

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
COORDENAÇÃO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE  
CURSO**

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DE HARMÔNICOS NO SISTEMA  
DE DISTRIBUIÇÃO DA ACUMULADORES MOURA S/A.**

Aluno:

Marcos Lázaro de Andrade Quirino

Orientador:

Antônio do Nascimento Epaminondas, MSc.

**Campina Grande – PB**

**Dezembro/2005**



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
COORDENAÇÃO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DE HARMÔNICOS NO SISTEMA  
DE DISTRIBUIÇÃO DA ACUMULADORES MOURA S/A.**

Marcos Lázaro de Andrade Quirino

Aluno

Antônio do Nascimento Epaminondas, Msc.

Orientador

Relatório apresentado à banca  
Examinadora do Trabalho de Conclusão  
de Curso de Engenharia Elétrica para  
análise e aprovação.

**Campina Grande – PB**

**Dezembro/2005**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que me aconteceu até hoje, e pelo dom da vida; aos meus pais, Lázaro e Ana, por me darem todo o apoio que necessitei ao longo de minha jornada até aqui, tanto no lado pessoal como no profissional, me ajudado financeiramente para que pudesse concluir o curso superior e realizando assim o sonho de ver seu filho diplomado; a minha irmã, Maristella pela sincera amizade e a Gerlane pela compreensão, dedicação, carinho e principalmente pela paciência.

Aos professores do departamento de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos, especialmente aos professores Antônio Epaminondas e Edson Guedes pela orientação profissional durante os anos de monitoria.

Aos meus amigos (em especial a George, Max, Robson, Ítalo, Francelino, Márcio Jorge e Georgeton) que, durante a vida acadêmica, me ajudaram a superar obstáculos, em estudos que às vezes varavam a noite, e por proporcionar bons momentos de diversão e lazer.

Sei que não mencionei todos aqui, mas quero que saibam que todos aqueles que me ajudaram e não foram citados aqui, têm com certeza da minha gratidão por toda a contribuição que me prestaram durante todos estes anos de minha vida. A vocês meu muito obrigado!

## **RESUMO**

Neste trabalho, foram medidos sinais de tensão e corrente nas instalações elétricas da Acumuladores S/A, em horário de ponta. De posse das medições de tensão e corrente, foram realizados os cálculos de DHT (distorção harmônica total) e DHI (distorção harmônica individual) de tensão e de corrente, bem como da corrente de curto-circuito. Uma análise comparativa foi realizada com a recomendação internacional IEEE-519 que trata de práticas e requisitos recomendados para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência. A recomendação estabelece limites para os valores de DHT e DHI de tensão e de corrente.

# Índice

<b>1. Introdução</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Motivação</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Fundamentação teórica</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1 Considerações Gerais sobre Harmônicos</b> .....	<b>6</b>
3.1.1 Definições .....	6
3.1.2 Fontes de correntes harmônicas .....	7
3.1.3 Características das harmônicas .....	7
Análise de harmônicas .....	7
3.1.4 Os indicadores essenciais da distorção harmônica .....	9
Fator de Potência .....	9
Fator de Crista (FC) .....	10
Taxa de Distorção Harmônica .....	11
<b>3.2 Princípio de Geração de Harmônicos</b> .....	<b>12</b>
<b>3.3 Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica</b> .....	<b>13</b>
3.3.1 Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico .....	13
3.3.1.1 Motores e geradores .....	13
3.3.1.2 Transformadores .....	14
3.3.1.3 Cabos de alimentação .....	15
<b>3.4 Verificação de conformidade com as normas</b> .....	<b>15</b>
A recomendação IEEE – 519 .....	15
<b>3.5 Técnicas de mitigação</b> .....	<b>17</b>
<b>4. Metodologia</b> .....	<b>19</b>
4.1 Descrição do equipamento utilizado .....	20
<b>5. Resultados das Medições de Tensão e Corrente na SE-04</b> .....	<b>21</b>
<b>6. Conclusões</b> .....	<b>25</b>
<b>7. Referências bibliográficas</b> .....	<b>26</b>
<b>Anexo</b> .....	<b>27</b>

# Lista de Figuras

<i>Figura 3.1 – Onda de frequência fundamental (60Hz) e harmônicos de 3ª e 5ª ordens</i> .....	7
<i>Figura 3.2 - Decomposição de uma onda distorcida</i> .....	9
<i>Figura 3.3 – Espectro de frequência</i> .....	9
<i>Figura 3.4 - Circuito genérico utilizado nas definições de FP e triângulo de potência</i> .....	10
<i>Figura 3.5 - Correntes em cargas lineares (a) e não-lineares (b)</i> .....	13
<i>Figura 3.6 - Exemplo de propagação de harmônicos pela rede</i> .....	13
<i>Figura 3.7 – Exemplos de filtro passivo (a) e filtro ativo (b)</i> .....	19
<i>Figura 4.1 – Fotografia mostrando a conexão das pinças no sistema elétrico</i> .....	20
<i>Figura 5.1 – Evolução da DHT da tensão da fase A</i> .....	22
<i>Figura 5.2 – Evolução da DHT de corrente na fase A</i> .....	23
<i>Figura 5.3 – Evolução do segundo harmônico no sinal de corrente</i> .....	24
<i>Figura 5.4 – Evolução do quinto harmônico no sinal de corrente</i> .....	24
<i>Figura 5.5 – Evolução do décimo primeiro harmônico no sinal de corrente</i> .....	25
<i>Figura 5.6 – Evolução do décimo terceiro harmônico no sinal de corrente</i> .....	25
<i>Figura A-1 Diagrama unifilar do sistema de distribuição</i> .....	29
<i>Figura A-2 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição (com geração própria)</i> .....	32
<i>Figura A.3 - Área de seção e diâmetro de fio de cobre que deve ser usado em função da frequência da corrente para que o aumento da resistência seja menor que 1%</i> .....	34

## **Lista de tabelas**

*Tabela 3.1 - Níveis de distorções na tensão - recomendações IEEE - 519..... 16*

*Tabela 3.2 - Níveis de distorções na corrente – recomendações IEEE - 519..... 16*

## 1. Introdução

Harmônico é um fenômeno que existe desde o início da utilização da corrente alternada. Mas só agora é que as harmônicas tornaram-se um problema para alguns segmentos da indústria elétrica. A razão é que a maioria das cargas em sistemas elétricos de potência eram lineares, isto é, a forma de onda da corrente se espelhava na forma de onda da tensão aplicada (característica da “Lei de Ohm”). Por exemplo, lâmpadas incandescentes solicitavam correntes senoidais quando tensões senoidais eram aplicadas a elas. Entretanto, as condições mudaram com o uso de dispositivos semicondutores. Com estes versáteis dispositivos somos capazes de controlar melhor as correntes para as cargas ao passo que isso aumenta a eficiência e/ou a controlabilidade da carga. As novas tecnologias quase sempre melhoram a capacidade de operação e controle, mas elas também podem ser apresentadas como alternativa de reposição das fontes “lineares” de potência, substituindo-as por dispositivos que operam em modo de chaveamento. Elas podem ser atualmente mais caras que os métodos alternativos de controle, mas elas são muito mais flexíveis, como no caso de controladores de motores. O uso destes dispositivos, entretanto, tem resultado em cargas não-lineares que solicitam da rede correntes não-senoidais contendo harmônicos.

Algumas destas novas fontes de harmônicos foram criadas para o uso e o controle mais eficiente de energia elétrica, como é o caso do conversor estático de potência. Ele é usado em várias aplicações como fontes chaveadas e variadores de frequência para aquecimento indutivo, bem como utilizado em chaves estáticas para variar/modular a tensão aplicada às cargas. Exemplo disso são as “*soft starters*” para motores, “*dimmers*”, etc. Estima-se que em 2010, 50% da potência produzida será modificada por semicondutores para alterar as características senoidais no intuito de melhorar a eficiência do seu uso. Entretanto quando a potência é modificada por estes semicondutores, a corrente resultante solicitada do sistema é não-senoidal.

