



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU



GISELLE SILVEIRA LACERDA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES EM DISPOSITIVOS DE
MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2016

GISELLE SILVEIRA LACERDA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES EM DISPOSITIVOS DE
MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva.

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Dezembro/2016

L131a

Lacerda, Giselle Silveira.

Análise da influência de cargas não-lineares em dispositivos de medição de grandezas elétricas [manuscrito] / Giselle Silveira Lacerda. - 2016.

64f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Distorção elétrica. 2. Ondas elétricas. 3. Circuitos eletricos não-lineares.
I. Silva, Sávio Augusto Lopes da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

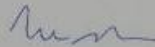
CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br


Monografia defendida e aprovada, em 15 de dezembro de 2016, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva - Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo – Professor Convidado

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por mais esta conquista.
- Ao Professor Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva pela paciência e colaboração neste trabalho, pela oportunidade, compreensão, apoio constante, suas contribuições que foram cruciais para o aprendizado e por sua orientação segura e objetiva.
- Aos meus pais e minha irmã pelo carinho e dedicação que foram fundamentais para que eu me tornasse quem sou hoje.
- Aos meus companheiros e amigos que adquiri durante o curso.
- À UFOP pela oportunidade de me tornar Engenheira.

Ao meu esposo, companheiro e amor para toda a vida.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Histórico.....	15
1.2	Objetivo Geral.....	16
1.3	Objetivos Específicos	16
1.4	Justificativa do trabalho	17
1.5	Metodologia proposta	17
1.6	Estrutura do trabalho.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Harmônicas	19
2.1.1	Análise matemática das harmônicas	21
2.1.2	Potência e fator de potência	25
2.1.2.1	Definição	25
2.1.3	Fator de desclassificação (K)	26
2.1.4	Fator de crista (FC)	27
2.1.5	Fontes de Harmônicas	28
2.1.6	Perturbações Causadas por Harmônicas	34
2.2	Cargas geradoras de harmônicas.....	38
2.2.1	Cargas lineares	38
2.2.2	Cargas não-lineares	39
2.3	Medição de grandezas elétricas	40
2.3.1	Instrumentos convencionais de Valor médio	40
2.3.2	Instrumentos de valor eficaz verdadeiro (“ <i>TRUE RMS</i> ”).....	42

3	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	46
3.1.1	Equipamentos utilizados nos experimentos	46
3.1.1.1	Analisador de Potência.....	46
3.1.1.2	Analisador de Harmônicas	46
3.1.1.3	Medidor de energia.....	49
3.1.1.4	Alicate amperímetro	50
3.1.1.5	Dimmer.....	50
3.1.1.6	Inversor de frequência CFW08	51
4	DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS	52
4.1	Descrição do experimento 1:	52
4.2	Descrição do experimento 2:	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Componentes harmônicos de corrente.....	19
Figura 2.2: Visualização da senoide fundamental, sua quinta harmônica e a soma resultante.	19
Figura 2.3: Espectro de frequência	20
Figura 2.4: Tensão resultante da soma fundamental, terceira e quinta harmônicas	20
Figura 2.5: Triângulo de potência	24
Figura 2.6: Forma de onda com diferença significativa entre fator de potência e $\cos \phi$	25
Figura 2.7: Sinais 1 e 2 com o mesmo valor eficaz, mas fatores de crista diferentes	27
Figura 2.8: Circuito retificadores carregado totalmente controlado com indutância em séri...	29
Figura 2.9: Circuito típico de um variador de velocidade	30
Figura 2.10: Circuito de uma fonte de alimentação monofásica	31
Figura 2.11: Corrente absorvida e espectro para uma máquina de soldar.....	31
Figura 2.12: Consumo de um motor monofásico de 1/6cv	37
Figura 2.13: Dispositivo de controle semicondutor da corrente e tensão.....	38
Figura 2.14: Forma de onda no circuito com dispositivo de controle	38
Figura 2.15: Circuito de um instrumento de valor médio medindo sinal senoidal.....	39
Figura 2.16: Circuito de um instrumento de valor médio medindo sinal com harmônicas.....	40
Figura 2.17: Circuito de entrada de um instrumento de valor eficaz verdadeiro	41
Figura 2.18: Forma de onda de corrente gerada por um computador pessoal.....	41
Figura 2.19: Três sinais medidos com diferentes graus de distorção	42
Figura 3.1: Analisador de potência DW-6090.....	44
Figura 3.2: Analisador e suas ferramentas.....	45

Figura 3.3: Esquema do medidor de energia	47
Figura 3.4: Alicata amperímetro.....	48
Figura 4.1: Montagem do experimento 1	50
Figura 4.2: Esquema da montagem do experimento 1	50
Figura 4.3: Esboço das curvas de potência obtidas pelo medidor de energia, analisador de harmônicas e analisador de potência.....	55
Figura 4.4: Esboço das curvas de corrente obtidas pelo alicata amperímetro, analisador de harmônicas e analisador de potência.....	55
Figura 4.5: Esboço da curva de erro.....	56
Figura 4.6: Forma de onda sem distorção de harmônica, senoide perfeita	57
Figura 4.7: Forma de onda com distorção de harmônica	58
Figura 4.8: Montagem do experimento 2	59
Figura 4.9: Esboço das curvas das médias de correntes obtidas pelo alicata amperímetro e analisador de harmônicas.....	60
Figura 4.10: Esboço da curva de erro	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores relativos aos sinais da Figura 2.7	27
Tabela 2.2: Emissão de harmônicos de alguns equipamentos residenciais, comerciais e industriais.....	32
Tabela 2.3: Tipo de carga e fator K correspondente.....	35
Tabela 2.4: Valores medidos pelos instrumentos	42
Tabela 2.5: Comparação entre um multímetro de valor médio e o de valor verdadeiro eficaz.	43
Tabela 4.1: Dados coletados no medidor de energia e analisador de potência	51
Tabela 4.2: Dados coletados do analisador de harmônicas e alicate amperímetro.....	52
Tabela 4.3: Correntes coletadas do analisador de harmônicas e alicate amperímetro	56

LISTA DE ABREVIATURAS

CA: Corrente alternada

CC: Corrente contínua

GTO: tiristor comutável pela porta

RMS: “root-mean-square” (raiz-média-quadrada)

SCR: Retificador controlado de Silício

THD: Taxa de distorção harmônica

DHTv: Distorção Harmônica Total de Tensão

DHTi: Distorção Harmônica Total de Corrente

RESUMO

Atualmente, o estudo sobre harmônicos tem sido de grande importância, já que a presença destes pode ocasionar perturbações para o sistema elétrico local ou adjacentes. O aumento dessas cargas não lineares tem sido bastante significativo. A utilização de inversores de frequência, controladores de luminosidade (dimmer), forno de micro-ondas, computadores, por exemplo, interferem na qualidade de energia. Portanto, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre cargas não lineares, harmônicos, os cálculos de distorção harmônica, os equipamentos que geram essas distorções e as suas consequências para o sistema elétrico. Além disso, é apresentado, também, um estudo prático sobre a influência de harmônicos em equipamentos de medições elétricas. Neste, é possível avaliar como equipamentos baseados em eletrônica de potência (inversor de frequência, por exemplo) podem gerar distorções harmônicas e como estas distorções podem afetar equipamentos de medição de grandezas elétricas.

Palavras-chave: Harmônicos, distorções harmônicas, cargas não-lineares.

ABSTRACT

Nowadays, the study of harmonics has been of great importance because it can cause disruption to the local electrical system or adjacent. Growth in non-linear loads has been quite significant. The use of frequency inverters, lighting controllers (dimmer), microwave oven, computer, for example, affect the quality of energy. Therefore, this work presents a literature review about non-linear loads, harmonics, harmonic distortion calculations, equipment that generate these distortions and their consequences to electrical system. Moreover, it is shown also a case study on the influence of these harmonic measurements on electrical equipment. In this, it is possible to show as the power electronics (frequency inverter, for example) can cause harmonic distortion and as these distortions can affect the measurement of electrical quantities equipment.

Keywords: Harmonics, Harmonics Distortions, non-linear loads

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas em equipamentos eletroeletrônicos, além de proporcionar conforto aos usuários, simplificar tarefas, aumentar a produtividade e segurança, visa também uma maior eficiência energética, redução do tamanho e diminuição de custos. Sendo assim, é cada vez mais comum a utilização de cargas não-lineares na fabricação desses equipamentos.

A maioria dos equipamentos eletrônicos, tais como: computadores, circuitos de iluminação, condicionadores de ar e equipamentos de vídeo, trazem consigo o inconveniente de provocar deformações nas formas de onda, também chamadas de tensões e correntes harmônicas, podendo contribuir para a degradação da qualidade de energia elétrica. (LOPEZ, 2013)

A presença de harmônicas em instalações muitas vezes é aceitável. O problema é quando há interação com o sistema de distribuição, podendo ocasionar distorções e perdas na tensão (LOPEZ, 2013).

Quando as distorções nas harmônicas atingem níveis elevados, seus efeitos são sentidos pelos equipamentos conectados ao sistema, tanto em motores, equipamentos eletrônicos, transformadores e disjuntores, quanto em instrumentos de medição (LOPEZ, 2013).

Os instrumentos convencionais, também conhecidos como “valor médio” são os mais utilizados para medição de corrente e tensão. Foram construídos há anos para a leitura de sinais senoidais, já que na época o termo “harmônica” era pouco usual. Atualmente, com a presença de harmônicas, esses aparelhos tornam-se inviáveis, pois podem apresentar erros nas leituras podendo acarretar interpretações erradas sobre o circuito analisado (MORENO, 2001).

Os instrumentos de valor eficaz verdadeiro, também chamados de *true* RMS foram projetados pela necessidade de medir sinais que continham harmônicas, ou seja, que não são senoidais. Os aparelhos de RMS estão disponíveis há pelo menos 30 anos, mas eram pouco acessíveis por apresentarem alto custo. Com o avanço de tecnologias na área da eletrônica, hoje, é possível que a medição *true* RMS esteja presente em multímetros portáteis (WEST, 2002).

Neste projeto, há um estudo acerca das harmônicas, cargas não-lineares, instrumentos de medições de grandezas elétricas e, por fim, o desenvolvimento de um experimento com o

objetivo de realizar medidas e avaliar os erros em medidores elétricos causados por harmônicas.

1.1 Histórico

Até os 1960, aproximadamente, as cargas não lineares eram produzidas por usuários industriais eletroquímicos ou eletrometalúrgicos. Esses usuários preocuparam em elaborar uma maneira de limitar as correntes harmônicas, a fim de amenizar os efeitos destas no sistema elétrico (DIAS,1998).

A primeira forma para retificação elétrica foi feita por meios mecânicos. Uma peça do acionamento de um motor elétrico fisicamente fecha e abre uma chave no instante preciso da onda de tensão senoidal, afim de proporcionar correntes e tensões contínuas para a carga. Esse tipo de processo é enfadonho em função de que o ajuste das chaves e sua manutenção ajustada é difícil. De maneira adicional, o centelhamento dos contatos e a cobertura mecânica desses, também fazem deste equipamento um item de elevado índice de manutenção. Os equipamentos estáticos, tais como os diodos de mercúrio, selênio e silício, tiristores (SCRs) e GTOs, substituíram os retificadores mecânicos (DIAS, 1998).

Com a invenção e desenvolvimento dos tiristores, que são equipamentos de baixo custo, mas de grande eficiência, esses se tornaram disponíveis para que os motores CC ou de indução em gaiola de esquilo atuassem como acionamento de bombas, ventiladores e máquinas, com a capacidade de controlar a velocidade das mesmas. A tecnologia cresceu velozmente e a aplicação destes equipamentos vinculou-se aos processos de acionamento em todas indústrias. Estas cargas não-lineares cresceram consideravelmente nos anos 70. Este crescimento tem continuidade até hoje (DIAS, 1998).

Apesar da utilização de dispositivos de estado sólido ser atraente, alguns problemas estão relacionados a estes dispositivos. O aspecto mais evidente no processo básico de retificação através de equipamentos chaveados foi a existência de correntes harmônicas fluindo entre os sistemas CA e CC. As correntes equalizam o desequilíbrio de demanda de ambos os sistemas, causando sérios problemas nos lados de CA e CC (DIAS, 1998).

Um segundo problema está relacionado ao baixo fator de potência associado aos conversores estáticos de potência, especialmente quando operados com controle de retardo de fase na saída. A procura por economia de recursos, conta de demanda e energia elétrica da concessionária, tanto quanto os requisitos de regulação de tensão do sistema, se fazem

necessários aumentar o fator de potência global do sistema, o qual é comumente acompanhado pelo emprego de bancos e capacitores para sua correção. Todavia, quando se utilizam esses bancos de capacitores outros problemas relacionados às correntes e tensões harmônicas em capacitores e em outros equipamentos, tornam-se importantes (DIAS, 1998).

Outro problema pertinente é a excessiva quantidade de interferência em circuitos telefônicos, causado pelo acoplamento mútuo entre o sistema elétrico e o de comunicação nestas frequências harmônicas (DIAS, 1998).

O crescimento da distorção das tensões de alimentação em CA influencia no desempenho de computadores, máquinas com controle numérico e outros equipamentos eletrônicos sofisticados e que são sensíveis à poluição elétrica dos circuitos de alimentação. Esses componentes podem responder de maneira incorreta para entradas normais gerando possíveis falsas indicações ou podem não responder a todas as ordens recebidas (DIAS, 1998).

1.2 Objetivo Geral

- Realizar um estudo acerca da análise das cargas não-lineares em dispositivos de medição de grandezas elétricas.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar o estudo teórico acerca de harmônicas e cargas não-lineares;
- Realizar o estudo dos dispositivos de medições de grandezas elétricas, bem como os dispositivos convencionais e *true* RMS;
- Desenvolver experimentos a fim de analisar os erros introduzidos nas medições elétricas quando se utilizam equipamentos de medição convencionais;
- Analisar e discutir os resultados obtidos;
- Fornecer material de consulta para estudantes do curso de Engenharia de Controle e Automação que desejam trabalhar ou apenas conhecer mais a respeito do assunto, de forma prática e esclarecedora.

1.4 Justificativa do trabalho

Com a crescente utilização de cargas não-lineares presentes em computadores, micro-ondas, televisores, refrigeradores, dentre outros, percebe-se um aumento de correntes harmônicas presentes no sistema elétrico. Quando os níveis de harmônicas são elevados, tem-se uma má qualidade de energia e quando há distorções e perdas na tensão, podem acarretar vários problemas nos equipamentos eletrônicos. (LOPEZ, 2013)

Os instrumentos mais comuns para medição de tensão e corrente, tais como multímetros e alicates amperímetros, foram projetados para leitura de sinais senoidais. Entretanto, com a energia cada vez mais poluída (harmônicas), a utilização desses aparelhos não é conveniente, pois podem apresentar erros de leituras. (MORENO, 2011)

Este projeto propõe estudar a influência dessas perturbações em instrumentos de medição para diversos tipos de carga.

1.5 Metodologia proposta

No desenvolvimento do trabalho, realizou-se uma abordagem do problema. Fez-se uma revisão de conceitos pertinentes ao estudo do problema, e, por fim, o desenvolvimento de um trabalho prático.

