

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG

LUIZA FERREIRA DA CUNHA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LEITURAS DE VALORES
RMS DE DIFERENTES MEDIDORES, DIANTES DE SINAIS
SENOIDAIS E DISTORCIDOS**

Goiânia

2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome completo do(s) autor(es): Luiza Ferreira da Cunha

Título do trabalho: Análise comparativa entre as leituras de valores RMS de diferentes medidores, diante de sinais senoidais e distorcidos

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

Luiza Ferreira da Cunha

(Nome completo do autor)²

Ciente e de acordo:

Fernando Nunes Belchior

(Nome completo do orientador)²

Data: 18 / 07 / 2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Versão abril de 2018

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

LUIZA FERREIRA DA CUNHA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LEITURAS DE VALORES
RMS DE DIFERENTES MEDIDORES, DIANTE DE SINAIS
SENOIDAIIS E DISTORCIDOS**

Trabalho submetido à Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Sob orientação do Professor Dr. Fernando Nunes Belchior e co-orientação do Professor Dr. Antônio Melo de Oliveira.

Goiânia

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Cunha, Luiza Ferreira da
Análise Comparativa Entre as Leituras de Valores RMS de Diferentes Medidores, Diante de Sinais Senoidais e Distorcidos [manuscrito] / Luiza Ferreira da Cunha. - 2019.
47 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior; co-orientador Dr. Antônio Melo de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2019.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Medidores true rms. 2. Qualidade de energia. I. Belchior, Fernando Nunes, orient. II. Título.

CDU 621.3

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

CURSO

Eng. Elétrica
 Eng. Mecânica
 Eng. de Computação
 Projeto Final 1
 Projeto Final II

AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Título do projeto: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LEITURAS DE VALORES RMS DE DIFERENTES MEDIDORES, DIANTE DE SINAIS SENOIDAIS E DISTORCIDOS

BANCA AVALIADORA

Membro 1: FERNANDO NUNES BELCHIOR
 Membro 2: ANTÔNIO MELO DE OLIVEIRA
 Membro 3: JOSÉ WILSON LIMA NERYS

ESTUDANTES

Matrícula	Nome
201108038	LUIZA FERREIRA DA CUNHA

NOTAS

Matrícula	Membro 1				Membro 2				Membro 3				Média
	NPT	NTE	NAA	NF	NPT	NTE	NAA	NF	NPT	NTE	NAA	NF	
201108038	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

NPT – Nota plano de trabalho; NTE – Nota do trabalho escrito; NAA – Nota de apresentação e arguição
 Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$
 Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

Goiânia, 09 de JULHO de 2019.

Fernando Nunes Belchior
 Membro 1

Antônio Melo de Oliveira
 Membro 2

José Wilson Lima Nerys
 Membro 3

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS LEITURAS DE VALORES
RMS DE DIFERENTES MEDIDORES, DIANTE DE SINAIS
SENOIDAIIS E DISTORCIDOS**

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
GOIÁS, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Examinado por:

Prof. Dr. Fernando Nunes

Belchior (Orientador)

Prof. Dr. Antônio Melo de

Oliveira (Co-orientador)

Goiânia – GO,

Brasil 2019

Dedico a Deus por me sustentar todos os dias, e à minha família pelo apoio e cuidado, essenciais para que meu objetivo de conclusão do curso fosse alcançado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que me concedeu a oportunidade de estar onde estou, com vida e saúde, e me mantém firme, sendo meu sustento diário.

Aos meus pais, por serem meu apoio em qualquer circunstância, me motivando e exortando quando preciso. Aos meus irmãos Julia, pelo companheirismo e palavras de motivação, e Henrique, que mesmo não estando presente se faz presente todos os dias, na recordação da amizade e exemplo de vida, por ele meu esforço em continuar sendo seu motivo de admiração.

Ao meu namorado e companheiro Abner e sua família que me acolheu, e se tornou minha também, por todo amor, carinho e cuidado, que foram essenciais no final da minha jornada acadêmica. Por me incentivarem e acreditarem na minha capacidade.