Correntes harmônicas fluindo nos circuitos de potência podem induzir tensões e/ou correntes harmônicas em sinais de circuitos adjacentes. Os circuitos microprocessados para controle de processos resultam em equipamentos que usam sinais de baixo nível os quais estão sujeitos a ruído ou interferência de fontes externas. Elas podem ser combatidas com o uso de fibra ótica para reduzir a influência deste ruído nos circuitos. Também, blindagem apropriada dos componentes de circuitos de baixo nível e a isolação destes circuitos dos de potência, podem minimizar o efeito do ruído, inclusive dos harmônicos.

## 2. Motivação

O presente trabalho é motivado pela presença, nos últimos tempos, de alguns distúrbios gerados no sistema interno de distribuição de energia elétrica da Acumuladores Moura S/A, como por exemplo queima de equipamentos, desligamentos esporádicos, e aquecimento de condutores em níveis de temperatura acima do tolerável. Devido ao aquecimento excessivo, houve um incidente no qual o isolamento do condutor em uma das subestações foi derretido causando uma falta, desligando assim uma parte do sistema. Acredita-se que estes fenômenos surgiram devido à presença de harmônicas no sistema, pois com o avanço da tecnologia, o uso de cargas não-lineares (“*soft-starters*”, inversores de frequência, retificadores, etc.) aumentou consideravelmente os níveis de harmônicos, que já existiam.

### 3. Fundamentação teórica

#### 3.1 Considerações Gerais sobre Harmônicos

##### 3.1.1 Definições

Uma harmônica é definida como uma componente senoidal de uma onda periódica ou um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação. Desta forma podemos dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando a forma de onda desse sinal não é senoidal, ou dito de outro modo, um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal.

Note que, por exemplo, uma componente de frequência três vezes que a da frequência fundamental é chamada de *terceira harmônica*. Assim, em um sistema a 60Hz, uma componente harmônica,  $h$ , é uma senóide que tem uma frequência expressa pela seguinte:

$$h = n \cdot 60 \text{ Hz, onde } n \text{ é inteiro} \quad (1)$$

Na Figura 3.1 é mostrada a frequência fundamental (60Hz) e suas 3ª e 5ª harmônicas.

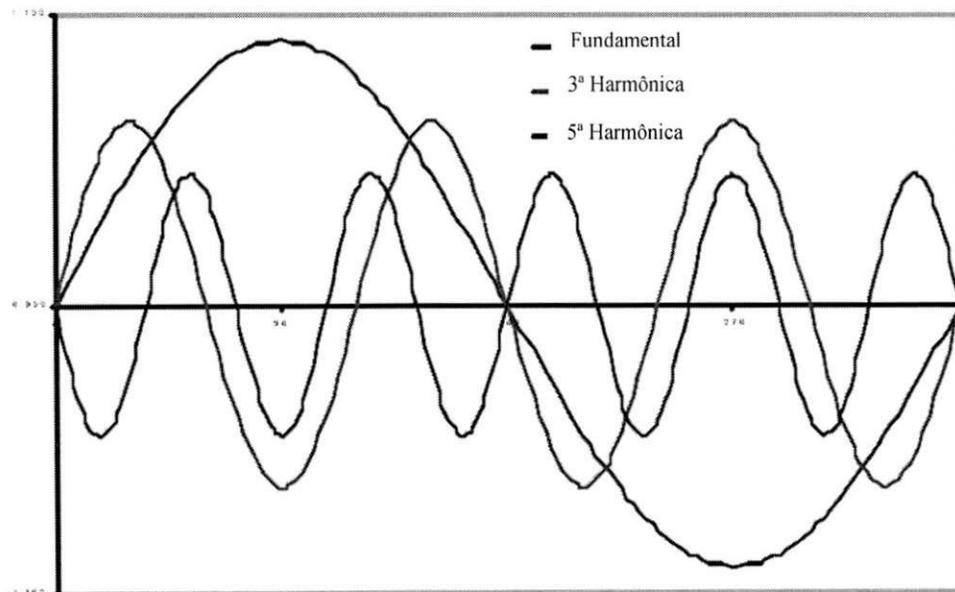


Figura 3.1 – Onda de frequência fundamental (60Hz) e harmônicos de 3ª e 5ª ordens

### 3.1.2 Fontes de correntes harmônicas

Correntes harmônicas resultam de cargas que solicitam correntes outras que não uma senóide. O caso mais comum destes são os conversores estáticos de potência, embora outras cargas são também não-senoidais, tal como se segue:

- Fornos a arco e outros dispositivos que utilizam o mesmo princípio como lâmpada fluorescente;
- Núcleos magnéticos, tal como transformadores e máquinas rotativas que solicitam terceira harmônica para excitar o ferro.
- Máquinas síncronas (seu funcionamento produz quinta e sétima harmônicas);
- Unidades ajustáveis de velocidade usadas em ventiladores, bombas e unidades de processo;
- Chaves de estado sólido que modulam a corrente para o controle de aquecimento, intensidade luminosa, etc.
- Fontes chaveadas usadas em computadores televisores, etc.
- Estações de transmissão de alta tensão (retificação CA (corrente alternada) para CC (corrente contínua), inversores de CC para CA)
- Inversores fotovoltaicos que convertem CC para CA.

### 3.1.3 Características das harmônicas

Qualquer forma de onda pode ser decomposta ou analisada como uma onda fundamental e um conjunto de harmônicas. Esta separação, ou análise, para o propósito de estudo dos efeitos da forma de onda nos sistemas de potência é chamado de *análise de harmônicas*.

#### *Análise de harmônicas*

Na Figura 3.2 ilustra-se três períodos de uma onda distorcida que foi gerada a partir da fundamental e de quatro componentes harmônicas em fase (terceira, quinta, sétima e nona). A decomposição de um sinal periódico dessa maneira é chamada de análise de Fourier. O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta:

- De uma expressão senoidal em frequência fundamental,
- De expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas),
- E de uma eventual componente contínua.

$$V(t) = \bar{V}_0 + \bar{V}_1 \cdot \text{sen}(\omega_0 t) + \bar{V}_2 \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega_0 t) + \bar{V}_1 \cdot \text{cos}(\omega_0 t) + \bar{V}_2 \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega_0 t) + \dots \quad (2)$$

A transformada rápida de Fourier (em inglês FFT) é um algoritmo bastante utilizado e que pelo qual consegue-se encontrar as amplitudes do sinal em cada frequência e daí montar-se o espectro de frequência que justamente vai nos dar uma idéia da contribuição de cada componente na formação do sinal original. Podemos observar isto na Figura 3.3.

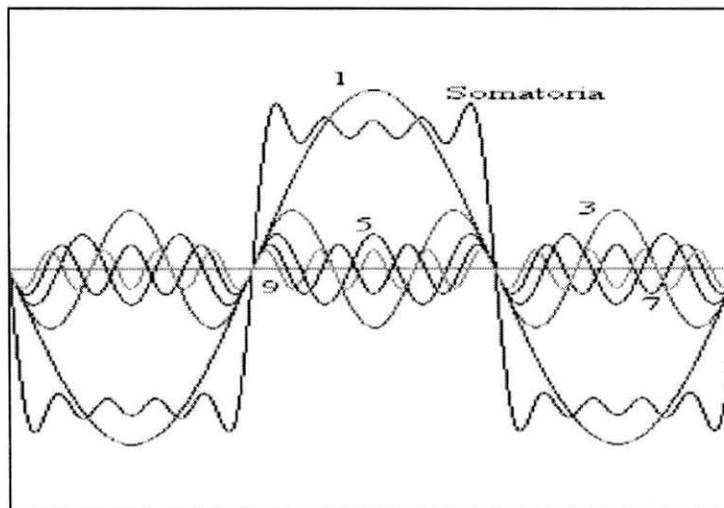


Figura 3.2 - Decomposição de uma onda distorcida

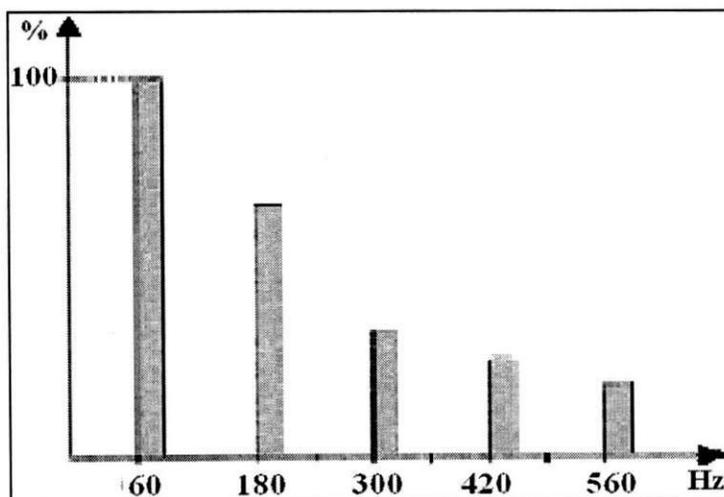


Figura 3.3 – Espectro de frequência

### 3.1.4 Os indicadores essenciais da distorção harmônica

Existem indicadores que permitem quantificar e avaliar a distorção harmônica das ondas de tensão e de corrente. Estes são alguns:

- Fator de potência;
- O fator de crista;
- A taxa de distorção harmônica.