Após pesquisa, desenvolveu-se o experimento prático.

Em suma:

- Abordagem do problema;
- Estudo dos conceitos pertinentes ao estudo do problema;
- Desenvolvimento de um experimento;
- Coleta das medidas e análise dos resultados.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos. O primeiro apresenta um contexto introdutório sobre o trabalho e expõem-se, também, os objetivos e a metodologia adotada; no capítulo 2 apresentam-se considerações gerais sobre componentes e métodos, abrangendo a questão das

harmônicas, cargas não-lineares, medições de grandezas elétricas, bem como os dispositivos convencionais e os dispositivos *true RMS*; No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento de um experimento prático a fim de coletar medições utilizando instrumentos de medições elétricas e uma análise dos resultados obtidos. Por fim, no último capítulo são tratadas as conclusões, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda alguns dos conceitos pertinentes para o entendimento deste trabalho, faz uma revisão dos temas abordados, sendo estes importantes para o maior entendimento dos leitores.

2.1 Harmônicas

Uma tensão ou corrente harmônica é um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação (MORENO, 2001). As distorções harmônicas são periódicas e existem quando há uma combinação dos componentes da forma de onda senoidal, a fundamental e seus múltiplos inteiros acarretando uma onda distorcida da forma de onda original (DIAS, 1998).

Os dispositivos geradores de harmônicas estão presentes em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. Estes são resultados de cargas não-lineares (LOPEZ, 2013)

As cargas tradicionais, tais como lâmpadas incandescentes conectadas a uma fonte de tensão senoidal, drenam correntes também na forma senoidal. Quando a forma de onda da corrente espelha a forma da tensão aplicada (ambas senoidais), não há presença de harmônicas. (LOPEZ, 2013)

Quando as correntes harmônicas atingem uma magnitude suficiente, ocorre a interação com o subsistema de distribuição elétrica e com outras cargas na vizinhança. A simples presença de harmônicas numa instalação não representa problema. O problema é a sua interação com o sistema de distribuição, causando distorções e perdas na tensão (LOPEZ, 2013)

A figura 2.1 representa três formas de onda de componentes harmônicos que fazem parte da corrente de carga não-linear em um sistema elétrico. Neste período, pode-se perceber que o terceiro componente harmônico se repete três vezes.

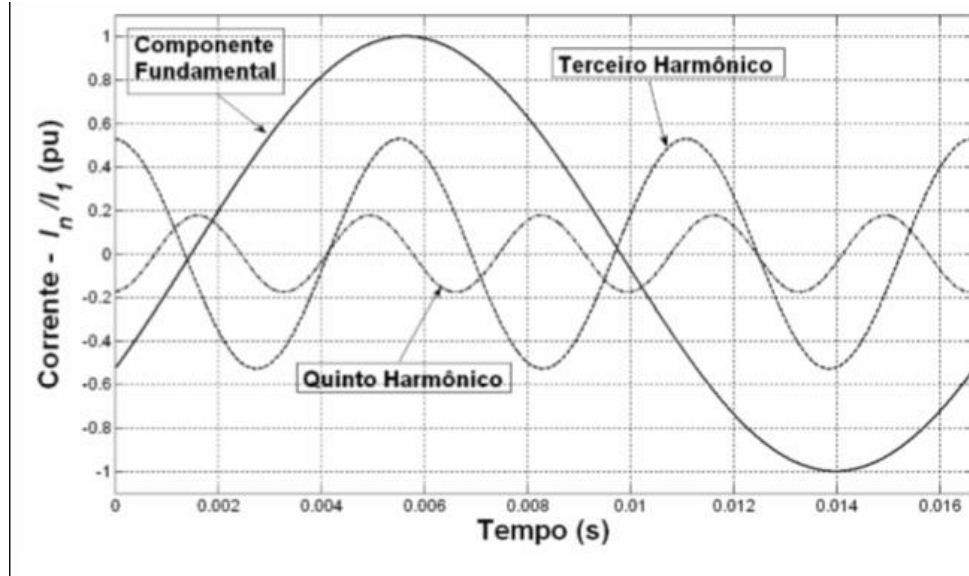


FIGURA 2.1: Componentes harmônicos de corrente. Fonte: (SANTOS, et al, 2006)

A Figura 2.2 representa a soma das grandezas, de tensão fundamental e quinta harmônica.

Quinta harmônica: $U_5(t) = 3.\sin(5t)$.

A tensão resultante da soma da fundamental com a quinta harmônica U_r . Graficamente, tem-se variável a resposta, para um tempo t , como pode ser visto na Figura 2.2

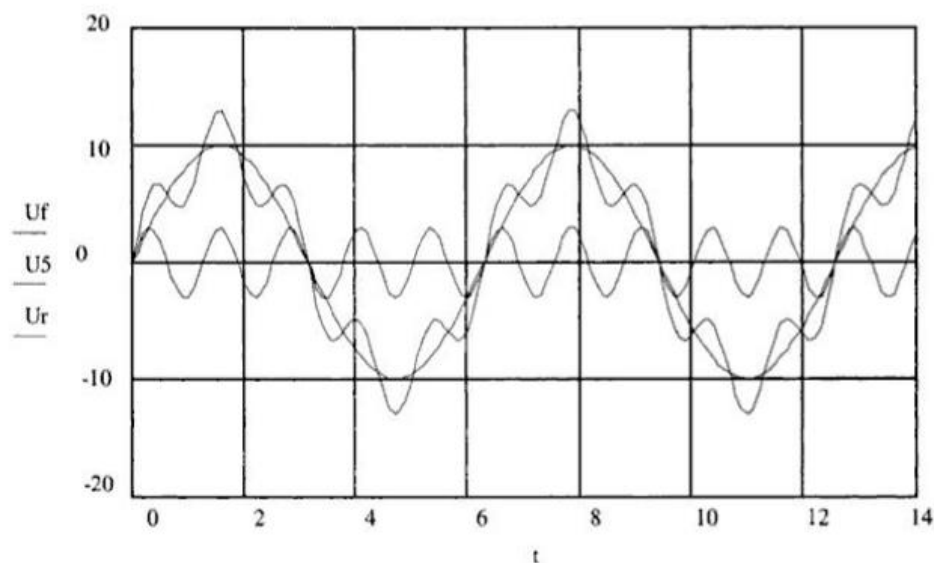


Figura 2.2: Visualização da senoide fundamental, sua quinta harmônica e a soma resultante. Fonte: (DIAS, 1998)

A partir de um espectro de frequências é possível visualizar a decomposição de uma forma de onda, conforme a Figura 2.3:

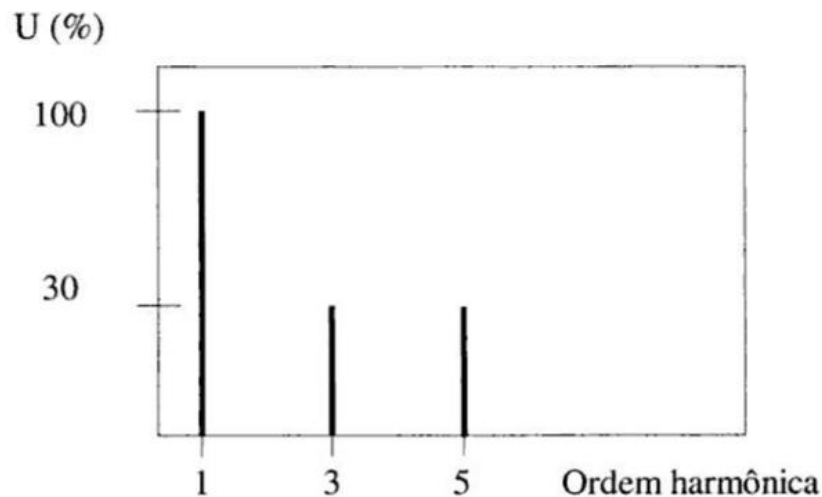


Figura 2.3: Espectro de frequência. Fonte: (DIAS, 1998)

A tensão resultante da soma da fundamental, terceira e quinta harmônicas será traçada na Figura 2.4 para melhor visualização do efeito.

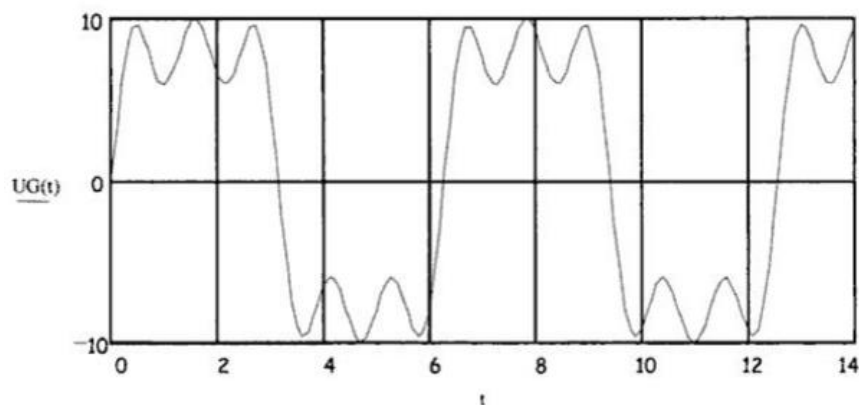


Figura 2.4: Tensão resultante da soma da fundamental, terceira e quinta harmônicas. Fonte: (DIAS, 1998)

Na Figura 2.4 é possível observar que não se tem mais uma senoide e sim uma grande distorção produzida por harmônicas

2.1.1 Análise matemática das harmônicas

Os sinais de tensão e de corrente podem ser decompostos em componentes harmônicas. Isto é possível através da Série de Fourier de uma função periódica, no domínio da frequência, como pode ser analisado na equação 2.1 (SANTOS et al, 2006).

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + b_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right) \quad (2.1)$$

Onde:

$x(t)$ – função periódica a ser decomposta em série de Fourier;

a_0 – componente contínua ou valor médio do sinal;

a_n – amplitude de pico das componentes de frequência $n\omega$;

T – período da forma de onda do sinal na frequência fundamental.

Utilizando valores eficazes ao invés de valores de pico, tem-se a equação 2.2:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \sqrt{2} \cos \frac{2n\pi t}{T} + B_n \sqrt{2} \sin \frac{2n\pi t}{T} \right) \quad (2.2)$$

Onde A_n e B_n são valores eficazes do sinal e podem ser obtidos através das equações 2.3, 2.4 e 2.5:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.3)$$

$$A_n = \frac{2}{\sqrt{2} T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (2.4)$$

$$B_n = \frac{2}{\sqrt{2} T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (2.5)$$

Outras formas equivalentes à equação 2.2 podem ser admitidas:

Forma complexa:

$$x(t) = A_n + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \sqrt{2} e^{j(n\omega t + \phi_n)}) \quad (2.6)$$

$$C_n \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.7)$$

$$\phi_n = -\arctan \left(\frac{B_n}{A_n} \right) \quad (2.8)$$

Forma cossenoidal:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \sqrt{2} \cos(n\omega t + \phi_n)) \quad (2.9)$$

Forma senoidal:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n)) \quad (2.10)$$

Sendo:

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (2.11)$$

Logo, as equações (2.12) e (2.13) representam na forma cossenoidal, os sinais de corrente e tensão:

$$V(t) = V_0 + V_1 \cos(\omega t + \phi_{V1}) + V_2 \cos(2\omega t + \phi_{V2}) + V_3 \cos(3\omega t + \phi_{V3}) + V_4 \cos(4\omega t + \phi_{V4}) + V_5 \cos(5\omega t + \phi_{V5}) + \dots + V_n \cos(n\omega t + \phi_{Vn}) \quad (2.12)$$

$$I(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega t + \phi_{i1}) + I_2 \cos(2\omega t + \phi_{i2}) + I_3 \cos(3\omega t + \phi_{i3}) + I_4 \cos(4\omega t + \phi_{i4}) + I_5 \cos(5\omega t + \phi_{i5}) + \dots + I_n \cos(n\omega t + \phi_{in}) \quad (2.13)$$

Onde:

V_0 e I_0 são componentes dos sinais de tensão de tensão e corrente

$V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ representam as amplitudes das tensões harmônicas.

$I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$ representam as amplitudes de correntes harmônicas.

$\phi_{v1}, \phi_{v2}, \phi_{v3}, \phi_{v4}, \dots, \phi_{vn}$ representam as fases dos respectivos harmônicos de tensão.

$\phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{i3}, \phi_{i4}, \dots, \phi_{in}$, representam as fases dos harmônicos de corrente.

“n” é a ordem de cada harmônico.

Cada harmônico tem sua fase e seu módulo. Na maioria das vezes, os harmônicos de ordem par são nulos, pois os dispositivos atuam de forma periódica e simétrica. Os harmônicos de ordem elevada são pequenos, pois as variações são suavizadas através da presença de indutâncias no sistema. A existência de harmônicos elevados pode indicar variações bruscas de tensão ou corrente e a existência de harmônicos de ordem par significa que o controle dos semicondutores está desajustado. (SANTOS et al, 2006)

Segundo Santos et al, (2006) a maneira mais comum de quantificar a distorção harmônica por meio da Distorção Harmônica Total (THD – Total Harmonic Distortion) (IEEE 519-1992),

que representa a distorção devida a todos os harmônicos presentes em um sinal. Pode ser definida como sendo uma porcentagem da frequência fundamental, calculada pela equação (2.14)

$$THD = \sqrt{\frac{\text{Somatório de Todos os quadrados das amplitudes de todos harmônicos do sinal}}{\text{Quadrado da Amplitude da frequência Fundamental do sinal}}} \cdot 100\%$$

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}{C_1^2}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}}{C_1} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

Onde, C_1 e C_n representam as amplitudes dos harmônicos de frequência fundamental e de ordem “n”, respectivamente, com base na forma cossenoidal.

Para calcular as amplitudes de tensão ou corrente basta os valores de C_n pelos valores desejados. Assim para se determinar a Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_V) ou Distorção Harmônica Total de corrente (THD_I), respectivamente, tem-se:

Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_V) :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.15)$$

Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_I):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

Para um circuito contendo carga linear, o valor total da corrente no circuito é dado pela equação (2.17):

$$I_{TOTAL} (rms) = \sqrt{I_1^2 (rms) + I_2^2 (rms) + I_3^2 (rms) + \dots + I_n^2 (rms)} \quad (2.17)$$

Portanto, de acordo com (IEEE-519), a distorção Total Harmônica de corrente (THD_I) é definida na equação (2.18):

$$THD_I (\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 (rms) + I_3^2 (rms) + \dots + I_n^2 (rms)}}{I_1 (rms)} \quad (2.18)$$

Ou ainda, de acordo com (IEC – 1000):

$$THD_I (\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2(rms) + I_3^2(rms) + \dots + I_n^2(rms)}}{I_{TOTAL}(rms)} \quad (2.19)$$

2.1.2 Potência e fator de potência

No Brasil, a frequência fundamental de um sistema de potência é 60 Hz. Entretanto, quando há a presença de harmônicas no sistema elétrico, o fator de potência deve ser revisado para adequar a esta nova situação (DIAS, 1998).