Ao meu colega Wesley, que esteve ao meu lado, não medindo esforços em me ajudar quando precisei.

Aos servidores, técnicos e professores que se dedicam e acreditam em cada estudante. Em especial ao Técnico João, e toda equipe que trabalha na Escola de Engenharia, responsáveis pelas chaves e dependências da escola, meu carinho e gratidão a vocês por me ajudarem quando precisei.

Agradeço também, ao meu orientador, professor Fernando Nunes Belchior, e coorientador, professor Antônio Melo de Oliveira, que se dispuseram a ajudar, tiveram paciência, acreditaram e me deram base para a realização deste trabalho. Também ao professor José Wilson Nerys, por disponibilizar o uso do laboratório ao qual é responsável.

Por fim, agradeço a todos os meus familiares, colegas e amigos que me ajudaram, de forma direta ou indireta, neste caminho.

RESUMO

O sistema elétrico de potência (SEP) é dividido em geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Dentre as diversas áreas de estudo do mesmo, a medição se torna extremamente relevante, em virtude da tomada de decisão como função de valores obtidos através de medidores comerciais. Este aspecto é mais evidenciado nas instalações elétricas atuais com o fato da utilização, cada vez maior, de equipamentos eletrônicos, devido ao fato de sinais de tensão e corrente monitorados não serem totalmente senoidais, o que requer uma análise mais minuciosa sobre o valor que os medidores comerciais irão indicar. Nesta direção, este trabalho de conclusão de curso busca fazer uma comparação de resultados oriundos de medidores comerciais, tais como multímetros e osciloscópios. Para tanto, sinais elétricos senoidais e não senoidais serão gerados, através de um gerador de função, em bancada de laboratório. Na sequência, os medidores irão indicar os valores medidos e a comparação entre os resultados será feita.

Palavras-chave: Medidores *true RMS*. Qualidade de Energia.

ABSTRACT

The electric power system (SEP) is divided into generation, transmission and distribution of electric energy. Among the several areas of study of the same, the measurement becomes extremely relevant, by virtue of the decision making as a function of values obtained through commercial meters. This aspect is more evident in the current electrical installations due to the increasing use of electronic equipment due to the fact that monitored voltage and current signals are not totally sinusoidal, which requires a more detailed analysis of the value that the meters will indicate. In this direction, this work of course completion seeks to make a comparison of results from commercial meters, such as multimeters and oscilloscopes. For this purpose, sinusoidal and non-sinusoidal electrical signals will be generated, through a function generator, in a laboratory bench. The meters will then indicate the measured values and the comparison between the results will be made.

Keywords: True rms meters. Power Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Valor Médio.....	4
Figura 2 - Gerador de Função Arbitrária Minipa MFG-4205C	9
Figura 3 - Forma de onda de um sinal senoidal e retificado.....	10
Figura 4 - Sinal senoidal amostrado.....	11
Figura 5 - Multímetro Digital True RMS Profissional Amprobe 34XR-A	12
Figura 6 - Multímetro Digital True RMS VA55 V&A Instrument.....	15
Figura 7 - Diagrama Esquemático da Interface do Display do Minipa 2061	16
Figura 8 - Osciloscópio Digital Minipa MO 2061	18
Figura 9 - Osciloscópio Minipa com Forma de Onda Senoidal e Parâmetros Medidos	18
Figura 10- Formas de onda da corrente distorcida	19
Figura 11 - Forma de onda quadrada	22
Figura 12 - Diagrama Esquemático de um Conversor Multinível	25
Figura 13 - Forma de Onda Característica de um Conversor Multinível com Sete Níveis	26
Figura 14 - Circuito Próprio de um Dimmer	28
Figura 15 - Formas de Onda do Dimmer com Disparo em 90° e 270°.....	29
Figura 16 - Formas de Onda do Dimmer com Disparo em 45° e 220°.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas do gerador de funções	8
Tabela 2 - Especificações Técnicas do Multímetro Digital Amprobe 34XR-A	12
Tabela 3 - Especificações Técnicas do Multímetro Digital VA55 V&A Instrument	15
Tabela 4 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Osciloscópio	34
Tabela 5 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos Multímetro da Marca Lutron	34
Tabela 6 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro da Marca Amprobe	35
Tabela 7 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro da Marca V&A ..	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente alternada
AV	Average
DC	Corrente contínua
I	Corrente
P	Potência
RMS	Roote Mean Square
V	Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Estrutura do Trabalho	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1	Valor Médio.....	3
2.2	Valor Eficaz.....	4
2.3	Componentes AC e DC	6
2.4	Valor <i>True RMS</i>	6
2.6	Fator de Forma.....	6
2.7	Fator de Ondulação	7
2.8	Fator de Crista.....	7
3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	7
3.1	Gerador de Funções	7
3.2	Medidor <i>Average Sensing</i> ou <i>Average Responding</i>	9
3.3	Medidor <i>True RMS</i>	11
3.4	Osciloscópio	16
4	FORMAS DE ONDAS ESTUDADAS	19
4.1	Senoidal	20
4.2	Quadrada	21
4.3	Forma de onda de um conversor multinível	24
4.4	Forma de onda de um retificador monofásico de onda completa	27
5	ANÁLISE DE MEDIÇÕES	32
	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