#### *Fator de Potência*

Consideremos, para efeito das definições posteriores o esquema da Figura 3.4. Nele podemos ver uma fonte alimentando um equipamento como um a tensão  $V_i$  e uma corrente  $I_i$ .

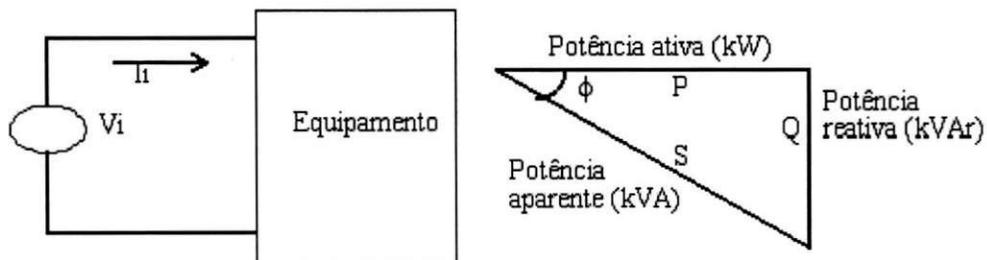


Figura 3.4 - Circuito genérico utilizado nas definições de FP e triângulo de potência.

#### **Definição**

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem. Os sinais variantes no tempo devem ser periódicos e de mesma frequência.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (3)$$

É comum a confusão que se faz hoje em dia com a expressão cosseno phi ( $\cos\phi$ ), cuja a definição é:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (4)$$

onde

$P_1$  = Potência ativa da fundamental.

$S_1$  = Potência reativa da fundamental.

Ora, o  $\cos\varphi$  se relaciona unicamente com a frequência fundamental, e, na presença de harmônicas, é então diferente do fator de potência FP. Uma primeira indicação da presença significativa de harmônicas pode ser um fator de potência FP medido diferente do  $\cos\varphi$  (o fator de potência será inferior ao  $\cos\varphi$ ).

### **Desvantagens do baixo fator de potência e da alta distorção da corrente.**

Podem ser citadas como desvantagens de um baixo FP e elevada distorção, entre outros, os seguintes fatos:

- A máxima potência absorvível da rede é fortemente limitada pelo FP.
- As harmônicas de corrente exigem um sobre dimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular);
- A componente de 3<sup>a</sup> harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito maior do que o normal;
- O achatamento da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede;
- As componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema de potência, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados a linha.

### ***Fator de Crista (FC)***

Pode ser definido como a relação entre o valor de pico e o valor eficaz de um sinal, ou seja:

$$FC = \frac{I_{pico}}{I_{RMS}} \quad (5)$$

Quando o sinal é perfeitamente senoidal, essa relação é igual a:

$$FC = \sqrt{2} = 1.414$$

Nos circuitos onde há a presença de harmônicas, o valor eficaz da tensão ou da corrente por si só é uma informação pouco significativa, já que para um mesmo valor eficaz, um valor de pico de um sinal pode mudar bastante dependendo do grau de deformação da onda.

O fator de crista típico das correntes absorvidas pelas cargas não-lineares é muito superior a  $\sqrt{2}$ : pode tomar valores iguais a 1,5 ou 2 chegando até 5 nos casos críticos. Um fator de crista muito elevado significa sobrecargas pontuais consideráveis. Estas sobrecargas, detectadas pelos dispositivos de proteções, podem ser a origem dos disparos intempestivos.

### ***Taxa de Distorção Harmônica***

A deformação de uma forma de onda de tensão ou de corrente senoidal, isto é, a distorção harmônica total pode ser definida como sendo a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas, em relação a fundamental, de ordens 2 a 50, conforme Equação 6. Este conceito procura quantificar o teor de poluição total existente em um determinado ponto do sistema. É definido pela seguinte expressão:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

onde

$V_h$  é a tensão harmônica referida à fundamental.

A taxa de distorção harmônica é uma notação muito utilizada para definir a importância do conteúdo harmônico de um sinal alternado. Este fator exclui a componente CC, levando em consideração apenas a contribuição das harmônicas na distorção da onda. A recomendação IEEE-519 comenta sobre os limites de DHT que as harmônicas de tensão e de corrente devem ser mantidas.

### 3.2 Princípio de Geração de Harmônicos

Os harmônicos são gerados no sistema elétrico por cargas não-lineares, ou seja, cargas na qual a relação tensão-corrente não é linear, tais como: equipamentos eletrônicos, fornos a arco, máquinas de soldar, equipamentos que utilizem circuitos magnéticos saturados (motores, transformadores e reatores), acionadores de motores etc. Na Fig.3.5 são mostrados exemplos do comportamento de cargas lineares e não-lineares.

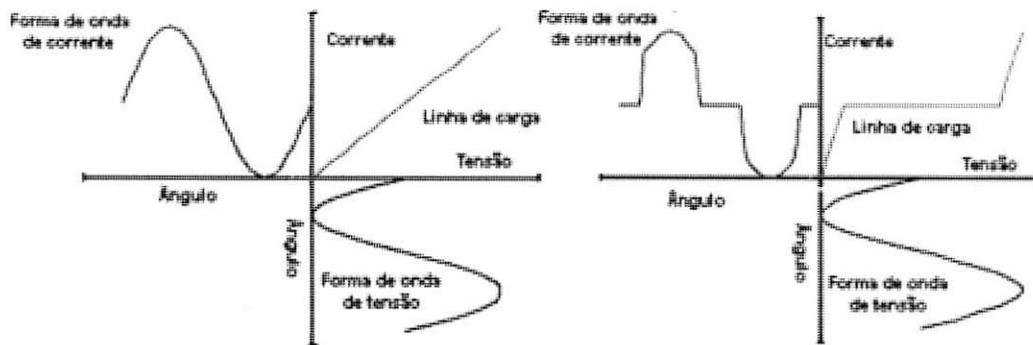


Figura 3.5 - Correntes em cargas lineares (a) e não-lineares (b)

Uma corrente não-senoidal é solicitada por uma carga não-linear, mesmo quando for alimentada por uma fonte de tensão senoidal. A corrente não-senoidal, ao circular pelo sistema produz quedas de tensão não-senoidais. A fonte de tensão senoidal somada a queda de tensão não-senoidal produz tensões também não-senoidais. Entenda-se por uma tensão não-senoidal aquela composta por sinais senoidais de frequências diferentes. Na Figura 3.6 é mostrado um exemplo de como uma carga não-linear pode gerar tensões não-senoidais e assim afetar outras cargas suportadas pelo mesmo alimentador. É importante salientar que o efeito das correntes harmônicas no sistema depende da impedância equivalente do sistema elétrico composta pela impedância da linha, transformador e gerador. Quanto menor for a impedância equivalente do sistema elétrico, menor será o efeito da corrente harmônica nos harmônicos de tensão.

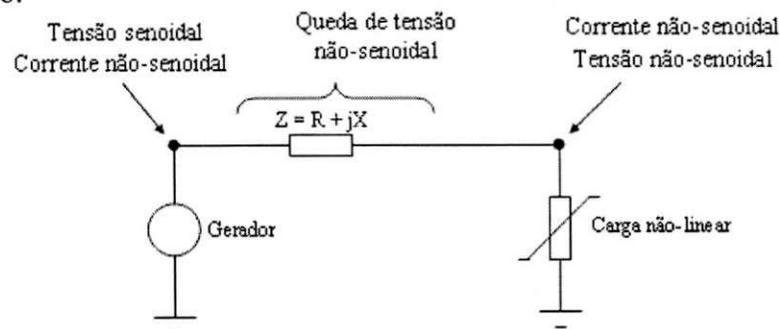


Figura 3.6 - Exemplo de propagação de harmônicos pela rede

### ***3.3 Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica***

A análise aqui feita baseia-se no texto da recomendação IEEE-519 que trata de práticas e requisitos para o controle de harmônicas no sistema elétrico de potência. No referido texto são identificadas diversas referências específicas sobre os diferentes fenômenos abordados.