2.1.2.1 Definição

O fator de potência pode ser definido como a relação entre a potência ativa (P) e potência aparente (S) consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas de onda que a tensão e corrente apresentam (POMILIO, 1997) Ou seja:

$$\text{Fator de potência} = \frac{\text{Energia ativa (P)}}{\text{Energia aparente (S)}} \quad (2.20)$$

O $\cos \varphi$ relaciona a potência ativa e a potência aparente definido para cada um dos componentes harmônicos.

$$\cos \varphi_n = \frac{P_{hn}(W)}{S_{hn}(VA)} \quad (2.21)$$

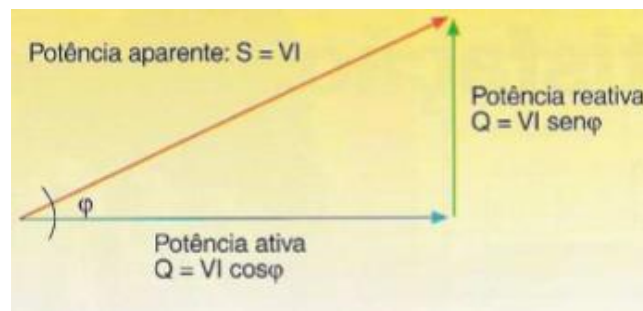


Figura 2.5: triângulo de potência. Fonte: (ISONI, 2004)

Normalmente, mede-se o $\cos \varphi$ da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado total. Para o caso de circuitos que possuam valores de fator de potência e $\cos \varphi$ diferentes entre si, significa que existem grandes quantidades de tensão e corrente harmônicas. A presença de harmônicas pode causar aquecimentos excessivos na instalação e várias avarias em bancos de capacitores. Quando os valores do fator de potência e $\cos \varphi$ são

muito próximos, isto significa a presença de poucas harmônicas nos circuitos (MORENO, 2001).

A Figura 2.6 representa as formas de onda de tensão e corrente de um dado ponto da instalação. Notam-se os valores indicados pelo instrumento de $fp = 0,70$ e $\cos \varphi = 0,87$. Além disso, a forma de onda da corrente é bem distorcida devido à presença de harmônicas.

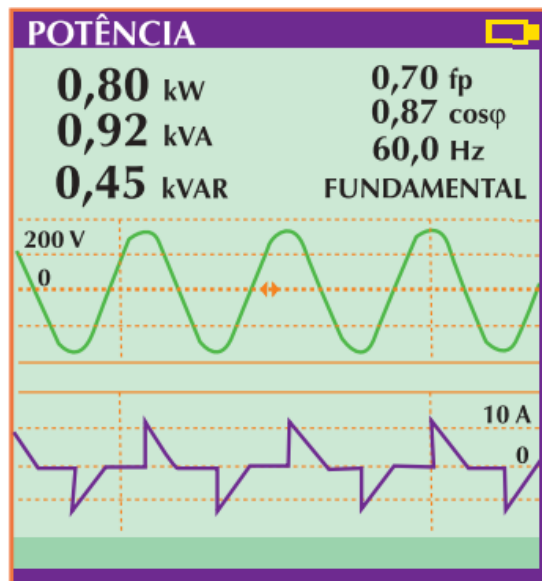


Figura 2.6: Forma de onda com diferença significativa entre o fator de potência e $\cos \varphi$. Fonte: (MORENO, 2001)

2.1.3 Fator de desclassificação (K)

A subestação de baixa tensão é sensível às harmônicas de corrente acarretando possíveis defeitos em equipamentos e superaquecimento. A potência nominal e o calor que o transformador dissipa em regime de plena carga são calculados baseados na hipótese de que o sistema contenha cargas lineares, isto é, sem a presença de harmônicas. Entretanto, no transformador circula uma corrente com a presença de harmônicas fazendo com que ele sofra um aquecimento adicional, causando alguma avaria (MORENO, 2001).

O fator K é um fator de desclassificação para transformadores que indica quanto se deve reduzir a potência máxima de saída quando houver harmônicas. (MORENO, 2001).

A equação matemática para o fator K é definida por:

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms} \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}} \quad (2.21)$$

A potência máxima fornecida por um transformador é definida por:

$$S_{max} = \frac{S_{nom}}{K} \quad (2.22)$$

Para utilizar essa equação é necessário determinar o valor de pico e a corrente eficaz em cada fase do secundário do transformador, calcular as médias desses valores para, então, utilizar a expressão 2.22. (MORENO, 2001)

Caso o fator K de um certo transformador de potência nominal 1000kVA vale 1,2, logo a potência máxima que esse equipamento pode fornecer sem sobreaquecimento seria de $1000/1,2 = 833\text{kVA}$. (MORENO, 2001)

A expressão 2.21, não considera os componentes harmônicos presentes na instalação. Todavia, tem-se uma aproximação adequada para determinar a potência máxima disponível por um transformador que esteja sob influência na forma de onda de corrente (MORENO, 2001)

2.1.4 Fator de crista (FC)

O fator de crista (FC) relaciona o valor de pico e o valor eficaz de um sinal, isto é:

$$FC = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (2.23)$$

Quando o sinal é perfeitamente senoidal, tem-se:

$$FC = \sqrt{2} = 1,414 \quad (2.24)$$

Para exemplificar o efeito do fator de crista será analisado um exemplo (Figura 2.7) com dois sinais de corrente. O sinal de número 1 corresponde à entrada de um conversor de frequência monofásico, já o sinal 2 corresponde a uma senoide pura com um valor eficaz igual ao do sinal 1. (MORENO, 2001)

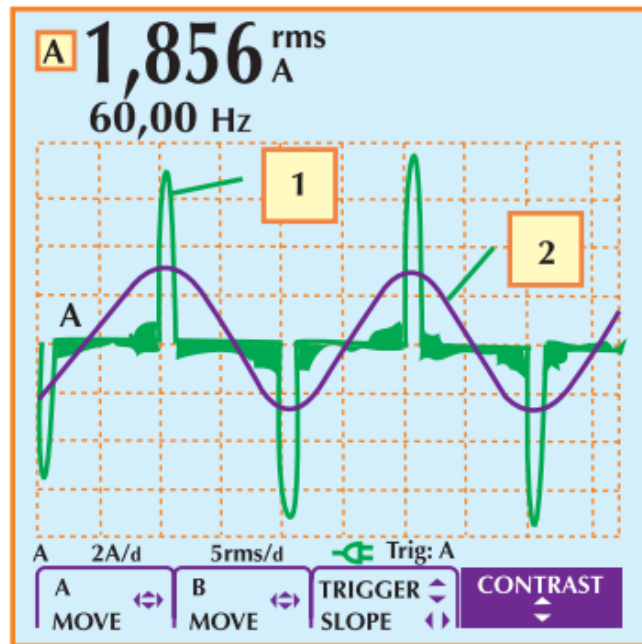


Figura 2.7: Sinais 1 e 2 com o mesmo valor eficaz, mas apresentam fatores de crista muito diferentes. Fonte: (MORENO,2001)

Tabela 2.1: Valores relativos aos sinais da Figura 2.7

	Sinal 1	Sinal 2
Corrente de pico (A)	7,45	2,63
Corrente rms (A)	1,86	1,86
Fator de crista (FC)	4,000	1,414

Fonte: (MORENO,2001)

Avaliando-se os valores da Tabela 2.1, nota-se que para o mesmo valor eficaz, a corrente de pico pode ser bem diferente dependendo do grau de deformação da onda. Para o exemplo, a corrente de pico do sinal 1 é quase 3 vezes maior que o sinal 2. Isso significa que em circuitos onde há a presença de harmônicas, o valor eficaz da corrente ou da tensão é uma informação pouco significativa. Para uma avaliação mais rigorosa, faz-se necessário conhecer o tipo de sinal que está se medindo, o valor de pico e a distorção harmônica total.

2.1.5 Fontes de Harmônicas

A maioria das cargas não-lineares que geram harmônicas trabalham com correntes não senoidais. Além disso, existem outros tipos de fenômenos que podem levar algum equipamento funcionar como carga não-linear SANTOS et al, (2006).

As principais fontes de correntes harmônicas são os conversores estáticos. Incluindo os inversores e retificadores, eles podem ser divididos em três grupos de acordo com a geração de harmônicos: Conversores de grande, média e baixa potência SANTOS et al, (2006).

Segundo Rocha et al (1997 apud SANTOS et al, 2006), os conversores de baixa potência relacionam-se aos equipamentos de pequeno porte: televisores, eletrodomésticos e computadores. Atualmente, esse grupo representa uma grande preocupação para o sistema elétrico por ocasionar vários problemas, devido à utilização disseminada desses aparelhos.

Muitos equipamentos eletrônicos, tais como: televisores e computadores, normalmente, são alimentados por circuitos retificadores de onda completa, com uma capacitância de alisamento de valor elevado. (SANTOS et al, 2006)

Por essa grande aplicabilidade industrial, a fonte mais usual de problemas harmônicos em sistemas elétricos de potência é a Ponte Conversora na configuração Graetz. Ela é muito utilizada em sistemas controladores de velocidade de motores, em sistemas de transmissão High Very Direct Current (HVDC), equipamentos como No-breaks, dentre outros. (SANTOS et al, 2006)

Outros equipamentos, de acordo com (Santos et al, 2006), também são considerados como fontes de harmônicas. São eles:

- **Lâmpadas de descarga**

As lâmpadas de descarga incluem abrangem as lâmpadas fluorescentes, de vapor de mercúrio e sódio e as lâmpadas fluorescentes compactas. Essas são cargas não-lineares, causando distorções na forma de onda de corrente. As maiores distorções estão nas lâmpadas fluorescentes compactas por possuírem reatores eletrônicos e starter.

- **Fornos a Arco**

De acordo com a condição de operação do forno, posição dos eletrodos, aleatoriedade dos arcos entre os eletrodos, posição dos eletrodos de acordo com o terra, são fatores que contribuem para o conteúdo harmônico produzido. Uma característica importante dos fornos é a presença de sub-harmônicos, ou seja, presença de harmônicos cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência fundamental.

Segundo (Moreno, 2001) existem algumas cargas ou equipamentos que geralmente são encontrados em instalações elétricas de baixa tensão e fontes de correntes harmônicas. Essas cargas são descritas a seguir:

- **Retificador carregador**

Os retificadores carregadores trifásicos são compostos por uma Ponte de Graetz. Essas podem ser de diodos não controlados, semicontrolados utilizando diodos e tiristores ou totalmente controlados utilizando-se tiristores, com forte geração de quinta e sétima harmônicas, representado na Figura 2.8. (MORENO, 2001)

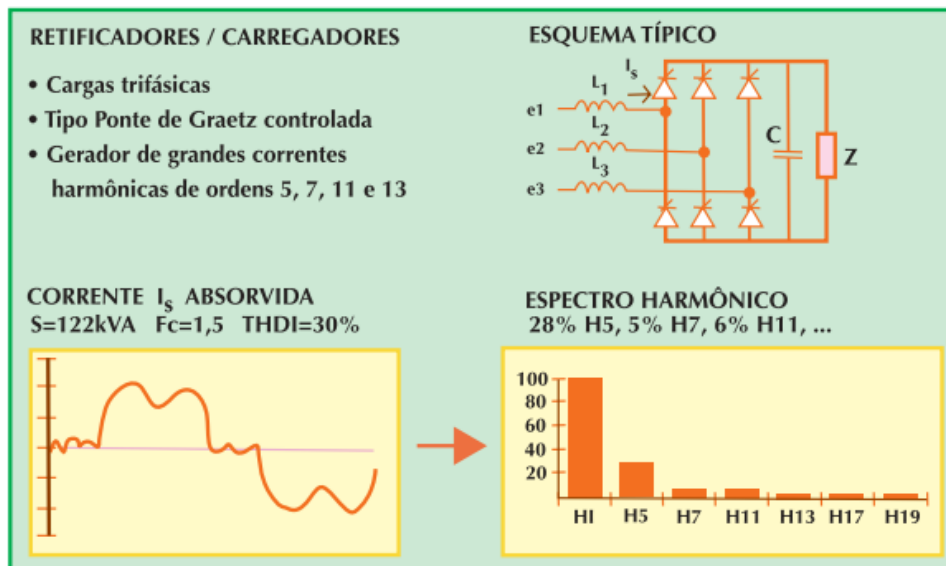


Figura 2.8: Circuito retificadores carregado totalmente controlado com indutância em série. Fonte: (MORENO,2001)

No caso da Figura 2.8, a taxa de distorção de corrente, THDI, é de 30%, sendo que 28% é para a quinta harmônica, 5% para sétima harmônica e 6% para décima primeira harmônica, podendo-se desprezar os demais componentes.

- **Variador de velocidade**

Os variadores de velocidade têm sido amplamente utilizados nos últimos anos. Isto deve-se ao fato de possuírem elevadas qualidades na partida dos motores, economia de energia e contribuírem para o aumento da vida útil desses. (MORENO, 2001).

Entretanto, esse variador de velocidade é um tipo de carga bastante poluidora, com grande número de harmônicas fazendo com que os valores de distorção de correntes sejam superiores a 100%. Isto significa que a soma das harmônicas presentes supera o valor da fundamental. (MORENO, 2001)

A Figura 2.9 representa um variador de velocidade com sua forma de onda bem deformada e amplo espectro harmônico. Nota-se que a taxa de distorção de corrente é de 124%, sendo 81% para quinta harmônica, 74% para sétima e 42% para a décima primeira, além da presença de correntes de 13^a, 17^a e 19^a ordens.

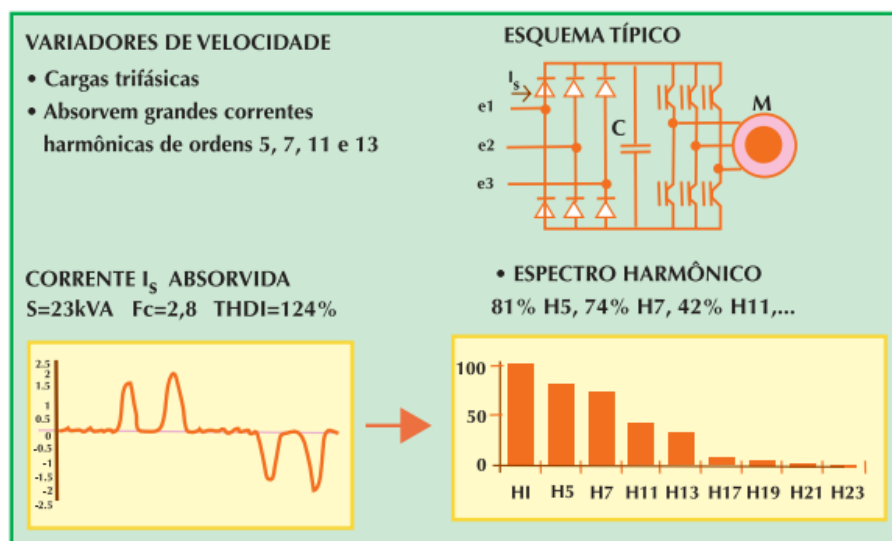


Figura 2.9: Circuito típico de um variador de velocidade. Fonte: (MORENO, 2001)

- **Fonte de alimentação monofásica**

Esse tipo de carga é o mais utilizado nas instalações elétricas já que qualquer equipamento eletrônico possui sua própria fonte de alimentação. Tratam-se de fontes comutadas, com baixo custo muito comum em computadores, impressoras, secretárias eletrônicas, dentre outros. (MORENO, 2001)

Em edifícios comerciais e escritórios onde há vários desses equipamentos, existe grande presença de harmônicas que podem afetar a operação e desempenho das instalações elétricas. (MORENO, 2001)

A Figura 2.10 representa um circuito de alimentação monofásica com taxa de distorção de corrente de 93%, sendo 78% para terceira harmônica, 44% para a quinta harmônica e 17% para a sétima.

