEE

### Nível CC

A presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado "DC offset". Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil.

## 6. Categorias de problemas de QEE

### "Notching"

Distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Este fenômeno pode ser detectado através do conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os "notchings" são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica.

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Ruídos**

É definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 KHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas e, normalmente estão relacionados com aterramentos impróprios.



## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Flutuações de tensão**

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito "flicker" ou cintilação luminosa. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar: Flutuações Aleatórias; Flutuações Repetitivas; Flutuações Esporádicas.

## 6. Categorias de problemas de QEE

### **Variações de frequência**

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60Hz). A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de  $60 \pm 0,5\text{Hz}$ ). Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.