#### **3.3.1 Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico**

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

##### ***3.3.1.1 Motores e geradores***

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental, como ocorre com o 5º, 11º, 17º, etc. harmônicos. Isto significa que tanto a quinta componente, quanto a sétima induzem uma sexta harmônica no rotor. O mesmo ocorre com outros pares de componentes.

O sobre-aquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de gaiola. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede.

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>, produzindo uma resultante de 6<sup>a</sup> harmônica) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas de industriais como, por exemplo, na produção de fios, em que a precisão no acionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

### ***3.3.1.2 Transformadores***

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Harmônicos na tensão aumentam as perdas ferro devido às correntes de Foucault, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas cobre (efeito Joule). A elevação das perdas cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Além disso, o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

Associada à dispersão existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

### ***3.3.1.3 Cabos de alimentação***

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Além disso, tem-se o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

A Figura 4.1 mostra curvas que indicam a seção transversal e o diâmetro de condutores de cobre que devem ser utilizados para que o efeito pelicular não seja significativo (aumento menor que 1% na resistência). Note que para 3kHz o máximo diâmetro aconselhável é aproximadamente 1 ordem de grandeza menor do que para 50Hz. Ou seja, para frequências acima de 3 kHz um condutor com diâmetro maior do que 2,5 mm já começa a ser significativo em termos de efeito pelicular.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobretensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

### ***3.4 Verificação de conformidade com as normas***

O aumento considerável da utilização da eletrônica de potência para uso e controle de energia elétrica e a utilização cada vez maior de equipamentos mais sensíveis a qualidade da tensão aplicada leva a necessidade de se estabelecerem critérios e procedimentos que possibilitem a conveniência harmoniosa entre equipamentos perturbadores e equipamentos sensíveis às perturbações de tensão.

Em um sentido geral, as normas sobre qualidade de energia foram desenvolvidas para auxiliar as concessionárias de energia e seus clientes na minimização dos problemas relacionados à conexão de cargas não lineares a rede elétrica.

#### ***A recomendação IEEE – 519***

Uma dos primeiros textos propostas abordando este problema foi a recomendação IEEE-519. Criada em 1981 e republicada em 1992, atualmente, existem dois critérios na norma para avaliação das distorções. O primeiro é a qualidade da tensão que a concessionária fornece aos seus clientes e são observados os limites. O segundo critério é a limitação da

corrente harmônica que um cliente pode injetar no sistema elétrico, mais objetivamente no PAC (Ponto de Acoplamento Comum). Na Tabela 1, mostram-se os níveis de distorções na tensão recomendados pela norma IEEE-519.

Tabela 3.1 - Níveis de distorções na tensão – recomendação IEEE - 519.

Tensão no PAC (Ponto de Acoplamento Comum)	Limite individual de distorção (%)	Distorção Harmônica Total (%)
69 kV e abaixo	3,0	5,0
69,001 kV até 161 kV	1,5	2,5
161,001 e acima	1,0	1,5

Os limites individuais de distorção são as relações percentuais entre as amplitudes de cada componente harmônico em relação a amplitude do componente fundamental. Na Tabela 1, mostram-se os limites de distorções harmônicas para sinais de corrente recomendados pelo padrão IEEE-519 para sistemas de distribuição (120V a 69kV). Observa-se que os limites para os harmônicos pares são fixados em apenas 25% dos ímpares. Estes limites mais rigorosos são justificados porque os harmônicos pares se refletem em dessimetrias nas formas de onda e acrescentam níveis CC ao sinal. Os limites mostrados na Tabela 2 podem ser violados por curtos períodos de tempo durante partidas de grandes motores ou durante condições anormais do sistema. Em relação aos limites de corrente injetados pelos clientes das concessionárias, além da DHT, as recomendações são feitas para as distorções individuais da corrente em relação a máxima corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum. Assim, é importante a monitoração das amplitudes de cada componente senoidal presente no sinal analisado.

Tabela 3.2 - Níveis de distorções na corrente – recomendação IEEE - 519.

Distorção harmônica máxima (% da corrente $I_L$ )						
Distorção harmônica individual (Harmônicas Ímpares)						
$I_{sc}/I_L$	< 11	11 < h < 17	17 < h < 23	23 < h < 35	35 < h	DHT
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>100	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Harmônicos pares são limitados a 25% dos harmônicos ímpares

Não é permitido correntes que provoquem tensões contínuas

$I_{sc}$  = máxima corrente de curto circuito no PAC  
 $I_L$  = máxima corrente de carga no PAC

### *3.5 Técnicas de mitigação*

Existem três técnicas principais usadas para reduzir ou, mais precisamente, controlar o fluxo de correntes harmônicas de cargas não-lineares em sistemas elétricos comerciais e industriais. Estas são:

- Uso de filtros paralelos;
- Uso de conversores estáticos de potência de multipulsos ou transformadores de deslocamento de fase;
- Injeção de correntes harmônicas.

Os filtros de harmônicos eliminam a distorção harmônica causada pelos equipamentos de uma instalação e pode ser instalado na entrada do equipamento protegido ou na saída do dispositivo causador da distorção. A principal função do filtro é reduzir a amplitude de um sinal injetado na rede (tensão ou corrente), que se propaga com uma determinada frequência ou faixa de frequência. O filtro utiliza capacitores, indutores e resistores compondo um circuito capaz de desviar as correntes harmônicas para a terra.

Podem ser ligados nas configurações triângulo ou estrela. A última é mais utilizada, propiciando um melhor controle do desequilíbrio de neutro. Os capacitores devem obedecer às normas para capacitores de potência, a qual diz que ele não deve ultrapassar seus limites de potência nominal (135%), corrente nominal (180%) nem seu limite de tensão (110%).

Os capacitores devem protegidos por fusíveis e o filtro protegido por um disjuntor dotado de resistência de pré-inserção, destinado a reduzir as sobretensões transitórias.

Os filtros passivos são eficazes na atenuação de tensões e correntes harmônicas nos sistemas elétricos não sensíveis a ressonância para frequências com valores próximos às frequências harmônicas. São inviáveis para uso em baixas frequências devido ao tamanho necessário dos indutores.

Os filtros ativos são dotados de uma fonte controlável responsável pela injeção de tensões e correntes com forma de onda conhecida fazendo oposição às ondas distorcidas resultantes das tensões e correntes harmônicas. São formados por elementos de filtro passivo, agregados a elementos ativos (transistores, amplificadores operacionais).

Sua estrutura é basicamente é um modulador de largura de pulso (PWM), capacitores CC para amplificar o sinal gerado e um controlador que consiste por sua vez de um transistor

IGBT é um processador que fornece capacidade necessária de processamento para cálculos em tempo real.

Podem atuar como compensador de potência reativa quando ligados em série no sistema elétrico, e como balanceador de corrente de carga, quando em paralelo.

Suas principais características são:

- Não provoca ressonância no sistema elétrico
- Atenuam as ressonâncias porventura existentes
- São eficientes para harmônicos de 50ª ordem
- Atenuam harmônicos para níveis considerados desprezíveis.

Na conexão em paralelo as correntes fluem pelos filtros que se constituem em um caminho de baixa impedância. Caso o arranjo seja série, o dimensionamento do filtro deve ser feito para suportar a corrente máxima de carga, elevando os custos dos componentes.