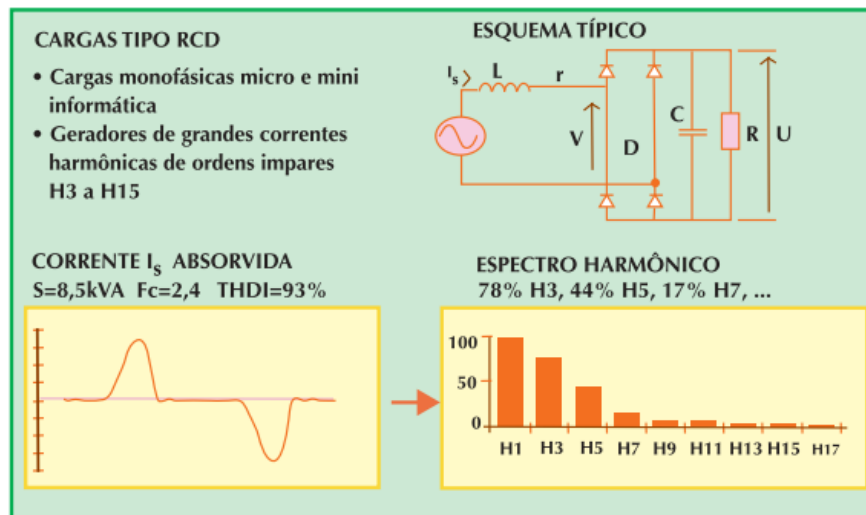


Figura 2.10: Circuito de uma fonte de alimentação monofásica. Fonte: (MORENO, 2001)

- **Máquina de soldar elétrica**

A máquina de soldar elétrica é uma carga com um consumo de energia instável e apenas uma fase. Conforme representado na Figura 2.11, a forma de onda da corrente de uma máquina de soldar assemelha-se com a forma da fonte de alimentação monofásica, todavia, o consumo de energia é maior já que sua passagem por zero é de menor duração. (MORENO, 2001).

A taxa de distorção de corrente é de 58%, sendo 36% para terceira harmônica, 9% para as harmônicas de ordem 5ª e 7ª.

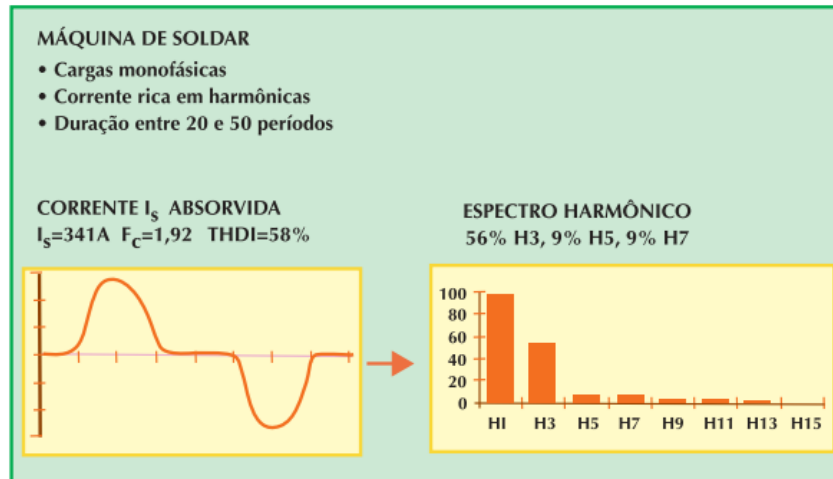


Figura 2.11: Corrente absorvida e espectro para uma máquina de soldar. Fonte: (MORENO, 2001)

A título de exemplo, alguns resultados de medições de harmônicas feitas em alguns equipamentos, são mostrados na Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Emissão de harmônicos de alguns equipamentos residenciais, comerciais e industriais.

Equipamento Avaliado	Distorção Harmônica Total de Corrente - THDi (%)
Aparelho de ar condicionado	123
Microcomputador com impressora conectada	86,8
Televisão com decodificador para TV a cabo	92,3
Chuveiro com tap's para ajuste de temperatura	36,6
Geladeira	7,2
Lavadora de roupas	5,7
Lavadora de louças	10,3
Forno microondas	46,1
Exaustor	32,1
Aparelho de som com CD	103,5
Televisão com vídeo cassete	129,1
Vídeo Game	32,1
Lâmpada fluorescente	35,8
Ventilador	4,2
Cafeteira	2,3
Torradeira	2,1
Carregador de bateria	83,1
Telefone sem fio	39,5
Telefone sem fio com secretária eletrônica	47,0
Rádio relógio	52,1
Transformadores de uso doméstico (50W)	33,3
Portão eletrônico	13,0

Fonte: (SANTOS et al, 2006)

2.1.6 Perturbações Causadas por Harmônicas

As perturbações são os efeitos indesejados presentes em um sistema elétrico que pode ser causado pela distorção harmônica em um sistema. A poluição harmônica gerada por equipamentos que utilizam corrente não senoidal está presente tanto em plantas industriais quanto em ambientes residenciais e comerciais (NASCIMENTO, 2007).

Os efeitos da presença de harmônicas são sentidos por todos equipamentos conectados ao sistema até mesmo nos geradores de harmônicas, como por exemplo os conversores estáticos que são destinados ao acionamento de máquinas, sofrem com a distorção na tensão e aos notches produzidos por eles mesmos (INEP). Além disso, a presença de harmônicos contribui

para diminuição da vida útil do sistema e dos equipamentos a ele ligados. Alguns desses efeitos, segundo Dias (1998), são:

Bancos de capacitores: O principal efeito causado nos capacitores é o aumento de perdas devido ao aquecimento adicional.

Caldeiras elétricas: Para aliviar sobretensões de regime temporário devem-se provocar maiores quedas de tensão no sistema elétrico, reduzindo, assim, cargas pesadas. Quando houver grandes sobretensões, as cargas iniciais de caldeiras são insuficientes para contê-las, sendo de pouco auxílio para que o sistema retorne a condição normal de operação.

Sistema de iluminação: Quando há sobretensões tem-se alguns problemas que afetam os sistemas de iluminação, tais como: as lâmpadas fluorescentes reduzem seu desempenho a partir de 6% de sobretensão, redução na vida útil das lâmpadas incandescentes pois a elevação de temperatura do filamento incandescente é um fator crucial para queima prematura destas.

Medidores de energia: A presença de distorções de corrente e tensão pode comprometer a exatidão de medidores de energia ativa tipo indução.

Relés de proteção: A presença de harmônicas de tensão e corrente podem degradar suas características operacionais. No caso de relés que dependem para operação de valores de pico ou de passagem por zero das ondas de tensão ou corrente são afetadas pela distorção das formas de onda. Os relés operam mais lentamente ou com valores mais altos de corrente de partida quando há harmônicas.

Computadores e periféricos: Os fabricantes de computadores e periféricos estipulam limites de distorção harmônica para seus produtos, variando para cada fabricante.

Conversores estáticos de potência: Os dispositivos eletrônicos como ciclo conversores, inversores e retificadores são sensíveis ao ponto de passagem por zero da onda de tensão devido à presença de harmônicas. No caso dos conversores, o efeito resultante é o deslocamento do ponto natural de comutação, alterando assim, seu desempenho. No caso de retificadores controlados pode acarretar uma tensão de saída mais baixa e um pior fator de potência. Já nos inversores podem ocorrer falhas de operação por curto-circuito interno devido aos erros de comutação.

Sistemas de comunicação: O principal efeito nos sistemas de comunicação é o ruído nas comunicações telefônicas pela presença de tensão e corrente harmônica no sistema de

potência, devido ao acoplamento que existe entre os sistemas de comunicação pelos campos magnéticos e elétricos existentes.

Segundo Dias (1998), vários são os efeitos causados em equipamentos:

Efeitos nos motores e geradores: Devido ao aumento das perdas no ferro e cobre há um aumento da temperatura de operação. Essa é a principal consequência das harmônicas em máquinas elétricas de corrente alternada. As componentes harmônicas afetam o torque da máquina podendo causar um grande ruído audível. Mesmo que a contribuição para o torque médio seja pequena, existe a possibilidade de ocorrer batimentos de torque e mesmo a excitação de ressonâncias mecânicas da máquina, através da criação de oscilações mecânicas.

A qualidade dos produtos em um processo industrial sensível pode ser comprometida pela presença de batimentos ou pulsações de torque. Um exemplo é na fabricação de fibras sintéticas.

Os pares de harmônicas (5° e 7° , 11° e 13°) características de conversores utilizados em acionamentos elétricos apresentam sequências opostas, induzindo no rotor correntes na frequência da harmônica intermediária (6° , 12° , ...). Isto ocorre pois harmônicas de sequência positiva induzem corrente cuja frequência é a diferença entre a frequência da harmônica considerada e a frequência do campo girante fundamental do rotor já que os campos girantes da harmônica e da fundamental do rotor giram no mesmo sentido.

No caso de harmônicas de sequência negativa, a frequência resultante é dada pela soma entre a frequência da harmônica considerada e a frequência do campo girante fundamental do rotor. Isto ocorre devido os campos girantes da harmônica e da fundamental girarem no sentido oposto.

Vale ressaltar que, embora o efeito de pulsações de torque seja tolerado pelo processo industrial, este poderá contribuir para o envelhecimento precoce do eixo e outras partes móveis da máquina e causar fadiga do eixo.

Efeito nos transformadores: As harmônicas são responsáveis pela geração de ruído audível e aumento do aquecimento do transformador. As harmônicas de tensão causam das perdas no ferro, enquanto, as harmônicas de corrente, causam aumento nas perdas no cobre e as perdas devidas ao fluxo de dispersão.

Outro grande problema está relacionado com a circulação de harmônicas triplas (múltiplas ímpares de 3) nos enrolamentos ligados em delta. Esse efeito pode causar sobrecargas nos enrolamentos para projetos que não tenham considerado a presença destas harmônicas.

O procedimento para o dimensionamento em potência do transformador com alimentação de cargas não-lineares, de acordo com a norma ANSI/IEEE C57.100-1986 deve-se considerar o aumento da temperatura de operação com tensões e correntes harmônicas, chamado de fator K, que indica que o calor gerado devido à corrente distorcida é K vezes maior do que seria gerado para o mesmo valor eficaz de uma corrente sinusoidal pura (somente a fundamental).

Em alguns países, como nos Estado Unidos, podem-se encontrar transformadores comerciais chamados de “K-Rated Transformers” com os valores K-4, K-9, K-13, etc. Isto significa que no projeto destes transformadores foram consideradas as características da cargas não-lineares que serão alimentadas.

A tabela 2.3 apresenta o tipo de carga e o fator K correspondente. Os transformadores para cargas lineares possuem fator K=1. Vale ressaltar que estes valores são apenas indicativos. Para que se tenha uma definição mais rigorosa do fator de K é preciso conhecer com detalhe as cargas ou até mesmo realizar medições e análise do conteúdo harmônico.

Tabela 2.3: Tipo de carga e fator K correspondente

CARGA	FATOR K
Iluminação incandescente (sem controle de luminosidade com dimmers)	K-1
Aquecimento resistivo (sem controle de temperatura com conversores estáticos)	K-1
Motores CA (sem acionamento por conversor estático)	K-1
Iluminação com lâmpadas de descarga	K-4
UPS com filtro de entrada	K-4
Equipamentos para soldagem à arco	K-4
Equipamento para aquecimento indutivo	K-4
CLP's e controladores eletrônicos (exceto acionamentos com velocidade variável)	K-4
Equipamento de telecomunicação (PBX, por exemplo)	K-13
UPS sem filtro de entrada	K-13
Instalações elétricas (tomadas) em hospitais, clínicas, escolas, ...	K-13
Instalações elétricas (tomadas) para setores de inspeção ou teste de produtos em linha	K-13

de produção (montagem) industrial	
Computadores de grande porte e periféricos	K-20
Acionamentos em velocidade variável	K-20
Instalações elétricas (tomadas) em áreas críticas (centros cirúrgicos, UTI's)	K-20
Instalações elétricas (tomadas) em laboratórios industriais, médicos, escolares.	K-30
Instalações elétricas (tomadas) em ambientes comerciais (bancos, escritórios)	K-30
Mini e microcomputadores	K-30
Cargas conhecidas como grandes geradoras de harmônicas (sobretudo de ordem elevada)	K-40

Fonte: (DIAS, 1998).

Efeito nos condutores: Os condutores podem ficar submetidos aos grandes esforços de tensão e efeito corona acarretando falhas no isolamento, caso haja ressonância. Cabos e condutores quando submetidos aos níveis “ordinários” de THD aumentam sua temperatura, devido à circulação de reativos de distorção, efeito peculiar e efeito de proximidade, sendo os dois últimos relacionados à frequência. Com a presença de harmônicas, a resistência em corrente alternada dos condutores aumenta, acarretando o aumento das perdas Joule.

2.2 Cargas geradoras de harmônicas

2.2.1 Cargas lineares

As cargas lineares são, geralmente, constituídas por capacitâncias, indutâncias e resistências, sendo as formas de onda de corrente e tensão senoidais (MORENO, 2001).

Se a carga é um motor, por exemplo, com 1/6 de cv, rendimento de 80% e com fator de potência de 0,85, as formas de onda da corrente e tensão são representadas na figura 2.12.

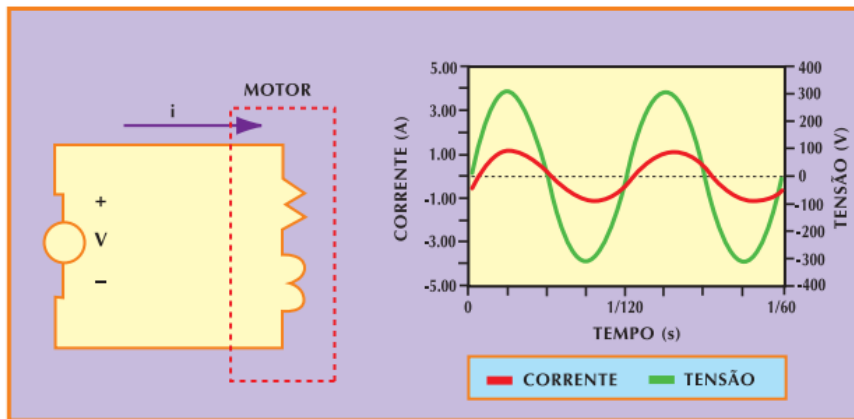


Figura 2.12: Consumo de um motor monofásico de 1/6 cv. Fonte: (MORENO, 2001)

2.2.2 Cargas não-lineares

Com a crescente utilização de vários equipamentos capazes de controlar o produto final, tais como: iluminação variável e velocidade ajustável, aproximadamente 50% da energia elétrica necessita ser controlada por um dispositivo de eletrônica de potência antes de ser utilizada. Essa eletrônica utiliza diodos, transistores e tiristores sendo que a maioria desses opera em modo de interrupção (MORENO, 2001).