A qualidade da energia elétrica é uma característica de um sistema elétrico que se apresenta isento ou com número restrito de distúrbios manifestados através de desvios de tensão, em sua forma de onda, amplitude, frequência ou fase angular, que podem ocasionar falha ou operação inadequada de um equipamento do consumidor [1].

Ao longo dos anos, com os avanços industriais, o crescente aumento de dispositivos não lineares conectados ao Sistema Elétrico de Potência vem gerando estes distúrbios não desejáveis que afetam negativamente os consumidores em geral e então o termo “Qualidade de Energia” vem ganhando espaço entre concessionárias e consumidores.

Diante disso grupos técnicos e especialistas, coordenados pela ANEEL e ONS, tem continuamente trabalhado para se chegar a um conjunto de procedimentos que possa regulamentar e criar parâmetros que viabilizem contratos de conexão ao sistema elétrico seguros e de qualidade, reduzindo os danos que possam ser causados aos demais consumidores conectados a este sistema. Dentro dessas regulamentações pode-se destacar questões relacionadas a qualidade do produto, qualidade do serviço, qualidade do atendimento, e ainda sobre como e quais aparelhos podem ser utilizados como parâmetros para que seja feito este tipo de análise.

Para medir uma tensão ou a corrente em instalações que alimentem cargas que possam deformar o sinal de saída (cargas não lineares) devem ser utilizados instrumentos com características especiais capazes de trabalhar também com correntes não senoidais, [2] estes instrumentos são caracterizados como medidores *true rms*, sendo capazes de fornecer o valor mais próximo do real para qualquer tipo de onda que se deseja medir. Contudo há discussões sobre a confiabilidade de valores fornecidos em medições diante de sinais distorcidos, e é este tópico que o presente artigo vem abordar, trazendo uma análise simplória, porém com conteúdo comparativo de diferentes medidores relacionando-os aos valores calculados dos sinais de saída para diferentes formas de onda, afim de trazer um parâmetro útil para o profissional da área na escolha do equipamento ideal.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em quatro principais capítulos. O primeiro deles é o de fundamentação teórica, onde o leitor terá a oportunidade de rever alguns parâmetros matemáticos que serão necessários para entendimento das análises. Seguindo, o capítulo de equipamentos utilizados, onde será descrito todos os equipamentos utilizados para a realização do trabalho, sendo eles, osciloscópio, multímetros e gerador de funções.

O terceiro capítulo explana sobre as análises das medições realizadas, fornecendo ao leitor tabelas comparativas e análise textual.

E por fim o capítulo de conclusão, no qual os objetivos do trabalho são explicitados e finalizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A qualidade do produto “energia elétrica” pode ser avaliada em sete parâmetros conforme estabelecido pelo Módulo 8 do PRODIST: tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variação de tensão de curta duração.