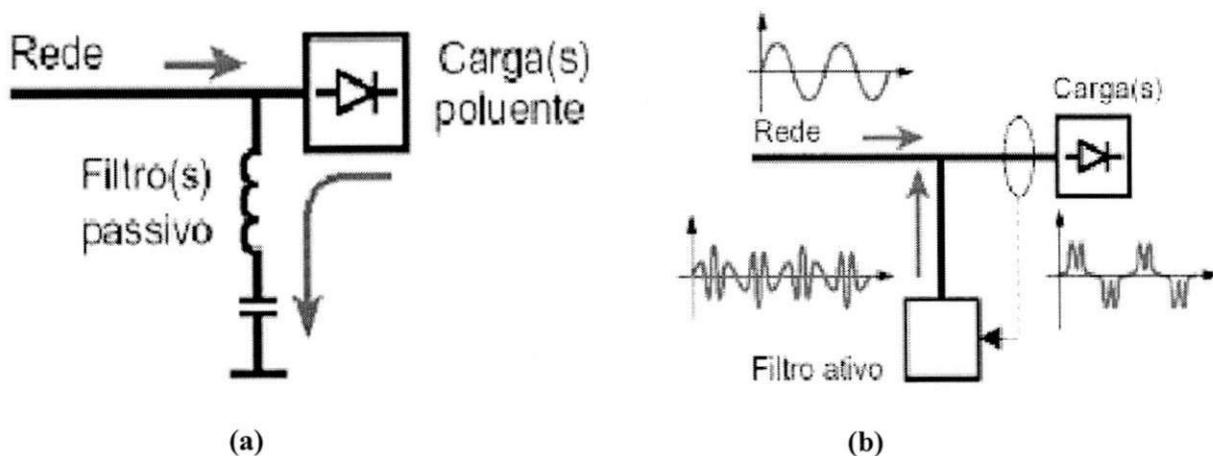


Figura 3.7 – Exemplos de filtro passivo (a) e filtro ativo (b)

## 4. Metodologia

Foram realizadas medições de harmônicos nos sinais de tensão e corrente, no sistema de distribuição de energia elétrica da ACUMULADORES MOURA S/A. As medições foram realizadas de 17h23min a 21h17min do dia 12 de setembro de 2005. Durante o período em que a empresa utiliza geração própria de energia, mais especificamente no horário de ponta (17h30min a 20h30min).

Foram realizadas medições dos sinais de corrente e tensão em intervalos de tempo de dois minutos, cada medição teve duração de um segundo. Os sinais de tensão foram medidos no lado de baixa tensão dos dois transformadores de 13,8 kV / 380 V, que operam em paralelo, cada transformador possui uma potência de 225 kVA.

As medições de corrente foram realizadas no secundário dos transformadores de corrente, com o auxílio de pinças amperimétricas. Os transformadores de corrente utilizados possuem uma relação de 400/5 A e foram fabricados pela Siemens<sup>TM</sup>. Na Figura 4.1 é exibida uma fotografia da conexão das pinças ao sistema, na fotografia é possível observar também os transformadores de corrente. Com o uso das pinças amperimétricas não houve necessidade de interromper ou alterar o sistema elétrico. As medições das tensões foram realizadas com o auxílio de divisores de tensão resistivo, com relação 2/1 V.

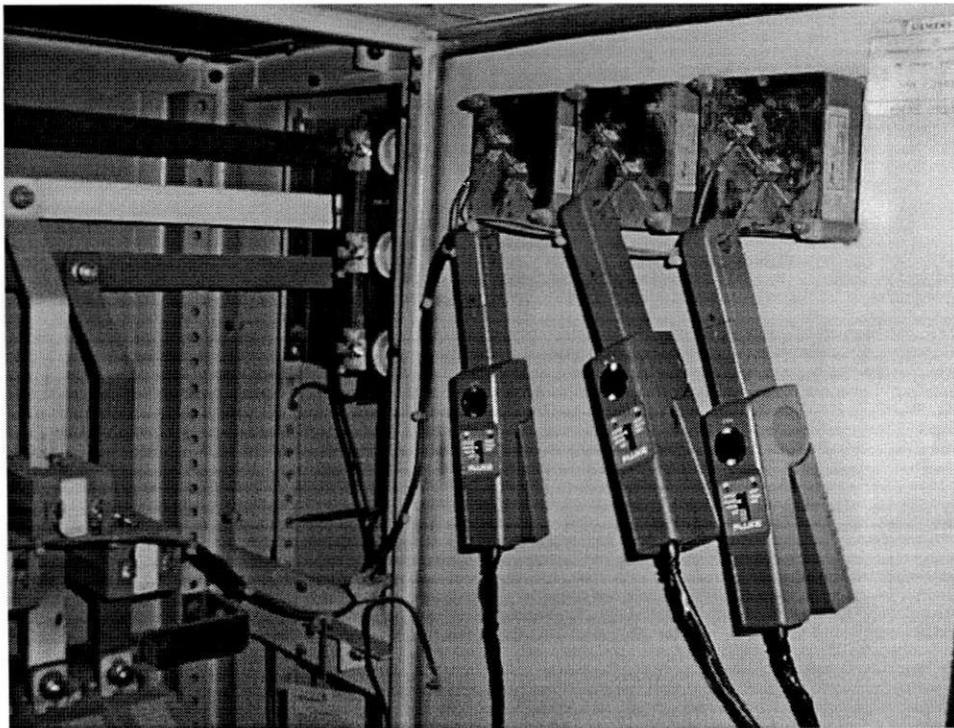


Figura 4.1 – Fotografia mostrando a conexão das pinças no sistema elétrico

#### ***4.1 Descrição do equipamento utilizado***

O equipamento utilizado nas medições de harmônico é de fabricação da National Instruments™. Ele é composto por um módulo de condicionamento de sinais, placa de aquisição de dados com resolução de 12 bits e taxa de amostragem de até 80 kS/s para cada um dos seis canais, computador portátil, tipo laptop, e software desenvolvido com o programa LabView™ 7 Express. O equipamento pode registrar tensões de até 150 Vrms e correntes de até 80 Arms. Os sinais de tensão são medidos diretamente pelo equipamento, enquanto os sinais de correntes são medidos por pinças amperimétricas, fabricadas pela Fluke™.

## 5. Resultados das Medições de Tensão e Corrente na SE-04

Nesta seção serão mostrados os resultados das medições. Na Figura 5.1, mostra-se o gráfico da Distorção Harmônica Total para a tensão na fase A. Observa-se que o DHT não ultrapassou o limite recomendado pelo IEEE-519, reproduzida na Tabela 1, que é de 5%. O mesmo comportamento observou-se nas outras fases.

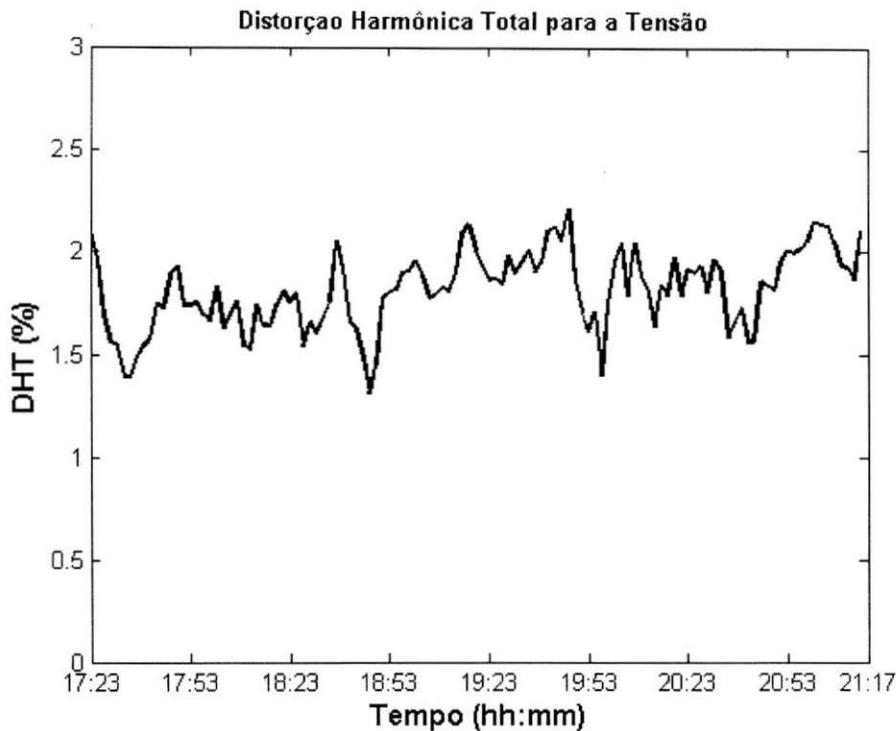


Figura 5.1 – Evolução da DHT da tensão da fase A.