Portanto, isso significa que funcionam em dois estados:

Estado de condução: Corresponde a um interruptor fechado. A dissipação de potência no dispositivo é muito pequena, pois a corrente que passa no dispositivo pode atingir valores elevados, enquanto a tensão no dispositivo é praticamente nula (MORENO, 2001).

Estado de bloqueio: Neste caso, funciona como um interruptor aberto. A tensão no dispositivo é elevada, enquanto a corrente é muito pequena. Portanto, a dissipação de potência é muito pequena.

A passagem de um estado para outro através de circuitos consome muito pouco, geralmente menos de 5W, para todos os semicondutores de potência. A figura 2.13 representa um dispositivo para controlar a corrente em uma carga linear que possui uma indutância e resistência. A tensão é interrompida pelos semicondutores, deixando de ser senoidal. A corrente em alguns intervalos de tempo é nula. O usuário consegue controlar os instantes de condução (ângulo de disparo), sendo possível variar a tensão e corrente no circuito (MORENO, 2001).

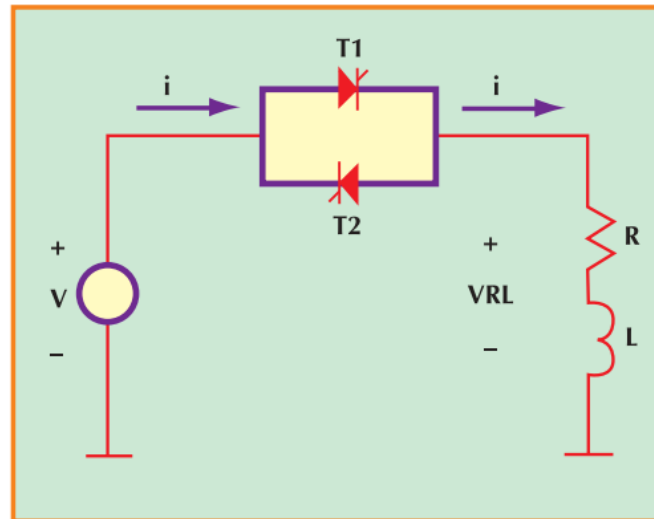


Figura 2.13: Dispositivo de controle semicondutor da corrente e da tensão. Fonte: (MORENO, 2001)

A distorção harmônica e cargas não lineares resultam na circulação de correntes não senoidais pelo circuito, mostrado na Figura 2.14 (MORENO, 2001).

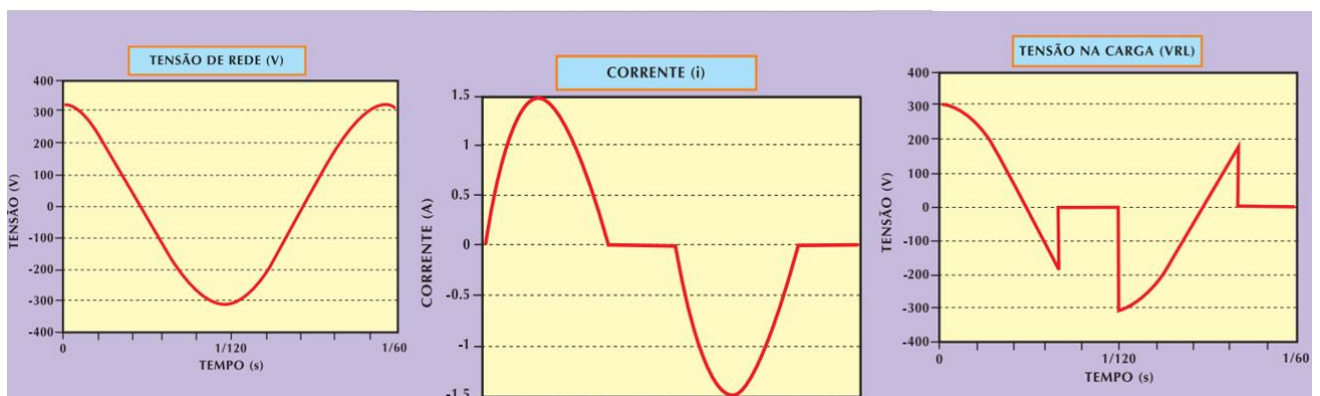


Figura 2.14: Formas de onda no circuito com dispositivo de controle. Fonte: (MORENO,2001)

2.3 Medição de grandezas elétricas

Os instrumentos mais comuns para medição de tensão e corrente são projetados para a leitura de sinais senoidais, que estão cada vez mais raros de serem encontrados. Com a presença de harmônicas, a leitura desses aparelhos podem apresentar erros grosseiros, levando a uma interpretação errada sobre o circuito analisado (MORENO, 2001).

2.3.1 Instrumentos convencionais de Valor médio

Os multímetros e alicates amperímetros são os instrumentos portáteis mais utilizados e são fabricados há anos, na época em que os sinais presentes nas instalações eram senoidais e

pouco se sabia sobre harmônicas. Esses instrumentos também são chamados de “valor médio” e conseguem medir sinais senoidais corretamente com erros associados à classe de exatidão do equipamento (MORENO, 2001).

Caso o sinal medido não seja senoidal, o resultado da medição pode ser muito diferente do valor eficaz real da tensão ou corrente que está se medindo. O método de medição usado para calcular o valor eficaz pode ser a explicação para tal diferença (MORENO, 2001).

Os instrumentos convencionais utilizam a relação entre o valor eficaz e o valor médio em meio período para calcular o valor eficaz do sinal. Esse instrumento utiliza o coeficiente 1,11 que relaciona o valor eficaz e o valor médio em meio período, isto é, o valor médio de um sinal retificado. Todavia, esse coeficiente restringe o uso apenas para sinais senoidais (MORENO, 2001).

Um circuito muito comum em equipamentos convencionais está representado na Figura 2.15. Este circuito é constituído por uma ponte de diodos para retificar o sinal, um circuito amplificador para multiplicar o sinal por 1,11 e o circuito para o cálculo do valor médio. Quando não há harmônicas, independentemente da frequência e do valor do sinal, o resultado é um número que coincide com o valor eficaz (MORENO, 2001).

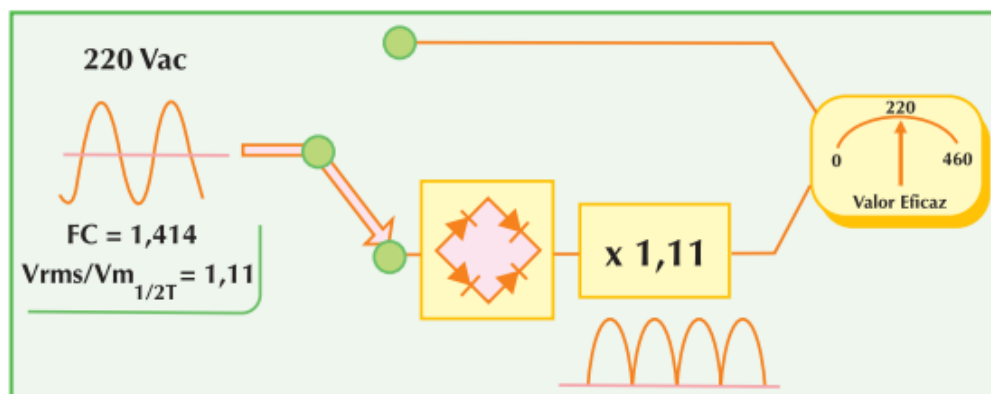


Figura 2.15: Circuito de um instrumento de valor médio medindo um sinal senoidal. Fonte: (MORENO, 2001)

Quando esse mesmo instrumento do valor médio é submetido a um sinal com harmônicas, a relação entre o valor eficaz e o valor médio do sinal retificado é igual a 2,1, sendo que o amplificador sempre multiplica o sinal por 1,11 (MORENO, 2001).

Para esse circuito, mostrado na Figura 2.16, o multímetro indicaria o valor de 116V, sendo que o valor correto seria de 220V, ou seja, um erro de pouco mais de 50% na medição. Essa situação pode justificar o que ocorre com alguns disjuntores com corrente nominal 15A abrem um circuito onde mede-se 12A medidos em instrumentos convencionais. Na verdade, a corrente pode ser de 18A.

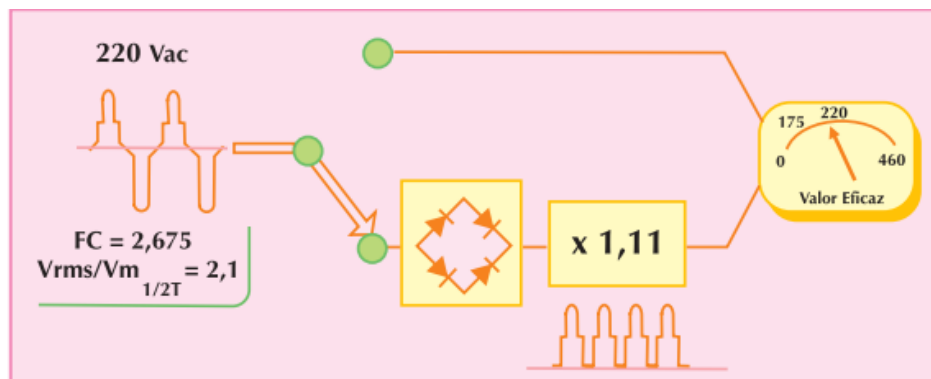


Figura 2.16: Circuito de um instrumento de valor médio medindo um sinal com harmônicas.

2.3.2 Instrumentos de valor eficaz verdadeiro (“*TRUE RMS*”)

Os instrumentos de valor eficaz verdadeiro foram projetados da necessidade de se medir sinais que não eram senoidais, isto é, que contém harmônicas (MORENO, 2001).

A Figura 2.17 representa um circuito de um instrumento de valor eficaz verdadeiro, contendo dois transistores e um amplificador operacional. Quando o aquecimento produzido pelo sinal em corrente contínua é igual ao gerado pelo sinal alternado que se deseja medir, o circuito operacional deixa passar o valor de contínua equivalente ao valor de alternada (MORENO, 2001).

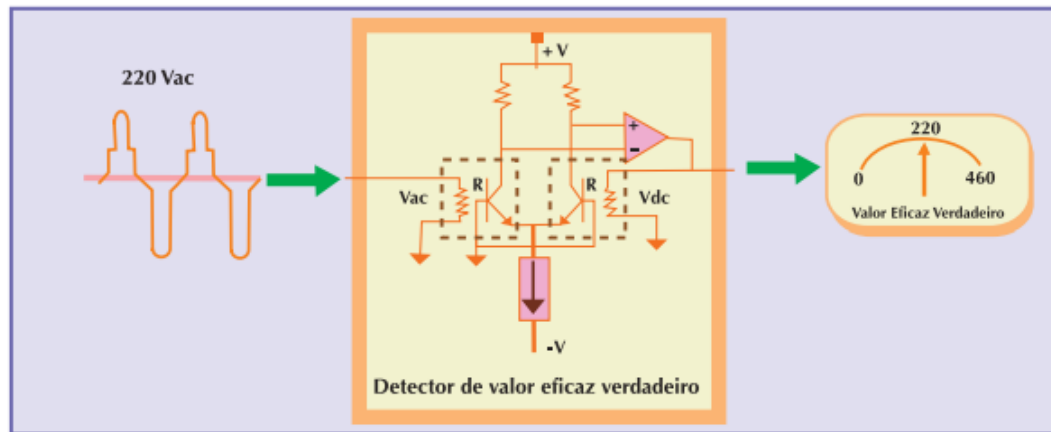


Figura 2.17: Circuito de entrada de um instrumento de valor eficaz verdadeiro. Fonte: (MORENO, 2001)

A Figura 2.18 representa uma típica forma de onda de corrente gerada por um computador pessoal. O valor *true* RMS mantém a 1 A, entretanto, o valor de pico é muito mais alto, chegando aos 2,6 A e o valor médio é muito inferior, chegando a 0,55 A. Caso esta forma de onda seja medida com um multímetro de leitura média com calibração RMS, a leitura seria de 0,61 A ao invés do valor verdadeiro 1 A, ou seja, seria um erro de 40% (WEST, 2002).

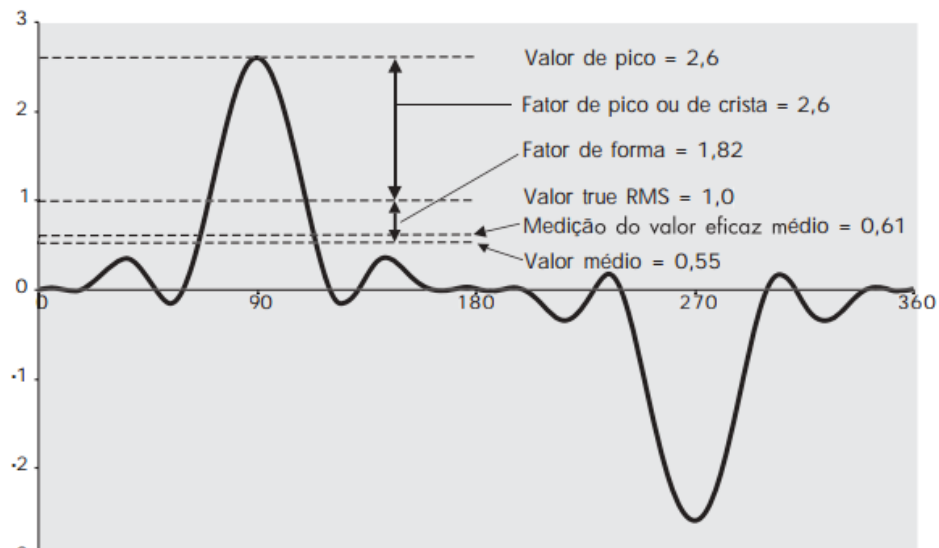


Figura 2.18: Forma de onda de corrente gerada por um computador pessoal. Fonte: (WEST, 2002)

Um multímetro *true* RMS funciona tomando o quadrado do valor instantâneo da corrente de entrada, calculando a média relacionada ao tempo e fornecendo a raiz quadrada desta média. Como este procedimento não é perfeitamente programado, devem-se levar em conta dois fatores para limitar a precisão: o fator de pico ou de crista e a resposta de frequência (WEST, 2002).