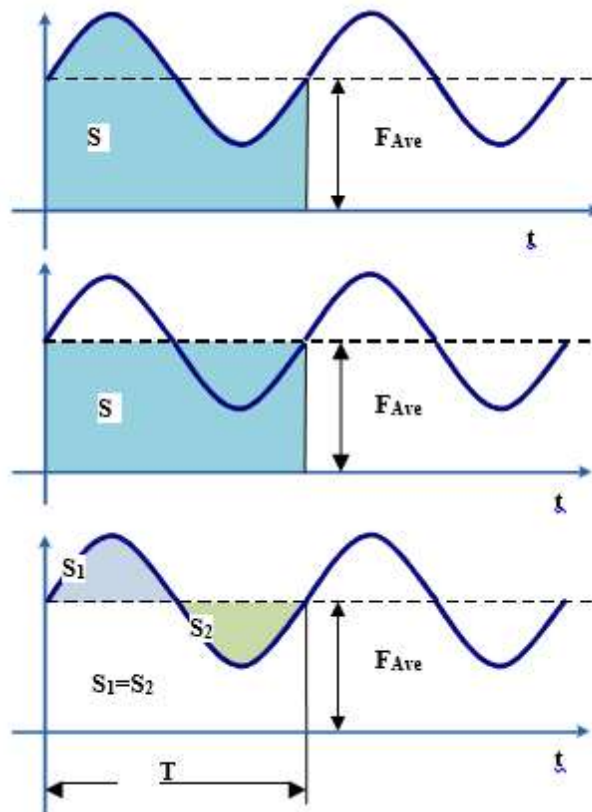
Afim de garantir a confiabilidade do estudo, ainda neste módulo, no capítulo nove, é estabelecido parâmetros para instrumentação e metodologia da medição dos sinais necessários para análise de cada fator influenciador. Neste capítulo a norma prevê o uso de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital, devendo atender aos seguintes requisitos mínimos: protocolos estabelecidos pelas normas vigentes da IEC 61000, série 4 ou normas brasileiras, e métodos de medição classe A ou S, conforme a norma IEC 61000-4-30. Sendo que para fins judiciais deve-se usar equipamentos do tipo classe A. [3]

Nesse sentido, o presente capítulo trará todo o embasamento teórico, iniciando nos conceitos matemáticos e físicos de valores RMS e Médio, até o funcionamento desses medidores de QEE.

2.1 Valor Médio

O Valor Médio (Average – A_v) de uma onda periódica de tensão, corrente, potência ou qualquer outra grandeza física, é a componente contínua dessa onda. Em termos gráficos, como pode ser observado na figura 1, é a área sob a curva, em um intervalo de tempo T , dividido pelo período dessa onda. [4]

Figura 1 – Valor Médio



Fonte: Nakashima, Kazuo (2013)

Em termos de equação matemática, é definido por:

$$F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t). dt \quad (1)$$

2.2 Valor Eficaz

O valor eficaz ou RMS (Root Mean Square), representa o valor de uma tensão, ou corrente, contínua, que produz a mesma dissipação de potência que o sinal periódico por ela representado. Esta representação pode ser relacionada com o calor dissipado em uma resistência, onde sua representação em DC, deve ser compatível em termos de potência.

Nesse sentido, igualando-se a potência dissipada pela passagem de uma corrente contínua em um resistor, à passagem de uma corrente alternada no mesmo resistor, é obtida a fórmula para o valor RMS dessa corrente. [5]

$$P_{CC} = P_{CA} \quad (2)$$

$$I_{CC}^2 \cdot R = I_{CA}^2 \cdot R \quad (3)$$

$$I_{CC}^2 \cdot R = (I_{av} \cdot \text{sen}(wt))^2 \cdot R \quad (4)$$

Sendo,

$$\text{sen}^2(wt) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2wt)) \quad (5)$$

Tem-se que:

$$I_{CC}^2 \cdot R = \frac{I_{av}^2 \cdot R}{2} \cdot (1 - \cos(2wt)) \quad (6)$$

Sabe-se que o valor médio de um cosseno é zero, portanto, para um sinal senoidal, o valor RMS do mesmo é dado por:

$$I_{CC} = I_{ef} = \frac{I_{av}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