Foram realizados cálculos para determinar a relação de Corrente de Curto Circuito/Corrente de Carga, em ambas as situações, ou seja, quando o sistema de distribuição interna da Moura era alimentado pela concessionária local e quando alimentada pelos grupos geradores. Os valores calculados foram respectivamente 26,14 e 21,97. Conforme a Tabela 2 o limite para o DHT é de 8%.

Na Figura 5.2, mostra-se o DHT da corrente na fase A. Novamente o DHT não ultrapassa o limite recomendado pelo IEEE-519, reproduzido na Tabela 1. No entanto, durante a maior parte do tempo em que a geração própria da Moura está funcionando, o DHT está em um patamar inferior ao patamar da situação em que a energia era suprida pela concessionária.

Ainda conforme a Tabela 2, o limite de distorção harmônica para cada uma das componentes harmônicas do sinal, individualmente, até a 11ª componente é de 7% e a partir da 12ª é de 3,5%. Para os componentes harmônicos pares o limite é ¼ dos componentes ímpares.

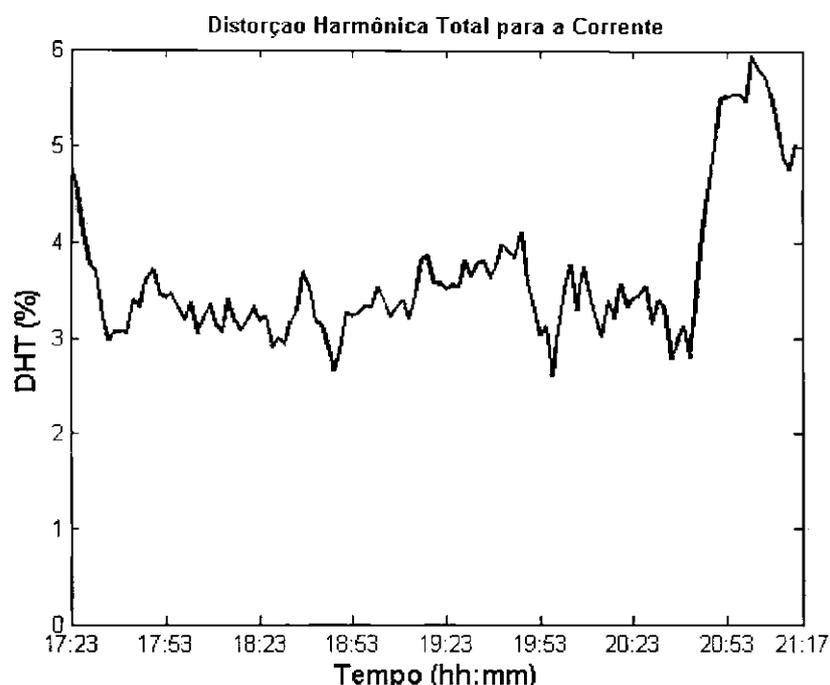


Figura 5.2 – Evolução da DHT de corrente na fase A

Na Figura 5.3, mostra-se o surgimento do harmônico de segunda ordem, no sinal de corrente, na situação em que foram utilizados os grupos geradores. Novamente, o nível de distorção harmônica medido foi inferior ao recomendado pela IEEE-519.

Na Figura 5.4, mostra-se a evolução do quinto harmônico do sinal de corrente durante o período de aquisição dos sinais. Observa-se uma redução da distorção harmônica durante o período em que foram utilizados os grupos geradores. Na Figura 5.5, mostra-se a evolução do décimo primeiro harmônico. Não é possível observar uma diferença significativa em sua amplitude nas situações de geração própria e de fornecimento de energia pela concessionária.

Na Figura 5.6, mostra-se a evolução do décimo terceiro harmônico. Também não é possível observar uma diferença significativa em sua amplitude nas situações de geração própria e de fornecimento de energia pela concessionária.

Os níveis de distorção harmônica omitidos não apresentaram valores significativos. O resultado apresentado para uma das fases foi observado nas demais.