No caso de aparelhos de valor eficaz verdadeiro, deve-se atentar a sua largura de banda. Ela corresponde-se à faixa de frequências do sinal dentro da qual o medidor consegue realizar medidas confiáveis. Essa largura de banda assemelha-se a de um filtro passa-baixa. Geralmente, é necessário que o equipamento tenha 1KHz (até a 17ª harmônica) de largura de banda para que seja possível a realização de medições para formas de onda distorcidas. (MORENO, 2001)

A Figura 2.19 mostra três sinais medidos. Nota-se, através da Tabela 2.4, que quanto mais o sinal deforma-se, mais aumenta o erro do instrumento do valor médio (MORENO, 2001).

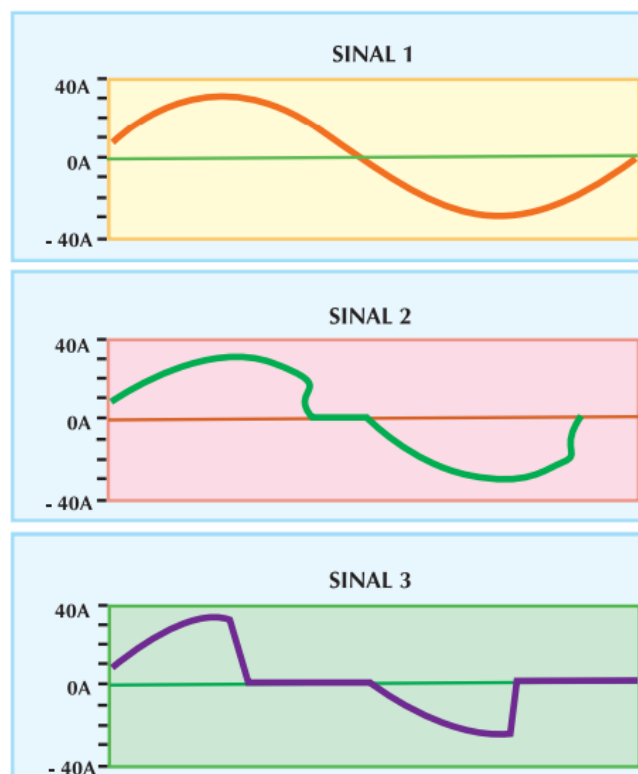


Figura 2.19: Três sinais medidos com diferentes graus de distorção. Fonte: (MORENO, 2001)





Tabela 2.4: Valores medidos pelos instrumentos.

	Sinal		
	1	2	3
Instrumento de valor eficaz verdadeiro (A)	22,0	21,3	16,8
Instrumento de valor médio (A)	22,0	19,5	12,4
$I_{rms} / I_{médio}$ em meio período	1,11	1,21	1,5
Fator de crista (FC)	1,41	1,46	1,86
Erro (%)	0	9	26

Fonte: (MORENO, 2001)

A tabela 2.5 resume, para quatro tipos de sinais, os erros que podem ocorrer com o uso de instrumentos convencionais e o *true* RMS.

Tabela 2.5: Comparação entre um multímetro de valor médio e de valor verdadeiro eficaz.

Tipo de multímetro	Onda senoidal pura	Onda quadrada	Diodo retificador monofásico	Diodo retificador trifásico
				
Valor médio	Correto	10% mais alto	40% mais baixo	5-30% mais baixo
True RMS	Correto	Correto	Correto	Correto

Fonte: (WEST, 2002)

3 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1.1 Equipamentos utilizados nos experimentos

Os equipamentos utilizados para medição dos valores de corrente, potência e tensão serão descritos a seguir.

3.1.1.1 Analisador de Potência



Figura 3.1: Analisador de Potência DW-6090. Fonte (LUTRON, 2016)

De acordo com (LUTRON, 2016), o analisador de potência possui como funções:

- Multi-funções: WATT, VA, a RCQ, $\cos \theta$ (Fator de potência), ACV, ACA, DCV, DCA, Hz, ohm.
- A alimentação AC True (Watt) e potência aparente (VA).
- True RMS para ACV, ACA.
- Resolução de 0,1 W (<1000 W), de alta precisão de alta resolução na faixa de baixa watt.

3.1.1.2 Analisador de Harmônicas

O analisador de rede usado trata-se do modelo AE – 200 da Instrutherm (Figura 3.2). Este equipamento possui as seguintes características (INSTRUTHERM, 2014):



Figura 3.2: Analisador e suas ferramentas. Fonte: INSTRUTHERM (2014)

- Display: Cristal líquido de matriz de pontos de 240 x 128 com iluminação e exibição de gráfico e de até 35 parâmetros ou 50 harmônicas.
- Taxa de atualização do display: 1 vez por segundo;
- Potência AC: 5W ~ 9,999MW (0 a 1000A). Precisão: $\pm 1\% \pm 8$ dígitos;
- Potência aparente AC: 0,000VA ~ 9999kVA;
- Potência reativa: 0,000VAR ~ 9999 kVAR;
- Potência ativa: 0mWh ~ 999999kWh;
- Corrente AC: 0,1mA ~ 1000A (3 faixas). Precisão: $\pm 0,5\% \pm 5$ dígitos;
- Tensão AC: 4 ~ 600V (Precisão: $\pm 0,5\% \pm 5$ dígitos);
- Análise de harmônicas de tensão AC e corrente AC em porcentagem e magnitude: 1^a ~ 99^a;
- Fator de potência: 0,00 ~ 1,00;
- Ângulo de fase: $-180^\circ \sim 180^\circ$;
- Distorção de harmônica total: 0 ~ 999,9%;
- Valor de pico de tensão AC: 50Hz / 60Hz;
- Fator de crista: 1,00 ~ 99,99;
- Frequência no modo automático: 45 ~ 65Hz;
- Resolução: 0,1Hz
- Precisão: 0,1Hz

- Análise de sistemas monofásicos e trifásicos: 1P2W, 1P3W, 3P3W, 3P4W
- Medição: TRUE RMS (V123 e I123);
- Transformador de corrente e tensão programável: (1 ~ 600 e 1 ~ 3000, respectivamente);
- Exibição de forma de onda de tensão e corrente;
- Demanda média e máxima com período programável;
- Diagrama de fase com parâmetros de sistema trifásico;
- Captura de 28 eventos transientes com nível programável (tempo + ciclos);
- Coeficiente de tensão ou corrente trifásico;
- Fator de tensão ou corrente trifásico ;
- Cálculo de corrente através do condutor neutro;
- 512kb de memória com intervalo programável (tempo de amostragem de 1 a 6000s; tempo de registro de dados de 4,7h até 1180 dias para o sistema 3P4W);
- Capacidade de registro de dados: 17476 registros (3P4W, 3P3W), 26214 registros (1P3W), 52428 registros (1P2W), 4096 registros (50 harmônicas);
- Emissão de forma de onda, parâmetros de potência e harmônicas;
- Número de amostragens: 1024 amostragens por período;
- Indicação de bateria fraca e sobre escala;
- Interface USB óptica isolada;
- Temperatura de Operação: -10 a 50°C;
- Umidade de Operação: Menor que 85% RH;
- Altitude máxima: 2000m;

Além das características descritas este aparelho possui um software que permite obter todos os parâmetros que se observa no visor do AE-200 em um computador como Windows 98, ME e XP. Este software conecta-se com o analisador através da interface USB. A grande vantagem da aquisição de dados ser feita pelo computador é o aumento considerável de dados que podem ser armazenados, pois a memória do computador é muito maior que o AE-200.

3.1.1.3 Medidor de energia

Os medidores de energia são equipamentos compostos por terminais, bloco de contato, discos, registrador, sensores de tensão e corrente e mostrador. São amplamente utilizados em circuitos monofásicos com corrente alternada.

O funcionamento destes baseia-se no eletromagnetismo no qual a corrente de carga atua em uma bobina eletromagnética acionando-se o disco de consumo que, conseqüentemente, será registrado pelo contador.

Na figura 3.3 apresenta-se o princípio básico deste tipo de medidor:

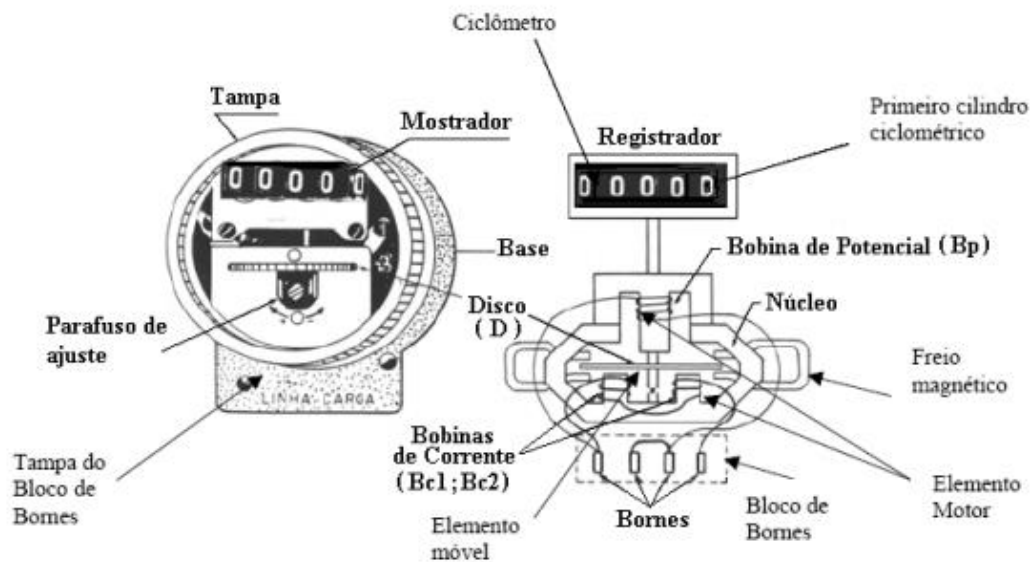


Figura 3. 3: Esquema do medidor de energia. Fonte: (UFSC, 2008)

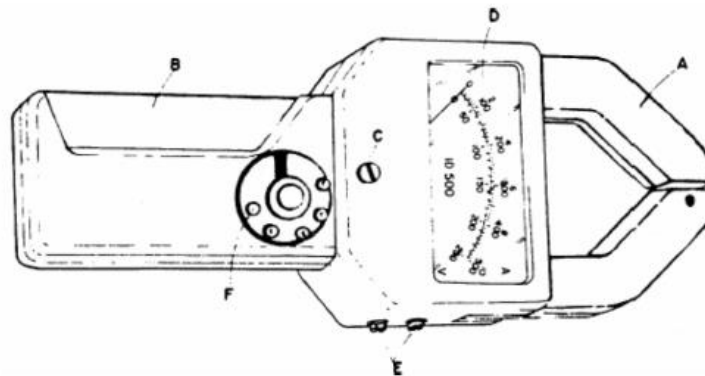
De acordo com o material disponível pela universidade Federal de Santa Catarina, tem-se:

- Bobinas BC1 e BC2: Bobinas de corrente, com poucas espiras de fio grosso (baixa resistência), ficam em série com a carga;
- Bobina BP: Bobina de potencial, com muitas espiras de fio fino (alta resistência), fica em paralelo com a carga;
- Disco D: Disco: É constituído por uma chapa de alumínio de alta condutibilidade e leveza. O número de voltas dado pelo disco é proporcional ao consumo;

3.1.1.4 Alicate amperímetro

O alicate amperímetro é um equipamento utilizado para medir tanto correntes contínuas quanto alternadas. São bastante utilizados por não precisarem interromper o circuito para que a ligação seja em série.

Seu princípio de funcionamento baseia-se na indução, isto é, um campo magnético é criado através da corrente do condutor e, portanto, é gerada uma força eletromagnética no instrumento, permitindo a leitura em escalas relacionadas com a corrente a medir. A Figura 3.4 apresenta as características de um alicate amperímetro.



A	Gancho (secundário de um TC)	D	Visor da escala graduada
B	Gatilho (Para abrir gancho)	E	Terminais para medição de tensão
C	Parafuso de Ajuste	F	Botão seletor de escala

Figura 3. 4: Componentes alicate amperímetro. Fonte: (UFSC, 2008)

3.1.1.5 Dimmer

Os potenciômetros também são chamados de resistores variáveis já que possuem a capacidade de definir a quantidade de resistência a passagem de cargas elétricas. Isto é, eles são compostos por um braço de contato fixo e um móvel capazes de variar a resistência de forma a determinar a distância em que a carga tem que percorrer pelo material que possui resistência a passagem desta carga. Quando o braço móvel estiver totalmente a direita, a carga passará por outro caminho, no caso maior, ou seja, percorrer maior quantidade de material resistivo. À medida que a carga passa por esse material resistivo a energia em forma de calor é dissipada. O consumo de energia que o resistor oferece faz com que a tensão caia, e uma baixa tensão passando pela lâmpada ocasiona em uma baixa luminosidade.

Os dimmers mais modernos não desviam a carga por um material resistivo para limitá-la, eles ligam e desligam (chaveamento) do circuito a fim de reduzir a quantidade total de fluxo de energia. O Dimmer desliga o circuito cada vez que a corrente muda de direção, ou seja, cada vez que a voltagem desce à zero na escala de onda senoidal de acordo com a posição do contato ou botão. Com a tensão baixa passando pela lâmpada ocasiona um abaixa luminosidade.

3.1.1.6 Inversor de frequência CFW08

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos capazes de converter tensão alternada senoidal em tensão contínua com frequências variáveis. Eles são utilizados no controle e variação de velocidade em motores elétricos de indução trifásicos tendo aplicações nos mais diversos ramos da indústria.

De acordo com a própria fabricante, WEG, o inversor CFW08 utilizado no estudo prático, é um acionamento de velocidade variável utilizado para controle e variação de velocidade em motores elétricos de indução trifásicos.

4 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A parte experimental foi dividida em duas etapas de medições com o objetivo avaliar os efeitos dos harmônicos e comparar os valores de correntes e potências, utilizando medidores true RMS e convencionais em lâmpadas incandescentes em um inversor conectado a um motor elétrico. A descrição detalhada dos experimentos será abordada abaixo.

4.1 Descrição do experimento 1:

O primeiro experimento consiste em comparar as potências e correntes medidas pelo analisador de potência, analisador de harmônicos e medidor de energia, alicate amperímetro em um sistema composto por três lâmpadas e um dimmer (potenciômetro) que permite variar a potência e conseqüentemente, controla-se a luminosidade do ambiente.

Realizou-se um estudo prático utilizando um medidor de energia semelhante ao utilizado em residência, um medidor de potência, analisador de harmônicas, um alicate amperímetro convencional, um dimmer e 3 lâmpadas incandescentes, onde foi possível confirmar a presença de harmônicos no sistema em questão. O levantamento dos dados foi obtido variando a potência, por meio do potenciômetro. No caso do medidor de energia, anotou-se o tempo e o número de voltas e o cálculo da potência foi feito de acordo com a constante K_d (fornecida pelo fabricante), no qual esta fornece a quantidade de energia, geralmente em Wh, medida pelo instrumento em uma volta. Isto é:

$$kd = \frac{Wh}{volta} \quad 4.1$$

Para o caso, o valor de $kd = 3,6Wh/volta$.

A montagem do experimento encontra-se na Figura 4.1.