De maneira mais genérica, para qualquer tipo de onda, o valor eficaz pode ser calculado através da fórmula do valor médio pela integral, portanto, tem-se que a potência média dissipada em um resistor é dada por:

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (8)$$

E que a potência instantânea média dissipada no mesmo resistor é dada por:

$$p(t) = R \cdot i^2(t) \quad (9)$$

Igualando-se as duas equações acima, e substituindo p(t), na integral:

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (10)$$

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot i^2(t) \cdot dt \quad (11)$$

$$P_{av} = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt \quad (12)$$

$$R \cdot i^2(t) = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt \quad (13)$$

Tem-se que o valor eficaz para corrente e tensão no resistor exemplificado é dada por:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t). dt} \quad (14)$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^T v^2(t). dt} \quad (15)$$

2.3 Componentes AC e DC

A componente AC de um sinal, é dada pelo seu valor eficaz, e pode ser calculado pelo método das áreas, como mostrado da seção 2.1, ao passo que a componente DC é dada pelo valor médio do mesmo, e consiste no offset, ou deslocamento da onda em relação ao eixo vertical.

2.4 Valor *True RMS*

O valor RMS verdadeiro, *True rms*, ou valor eficaz total, é dado por:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{AC}^2 + V_{DC}^2} \quad (16)$$

Em que V_{AC} é a componente da tensão alternada, e V_{DC} a componente da tensão contínua. Podendo ser aplicada a um sinal de corrente da mesma forma, o cálculo deste valor faz-se necessário em casos em que serão medidos valores de tensão ou corrente não senoidais. Tais formas de onda são distorcidas por equipamentos que estão conectados ao próprio sistema, como os computadores, que estão presentes em grande escala no dia-a-dia da população, principalmente devido ao crescente acesso financeiro a este tipo de aparelho. Além dos computadores podemos destacar os elevadores, retificadores, forno de arco, e outros.

2.6 Fator de Forma

Este fator está relacionado com o aproveitamento de um componente eletrônico [6], de tal

forma que, dada a equação:

$$K_f = \frac{I_{ef}}{I_{av}} \quad (17)$$

Para seu valor mínimo, no qual o fator de forma é igual à unidade, para uma corrente contínua e constante, a potência útil do equipamento (trabalho realizado pelo mesmo) será dada para o menor valor de corrente possível.

Este parâmetro tem sua aplicação relacionada a conversores AC/DC, e medidores *Average Sensing*, que será abordado no item 3.2 do trabalho.

2.7 Fator de Ondulação

O fator de ondulação, ou *Ripple*, é dado pela relação entre a componente alternada e a componente contínua do sinal.

$$Ripple = \frac{V_{ac}}{V_{av}} \quad (18)$$

E indica a presença de ondulação em uma fonte de corrente contínua [7].

2.8 Fator de Crista

Este fator indica o grau de distorção de uma onda [8], sendo uma importante especificação para medidores *True RMS*. É dado pela fórmula:

$$K_p = \frac{I_{pico}}{I_{ef}} \quad (19)$$

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1 Gerador de Funções

O gerador de sinais ou gerador de funções é um equipamento que gera voltagens variáveis como funções no tempo, que são periódicas, com frequência e amplitude definidos pelo operador.

O gerador de funções utilizado nas medições do presente trabalho foi o Gerador de Função

Arbitrária MFG-4205C da marca Minipa, como mostra a figura 2 e suas especificações são explicitadas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Especificações técnicas do gerador de funções