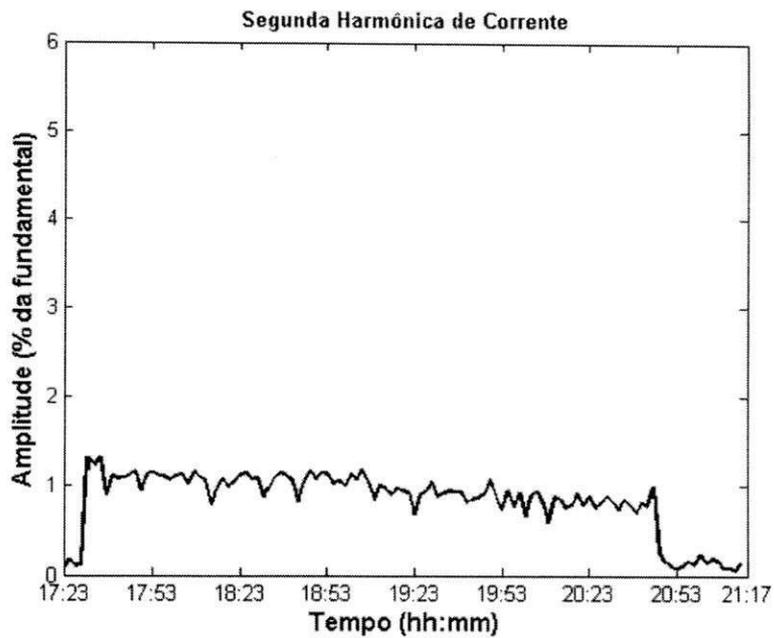


Figura 5.3 – Evolução do segundo harmônico no sinal de corrente

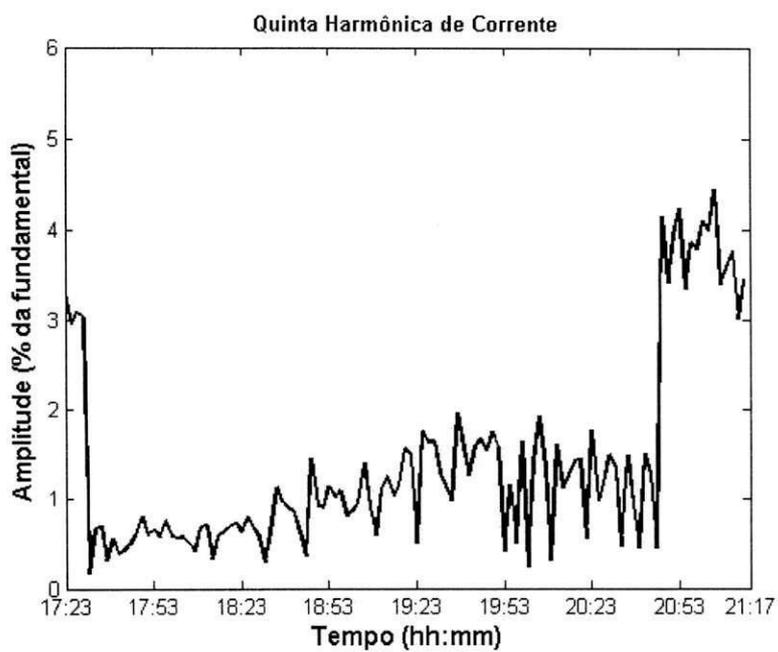


Figura 5.4 – Evolução do quinto harmônico no sinal de corrente

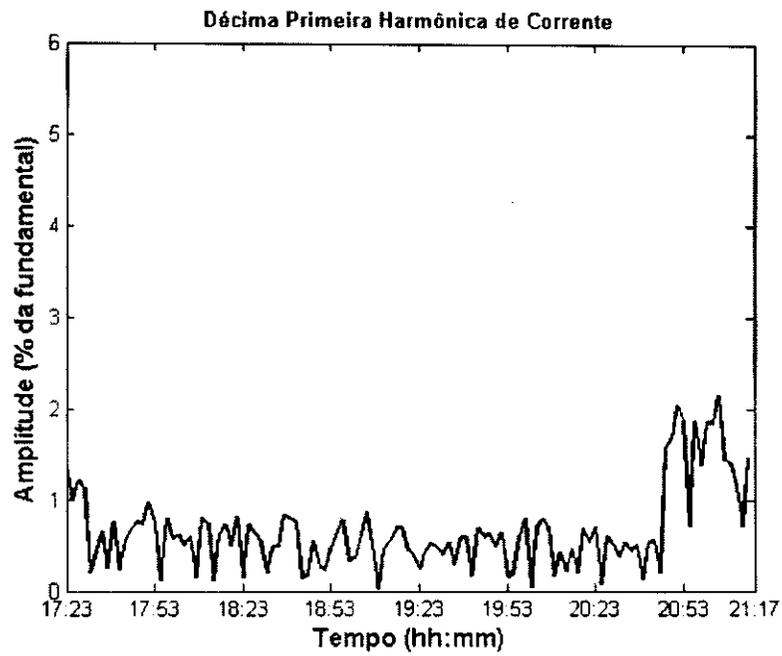


Figura 5.5 – Evolução do décimo primeiro harmônico no sinal de corrente

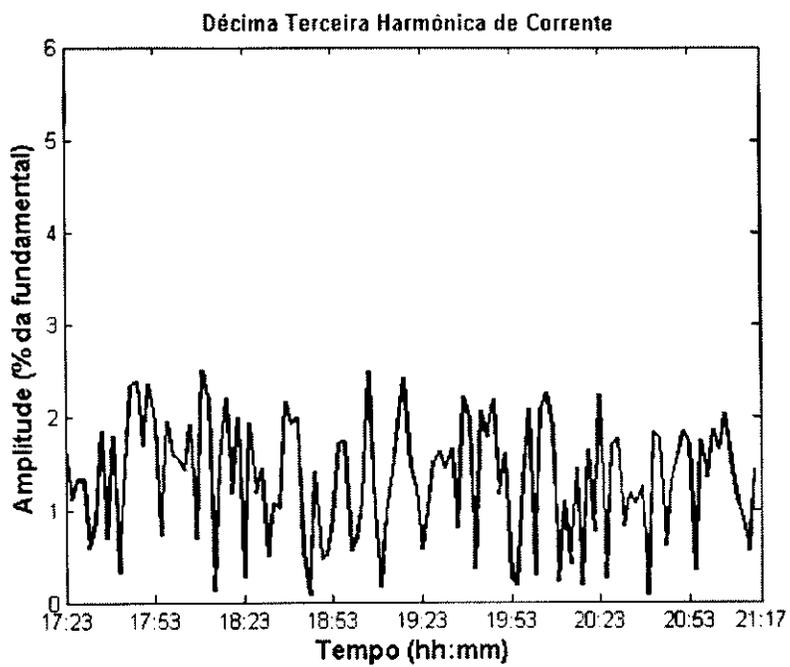


Figura 5.6 – Evolução do décimo terceiro harmônico no sinal de corrente

---

## 6. Conclusões

Os valores estimados de harmônicos de tensão e corrente foram analisados durante o intervalo em que foram realizadas as medições. Os valores obtidos da DHT de tensão, corrente, os limites individuais de distorção harmônica (pares e ímpares) para os sinais de tensão e corrente encontram-se dentro dos limites toleráveis, recomendados pelo IEEE-519. Contudo, foram detectados harmônicos pares nos sinais de corrente e de tensão, justamente no momento em que a geração própria foi utilizada. Os seus níveis eram consideráveis, embora abaixo das recomendações da IEEE-519. Quando a indústria estava sendo alimentada pela concessionária, os harmônicos pares apresentavam níveis insignificantes. As recomendações e normas vigentes sobre harmônicos são mais rigorosas em relação aos harmônicos pares, pois estes são considerados muito prejudiciais ao sistema elétrico.

Assim, deve-se considerar a hipótese de que os problemas registrados pela ACUMULADORES MOURA S/A – Unidade 4 podem ter sido decorrentes do surgimento de harmônicos pares nos sinais de tensão e corrente quando fornecimento pelo gerador próprio. Uma outra possibilidade, para origem dos problemas relatados, seria o aparecimento de sinais espúrios ou distorções mais elevadas quando a energia é suprida simultaneamente pela concessionária e pelo gerador próprio.

Este trabalho dá oportunidade para a realização de novos estudos nesta área, já que pode-se aprofundar, por exemplo, na questão do aparecimento de harmônicos de ordem par quando da entrada do gerador e, com isso, levantar soluções viáveis para sanar este problema.

## 7. Bibliografia

1. IEEE 519, 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems;
2. IEEE 141, 1993, Harmonics in power systems;
3. Aldabó, Ricardo, Qualidade na energia elétrica, Artliber Editora, São Paulo, 2001;
4. National Instruments™. **DAQ Quick Start Guide**. Feb 2005. Disponível na Internet via URL: <<http://www.ni.com>>. Arquivo capturado em março de 2005.
5. Workshop de instalações elétricas de baixa tensão – Qualidade de energia e harmônicas, Schneider/ Procobre, mar 2003;
6. Moreno, Hilton, Harmônicas nas instalações elétricas, Procobre, São Paulo, nov 2001;
7. Dias, Guilherme A. D., Harmônicas em sistemas industriais, EDIPUCRS, Porto Alegre, 1998;
8. MAMEDE FILHO, J., Instalações Elétricas Industriais. 6ª edição. LTC S.A.

## **Anexo**

### **Cálculo da Relação Corrente de Curto Circuito/Corrente de Carga**

## Cálculo da Corrente de Curto-Circuito

O cálculo da corrente de curto-circuito será realizado de maneira aproximada, em relação a métodos mais sofisticados, entretanto a precisão obtida satisfaz plenamente aos propósitos a que se destinam. As medições dos sinais de corrente e tensão foram realizadas em duas situações distintas: quando o sistema interno de distribuição foi suprido pela concessionária local de energia elétrica e quando foi utilizada a geração própria de energia elétrica, através de dois grupos gerador. Assim, faz-se necessário calcular as correntes de curto circuito nas duas situações.

### Concessionária local

Na Figura A-1 é mostrado o diagrama unifilar de parte do sistema de distribuição interna da ACUMULADORES MOURA S/A – UNIDADE 4, alimentado pela concessionária local de energia elétrica. As medições de corrente e tensão foram realizadas no barramento de 380V.

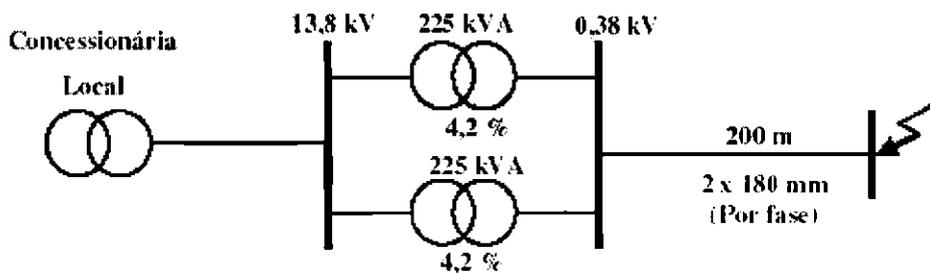


Figura A-1 Diagrama unifilar do sistema de distribuição

### Impedância reduzida do sistema ( $Z_{us}$ )

A resistência do sistema de suprimento é muito pequena relativamente ao valor da rede do sistema industrial. Assim, é possível desprezá-la sem maiores prejuízos ao cálculo da corrente de curto-circuito. A reatância do sistema de suprimento é calculada levando-se em conta o nível de curto-circuito, normalmente fornecido pela concessionária. Considerando a corrente de curto-circuito como 5 kA, é possível calcular a reatância do sistema de suprimento.

A potência nominal, impedância percentual e a tensão nominal dos transformadores foram fornecidas pela ACUMULADORES MOURA S/A.