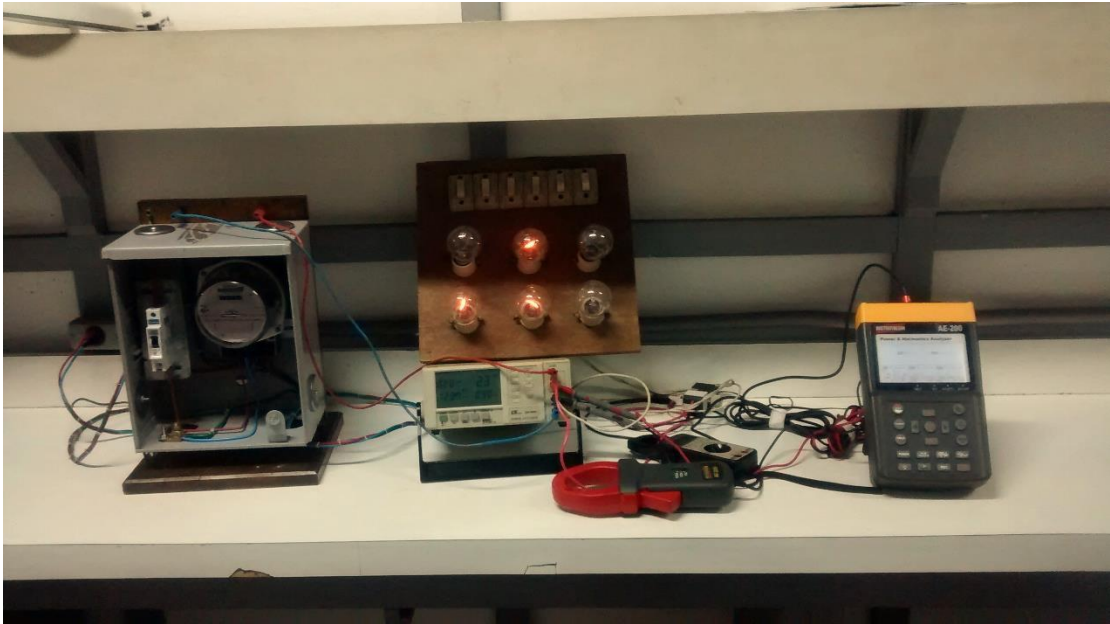


Figura 4.1: Montagem do experimento 1

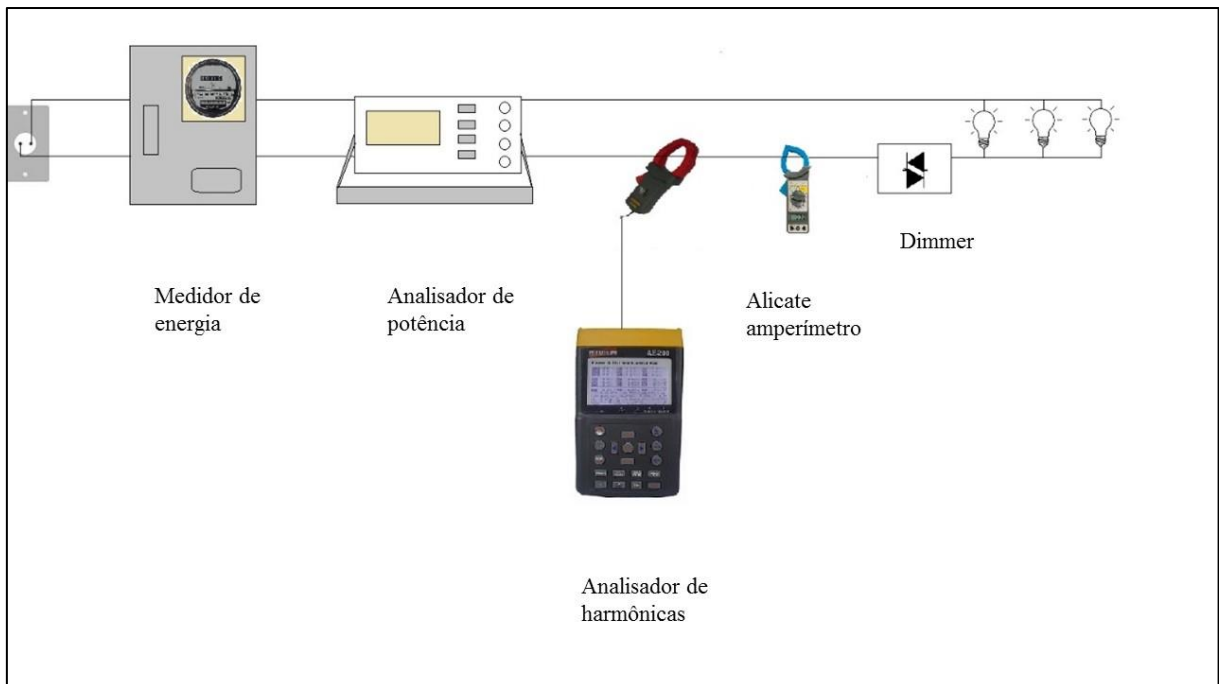


Figura 4.2: Esquema da montagem do experimento 1

Os dados obtidos do experimento estão nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Dados coletados do medidor de energia e Analisador de potência.

Medidor de energia			Analisador de potência				
Volta	tempo (s)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	cosφ	VA
0,05	31,59	20,51282051	126,7	0,76	14	0,15	96,02
0,05	27,53	23,53795859	127	1,03	34	0,26	130,8
0,1	30,38	42,6596445	126,8	1,2	52	0,34	153,5
0,1	18,8	68,93617021	123	1,4	77	0,45	172,1
0,2	26,88	96,42857143	122,9	1,57	119	0,56	193,3
0,3	28,98	134,1614907	127,3	1,7	130	0,61	216,4
0,4	32,85	157,8082192	126,9	1,81	155	0,68	229,7
0,4	27,38	189,3352812	126,6	1,98	197	0,79	252,1
0,4	21,24	244,0677966	126,9	2,12	236	0,88	269,2
0,4	19,58	264,7599591	127,6	2,26	277	0,96	288,8
0,5	23,46	276,2148338	125,1	2,28	283	1	285,2

Tabela 4.2: Dados coletados do Analisador de harmônicas e alicate amperímetro.

Analisador de harmônicas						Alicate amperímetro
Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	cosφ	VAR (VA)	PFH	Corrente (A)
126,2	0,83	13	0,12	106	0,19	0,39
126,6	1,1	32	0,23	138	0,21	0,61
126,3	1,272	50	0,3	160	0,22	0,76
122,3	1,454	73	0,41	177	0,27	0,95
122,4	1,62	101	0,51	197	0,32	0,95
126,4	1,743	125	0,56	220	0,37	1,28
126,7	1,854	151	0,64	232	0,4	1,42
125,9	2,016	192	0,76	251	0,45	1,65
126,1	2,141	231	0,85	271	0,49	1,86
126,8	2,25	271	0,95	286	0,53	2,12
124,9	2,267	280	0,98	281	0,57	2,22

Comparando-se as potências, nota-se que não houve tanta discrepância entre os valores, isto deve-se ao fato dos equipamentos já considerarem os efeitos dos harmônicos. Em contrapartida, os valores de corrente, apresentaram grande diferença de até 42% entre o valor de corrente medido pelo alicate amperímetro e o analisador de harmônicas, como pode ser visto claramente pelas Figuras 4.3 e 4.4

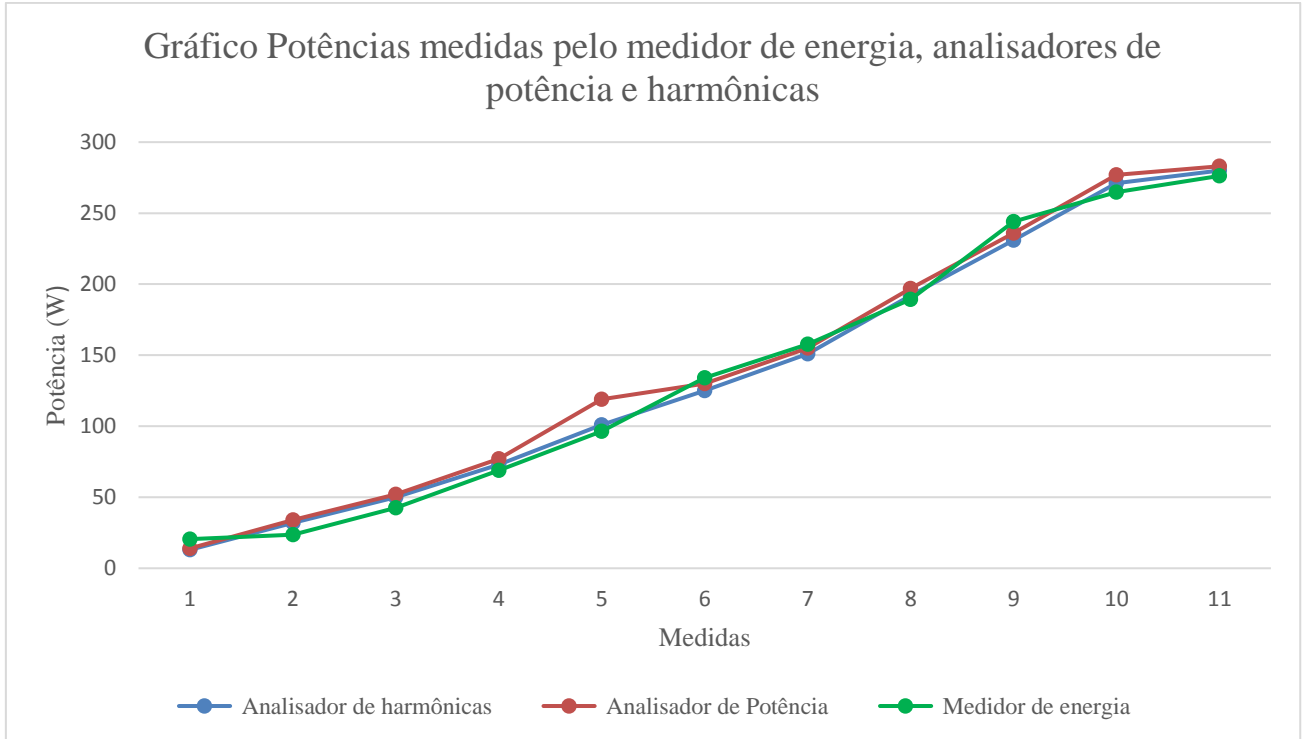


Figura 4.3: Esboço das curvas de potência obtidas pelo medidor de energia, analisador de harmônicas e analisador de potência.

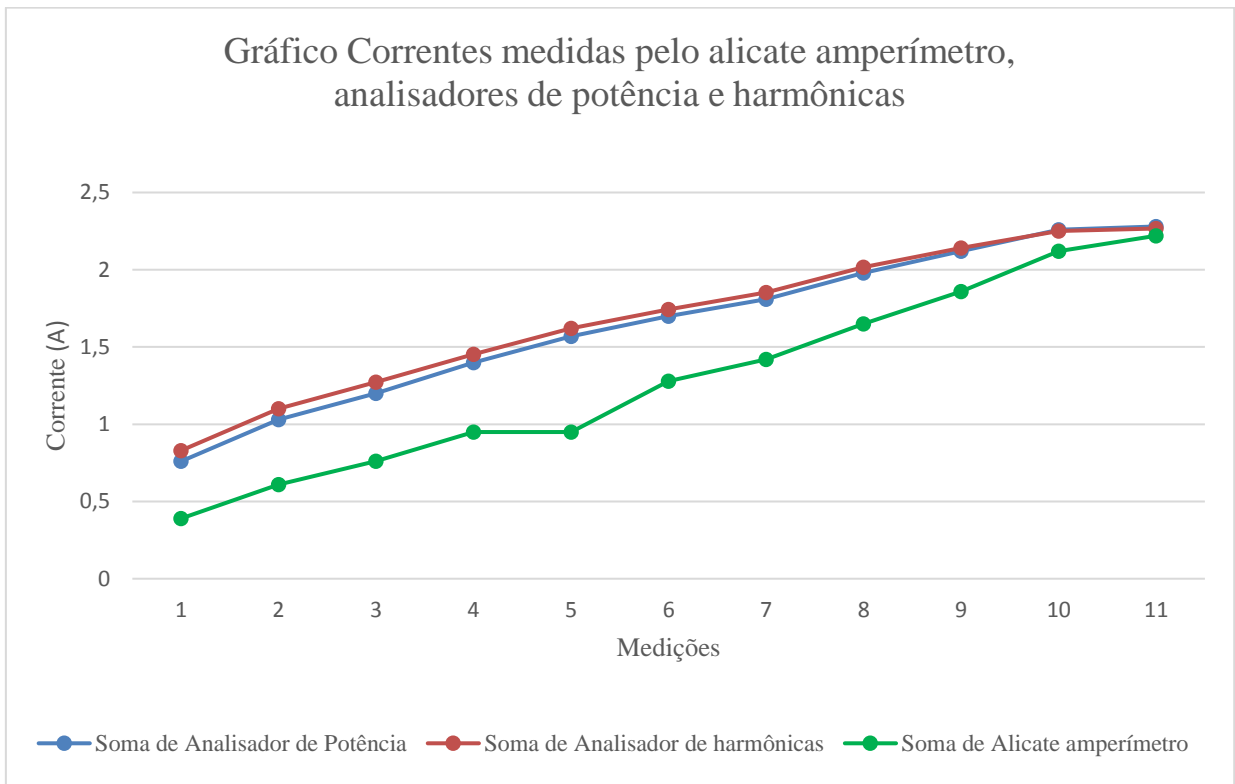


Figura 4.4: Esboço das curvas de corrente obtidas pelo alicate amperímetro, analisador de harmônicas e analisador de potência.

O Gráfico de erro foi feito adotando como referência as correntes medidas pelo analisador de harmônicas e o valor medido os dados obtidos pelo alicate amperímetro. O cálculo de erro é dado pelo valor medido subtraindo o valor de referência. A discrepância encontrada nos resultados deve-se ao fato do alicate amperímetro utiliza-se o método de medição por pico, isto é, o sinal lido é dividido por raiz quadrada de dois (1,41). Uma vez que a forma de onda não é mais uma senoide perfeita, o resultado medido tende a estar comprometido.