**Informações dos transformadores:**

$$S = 2 \times 225 \text{ kVA}$$

$$V_{np} = 13,8 \text{ kV}$$

$$V_{ns} = 0,380 \text{ kV}$$

$$Z = 4,2 \%$$

**Valores adotados como de base:**

$$P_{base} = \frac{S_{Total}}{3} = 150 \text{ kVA}$$

$$V_{base} = 0,220 \text{ kV}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{220^2}{150000} = 0,321 \Omega$$

$$I_{base} = \frac{P_{base}}{V_{base}} = \frac{150000}{220} = 683,7 \text{ A}$$

**Outros valores, estimados a partir da literatura consultada (8):**

$$P_{Cu} = 5600 \text{ W}$$

$$I_{CC} = 5 \text{ kA}$$

**Cálculo da reatância do sistema de suprimento**

$$P_{CC} = \sqrt{3} V_{np} I_{CC} = \sqrt{3} * 13800 * 5000 = 119 \text{ MVA}$$

$$X_{us} = \frac{P_{base}}{P_{CC}} = \frac{450}{119000} = 0,0038 \text{ pu}$$

$$Z_{us} = j0,0038 \text{ pu}$$

## Impedância dos transformadores da subestação ( $Z_t$ )

### Cálculo da impedância do transformador:

Resistência

$$R_{ut} = \frac{P_{Cu}}{P_{base}} 100 = \frac{5600}{450000} 100 = 1,24\% = 0,0124 pu$$

Reatância

$$Z_{ut} = 4,2\% = 0,042 pu$$

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 - R_{ut}^2} = \sqrt{0,042^2 - 0,0124^2} = 0,0401 pu$$

$$Z_{ut} = 0,0124 + j0,0401 pu$$

## Impedância do circuito que liga o QGD ao QGF

Informações do sistema:

$$L_{C1} = 200m$$

$$N_{C1} = 2 \text{ Condutores / Fase}$$

$$S_C = 185mm^2$$

Outros valores, estimados a partir da literatura consultada (8):

$$R_{u\Omega} = 0,1224 m\Omega / metro$$

$$X_{u\Omega} = 0,1073 m\Omega / metro$$

Resistência

$$R_{uC1} = \frac{R_{u\Omega} L_{C1}}{1000 N_{C1}} \frac{1}{Z_{base}} = \frac{0,1224 * 200}{1000 * 2} \frac{1}{0,321} = 0,0381 pu$$

Reatância

$$X_{uC1} = \frac{X_{u\Omega} L_{C1}}{1000 N_{C1}} \frac{1}{Z_{base}} = \frac{0,1073 * 200}{1000 * 2} \frac{1}{0,321} = 0,0334 pu$$

$$Z_{uC1} = 0,0381 + j0,0334 pu$$

## Impedância total

$$Z_{atot} = (Z_{us} + Z_{ut} + Z_{uC1}) = 0,0505 + j0,0773 pu$$

### Corrente de curto-circuito simétrica trifásica (valor eficaz)

$$I_{SC} = \frac{I_{base}}{|Z_{total}|} = \frac{683,7}{\sqrt{0,0505^2 + 0,0773^2}} = 7,4kA$$

### Geração própria

Na Figura A-2 é mostrado o diagrama unifilar de parte do sistema de distribuição interna da ACUMULADORES MOURA S/A – UNIDADE 4, alimentado pela geração própria de energia elétrica. As medições de corrente e tensão foram realizadas no barramento de 380 V.

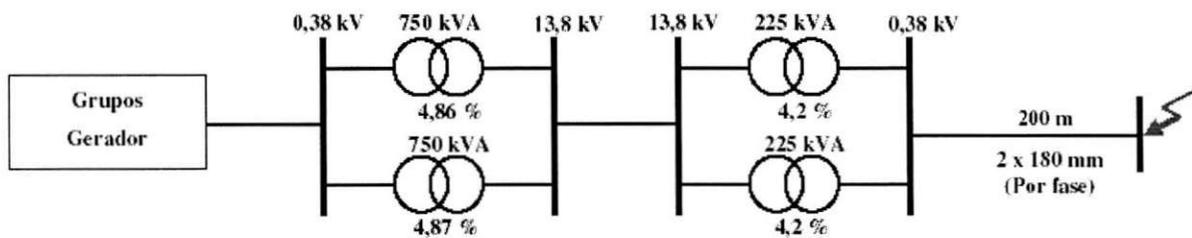


Figura A-2 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição (com geração própria)

### Impedância reduzida do sistema ( $Z_{us}$ )

A impedância interna dos grupos geradores é muito pequena, portanto, é razoável desconsiderá-la nos cálculos da corrente de curto-circuito, assim como a resistência dos transformadores de 750 KVA. A reatância dos transformadores é respectivamente 4,86% e 4,87%.

### Cálculo da reatância dos transformadores de 750 kVA

$$X_{us} = \frac{\frac{4,86}{100} \cdot \frac{4,87}{100}}{\frac{4,86}{100} + \frac{4,87}{100}} = 0,0244 \text{ pu}$$

### Impedância total

$$Z_{tot} = (Z_{us} + Z_{ut} + Z_{uc1}) = 0,0505 + j0,0978 \text{ pu}$$

### Corrente de curto-circuito simétrica trifásica (valor eficaz)

$$I_{sc} = \frac{I_{base}}{|Z_{tot}|} = \frac{683,7}{\sqrt{0,0505^2 + 0,0978^2}} = 6,215 \text{ kA}$$

### Cálculo da máxima corrente de carga no PAC

A carga alimentada pelo quadro geral de distribuição (QGD) da subestação da ACUMULADORES MOURA S/A – UNIDADE 4 é composta, principalmente por:

- 01 Soft-Start / Motor de 250 CV;
- 08 Inversores de frequência / Motor de 5 CV;
- 01 Banco de capacitores de 60 kvar.

Portanto a principal carga instalada é o *Soft-Starter* / Motor de 250 CV, cuja corrente nominal pode ser calculada:

$$S = \sqrt{3} V_L I_L$$
$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_L} = \frac{250 * 745,7}{\sqrt{3} * 380} = 283,24 \text{ A}$$

### Cálculo da relação Corrente de Curto Circuito/Corrente de Carga

A relação Corrente de Curto Circuito/Corrente de Carga é importante para obtenção dos limites de distorção harmônica total e dos limites individuais de distorção harmônica para a corrente, de acordo com as recomendações da IEEE 519. A relação Corrente de Curto

Circuito/Corrente de Carga será calculada para as duas situações distintas: quando o sistema interno de distribuição foi suprido pela concessionária local de energia elétrica e quando foi utilizada a geração própria de energia elétrica, através de dois grupos geradores.

### Concessionária local

Dessa forma, a relação Corrente de Curto Circuito/Corrente de Carga, quando o sistema foi alimentado pela concessionária local, pode ser calculada:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{7405}{283,24} = 26,14$$

### Geração própria

E a relação Corrente de Curto Circuito/Corrente de Carga, quando o sistema foi alimentado por grupos geradores, pode ser calculada:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{6215}{283,24} = 21,97$$

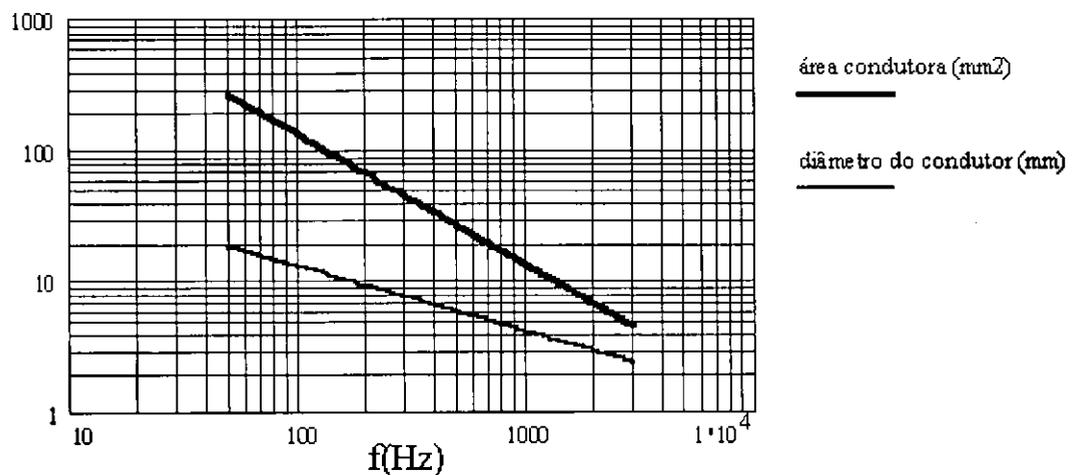


Figura A.3 - Área de seção e diâmetro de fio de cobre que deve ser usado em função da frequência da corrente para que o aumento da resistência seja menor que 1%.