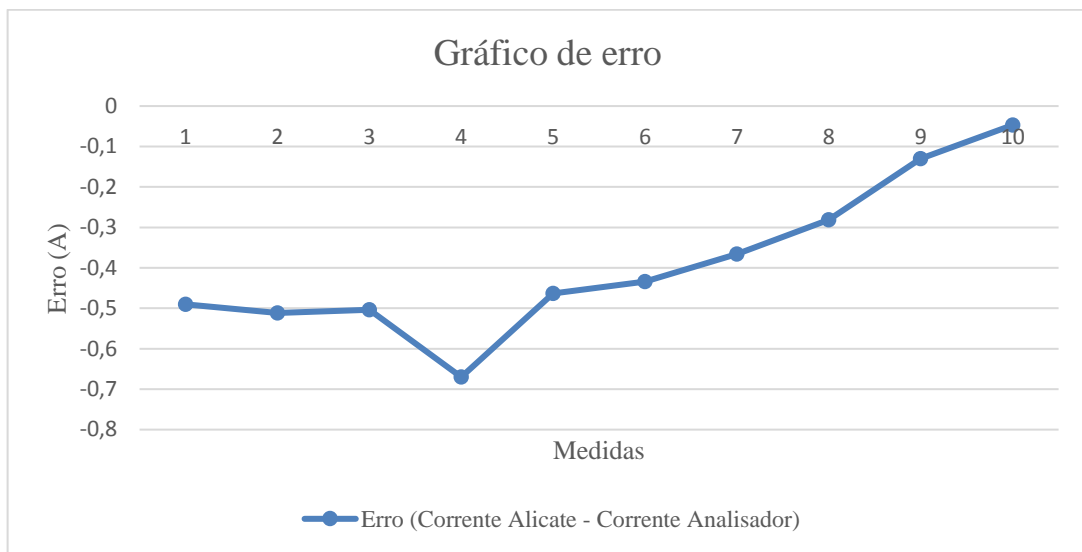


Figura 4.5: Esboço da curva de erro.

A distorção harmônica foi possível ser verificada utilizando-se o analisador de harmônicas. Pela Figura 4.6, nota-se a forma de onda obtida quando não se tem nenhuma lâmpada ligada ainda. Neste caso, a senoide encontra-se sem nenhuma distorção.



Figura 4.6: Forma de onda sem distorção harmônica, senoide perfeita.

Em contrapartida, na Figura 4.7, observa-se a forma de onda obtida pelo analisador ao ligar as lâmpadas. Repara-se que existe uma certa distorção na forma da onda causada por harmônicos. A senoide já não é mais perfeita. Além disso, é possível analisar a taxa de distorção harmônica (Thd) equivalente a 13,3%.

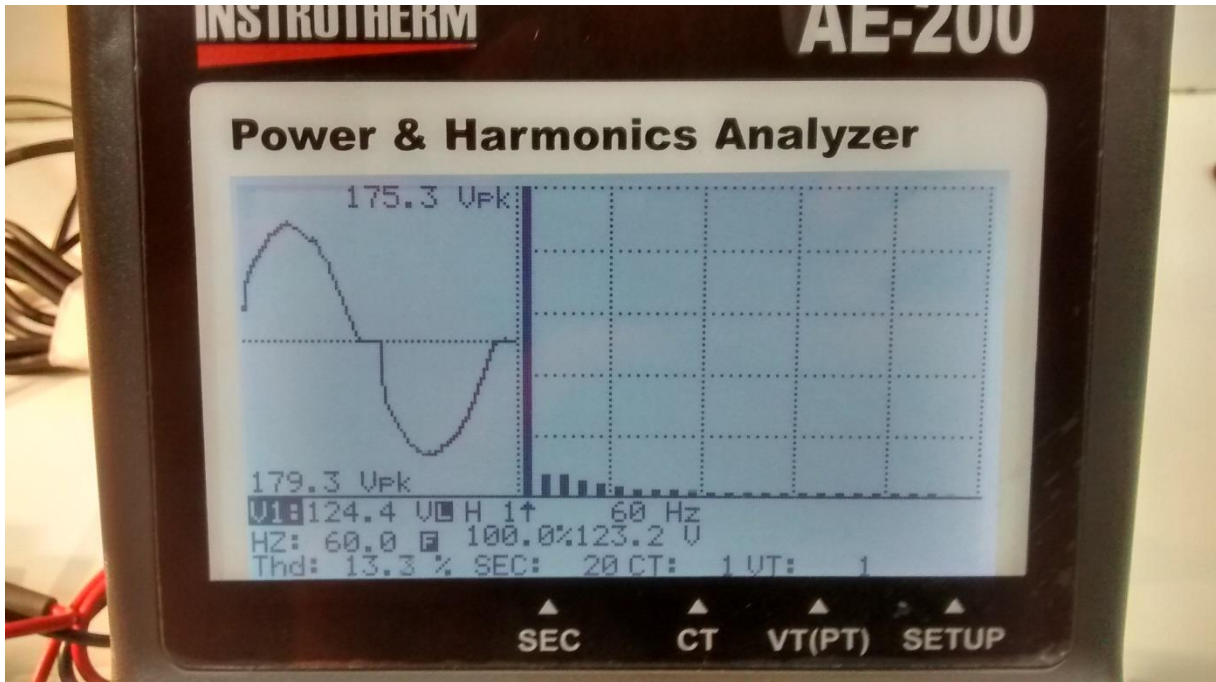


Figura 4.7: Forma de onda com distorção harmônica.

4.2 Descrição do experimento 2:

O segundo experimento consiste em comparar as potências e correntes medidas pelo analisador de harmônicos e alicate amperímetro, juntamente com três lâmpadas, um motor elétrico de indução e um inversor de frequência CFW08 da marca WEG. O motor aciona um gerador de corrente contínua de excitação shunt que alimenta um banco de lâmpadas incandescentes com carga ajustável. Ao se variar a carga (lâmpadas) no gerador, este irá exigir um maior conjugado do motor que irá aumentar o consumo de corrente fornecida pelo inversor de frequência.

O motor foi ensaiado nas seguintes situações:

Ensaio 1: Motor à vazio;

Ensaio 2: Motor acoplado ao gerador alimentando unicamente ao próprio campo;

Ensaio 3: Motor acoplado ao gerador alimentando três lâmpadas;

Ensaio 4: Motor acoplado ao gerador alimentando seis lâmpadas;

Os dados resultantes destes ensaios podem ser analisados na Tabela 4.3



Figura 4.8: Montagem do experimento 2.

Tabela 4.3: Correntes coletadas do analisador de harmônicas e alicate amperímetro

	Velocidade	Potência	Analisador de harmônicas			Alicate amperímetro		
			I1	I2	I3	R	S	T
Ensaio à vazio	20Hz	74W	0,309A	0,442A	0,595A	0,25A	0,11A	0,22A
	40Hz	80W	0,296A	0,552A	0,598A	0,24A	0,11A	0,28A
	60Hz	83W	0,345A	0,549A	0,624A	0,25A	0,17A	0,32A
Gerador alimentando somente o próprio campo	20Hz	97W	0,353A	0,617A	0,753A	0,30A	0,13A	0,36A
	40Hz	138W	0,496A	0,809A	0,926A	0,42A	0,23A	0,50A
	60Hz	262W	0,910A	1,439A	1,535A	0,81A	0,51A	0,86A
Três lâmpadas	40Hz	139W	0,679A	1,104A	1,136A	0,59A	0,36A	0,59A
	60Hz	395W	1,489A	2,033A	2,066A	1,22A	0,84A	1,19A
Seis lâmpadas	40Hz	136W	0,475A	0,889A	0,950A	0,46A	0,18A	0,46A
	60Hz	460W	1,679A	2,340A	2,339A	1,4A	0,99A	1,38A

Diante dos dados, é possível analisar um desbalanceamento das fases, isto pode ser causado devido ao isolamento deteriorado nos enrolamentos do motor.

Para fins de comparação, foi feita uma média das correntes das três fases medidas pelo analisador de harmônicas e pelo alicate amperímetro. O gráfico abaixo representa a comparação entre as médias das correntes.

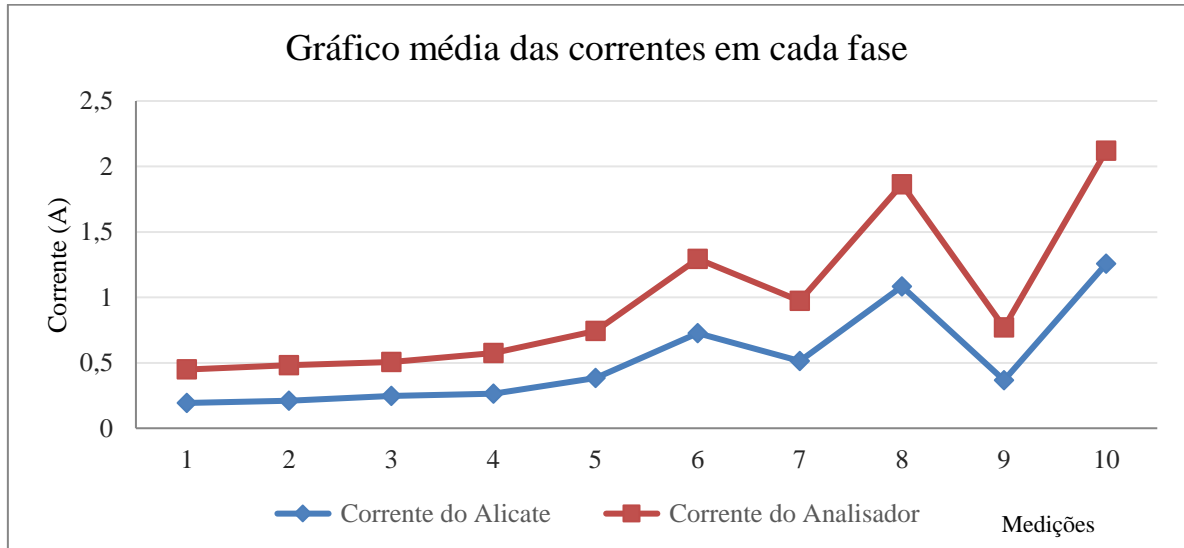


Figura 4.9: Esboço das curvas das médias de correntes obtidas pelo alicate amperímetro e analisador de harmônicas.

O Gráfico de erro (Figura 4.10) foi feito adotando como valor medido a média das correntes coletadas pelo alicate amperímetro subtraindo do valor de referência que é a média das correntes medidas pelo analisador de harmônicas. Como pode ser notado, a corrente medida pelo alicate amperímetro é sempre inferior ao valor de referência (analisador). Este erro tende a aumentar com o aumento da corrente medida. Este resultado mostra uma concordância com a Tabela 2.5.

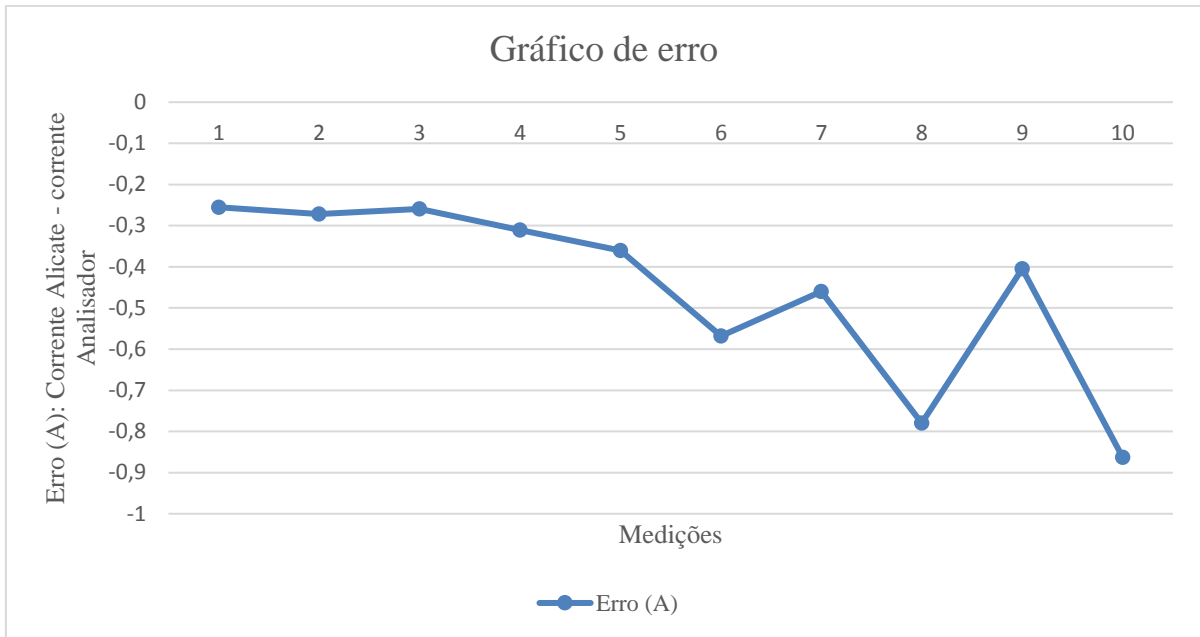


Figura 4.10: Esboço da curva de erro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo o estudo de cargas não lineares e harmônicas e suas influências em equipamentos de medições de grandezas elétricas. Como maneira de certificar a revisão bibliográfica, foram realizados experimentos práticos utilizando os aparelhos de medição convencionais e True RMS.

Baseando-se nos resultados analisados, é possível confirmar que a presença de harmônicos na rede elétrica é capaz de gerar grandes distorções na forma de onda e comprometer os resultados dos equipamentos convencionais.

A busca por uma melhor qualidade de energia tem aumentado e existem diversos estudos nessas áreas. Como sugestões para trabalhos futuros seria elaboração de novos experimentos e a busca de técnicas que amenizem esses distúrbios no sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRONGAR, F. C e MEDINA, R. L. R. **Apostila de Medidas Elétricas** – CEFET-RS. Disponível em: <
ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Eletrotecnica/Cassoli/PROMINP%20ELETRO/Eltricista%20For%20E7a%20e%20controle/Eltricista%20For%20E7a%20e%20Controle_Medidas%20El%20E9tricas.pdf> Acesso: 01.out.2016

DIAS, G. A. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais**. Coleção Engenharia 4, Porto Alegre: Editora Edipucrs, 1998.

INSTRUTHERM. **Analizador de energia digital portátil modelo AE-200**. Manual de instruções. São Paulo, 2009.

ISONI, M. **A efficientização energética e seus possíveis efeitos sobre equipamentos e instalações**. Revista Eletricidade Moderna, nº 363, Editora Aranda, São Paulo-SP, Junho de 2004.

KASSICK, E. V. **Harmônicas e sistemas industriais de baixa tensão**, Florianópolis 2000.

LOPEZ, R. A. **Qualidade na energia elétrica: Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. 2. Ed. São Paulo: ARTLIBER, 2013.

“Manual de orientação aos consumidores sobre a nova legislação para o faturamento de energia reativa excedente”. Secretaria executiva do Comitê de Distribuição de Energia Elétrica - CODI, Rio de Janeiro, 1995.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. Procobre. 1. Ed. São Paulo, Novembro de 2001.

NASCIMENTO, C. F. **Determinação do Conteúdo Harmônico de Corrente Baseada em Redes Neurais Artificiais para Cargas Não-Lineares Monofásicas**. São Carlos, 2007 (Defendida em 10/07/2007). 202p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

POMILIO, J.A. **Hamônicos e fator de potência: um curso de extensão**. Publicação FEEC, Rio de Janeiro, 1997.

ROCHA, C. O. A., MELLO, C.A.F., GOMES, H. N. **Harmônicos causados pela operação simultânea de televisores.** Ver. Eletricidade Moderna, Abril de 1997.

SANTOS, et al. **Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações.** 3ª ed. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2006.

WEG. **Manual do usuário.** Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-09-manual-do-usuario-0899.5298-4.4x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso: 20.set.2016.

WEST, K. **True RMS – A única medição verdadeira.** 2002. Disponível em: <http://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2009/06/322-true-rms-medicao.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2014, 15:30.