Especificações Técnicas	
Display:	4,3" Colorido
5 Formas de onda	Onda senoidal, onda quadrada, onda triangular, onda Padrão: de pulso, onda de rampa, ruído, DC, onda arbitrária
Taxa de Amostragem:	125MSa/s
Frequência de Saída:	5MHz
Frequência:	Senoidal: 1 μ Hz ~ 5MHz Quadrada: 1 μ Hz ~ 5MHz Pulso: 1 μ Hz ~ 5MHz Rampa: 1 μ Hz ~ 400kHz Arbitrária: 1 μ Hz ~ 1MHz
Forma de onda	Automática
Arbitrária:	
Offset Dc:	± 5 v (50 Ω), ± 10 V (Alta resistência) 14 bits
Entrada:	Compatibilidade TTL
Amplitude de Saída:	1mVpp ~ 10Vpp (50 Ω , ≤ 10 MHz) 2mVpp ~ 20Vpp (50 Ω , > 10 MHz)
Categoria de Segurança:	CAT II 300V
Alimentação:	100~240 VAC, 45~440Hz
Dimensões:	165x320x110 mm / peso Líquido 3,10kg - Bruto 4,10kg

Fonte: Site Minipa, 2019.

Figura 2 - Gerador de Função Arbitrária Minipa MFG-4205C



Fonte: Site Baú da Eletrônica, 2019

3.2 Medidor *Average Sensing* ou *Average Responding*

Medidores do tipo *Average Sensing*, são caracterizados por medirem corretamente o valor médio de qualquer forma de onda na escala DC, contudo, na escala AC, o valor eficaz é medido utilizando-se a fórmula:

$$V_{ef} = \frac{V_{av}}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

Que é aplicada de maneira correta apenas para sinais puramente senoidais, que são extremamente raros na prática.

Para medir o valor eficaz de um sinal senoidal alternado, esse tipo de medidor utiliza-se de alguns artifícios eletrônicos a fim de obter uma resposta mais aproximada do que seria o valor *rms* real, e é feito da seguinte forma: primeiro este sinal lido é retificado em onda completa, e considerando-se uma retificação eletrônica ideal, sem a queda de tensão de um diodo, o valor médio dessa onda retificada é dado por:

$$|v(t)|_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (21)$$

$$|v(t)|_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \text{sen}(wt) dwt \quad (22)$$

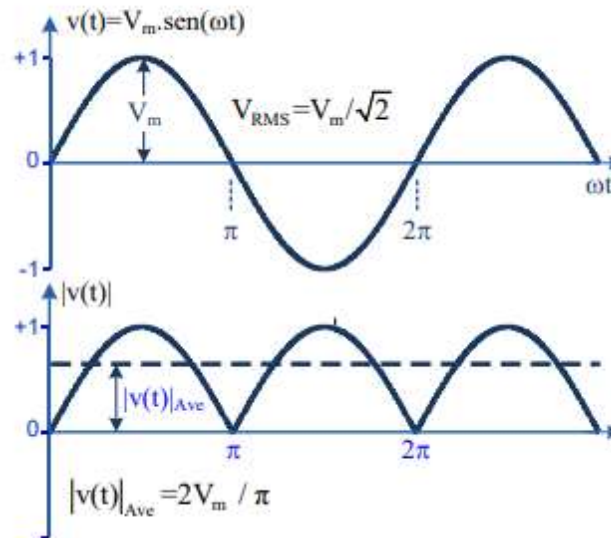
$$|v(t)|_{av} = \frac{V_m}{\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}(\omega t) d\omega t \quad (23)$$

$$|v(t)|_{av} = \frac{V_m}{\pi} (-\cos(\pi) + \cos(0)) \quad (24)$$

$$|v(t)|_{av} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (25)$$

A figura 3 mostra a forma de onda de um sinal senoidal e o mesmo retificado em onda completa.

Figura 3 - Forma de onda de um sinal senoidal e retificado



Fonte: Valor médio e eficaz. Nakashima, Kazuo.

Esse sinal retificado é então filtrado e amplificado por um fator de ganho de 1,1107 e convertido para digital. A equação a seguir mostra a relação entre o valor eficaz do sinal senoidal e o valor médio do mesmo retificado em onda completa, que é a relação do ganho multiplicado no final do processo de medição [9].

$$\frac{V_{RMS}}{|v(t)|_{av}} = \frac{V_m / \sqrt{2}}{2V_m / \pi} \quad (26)$$

$$\frac{V_{RMS}}{|v(t)|_{av}} = 1,1107 \quad (27)$$

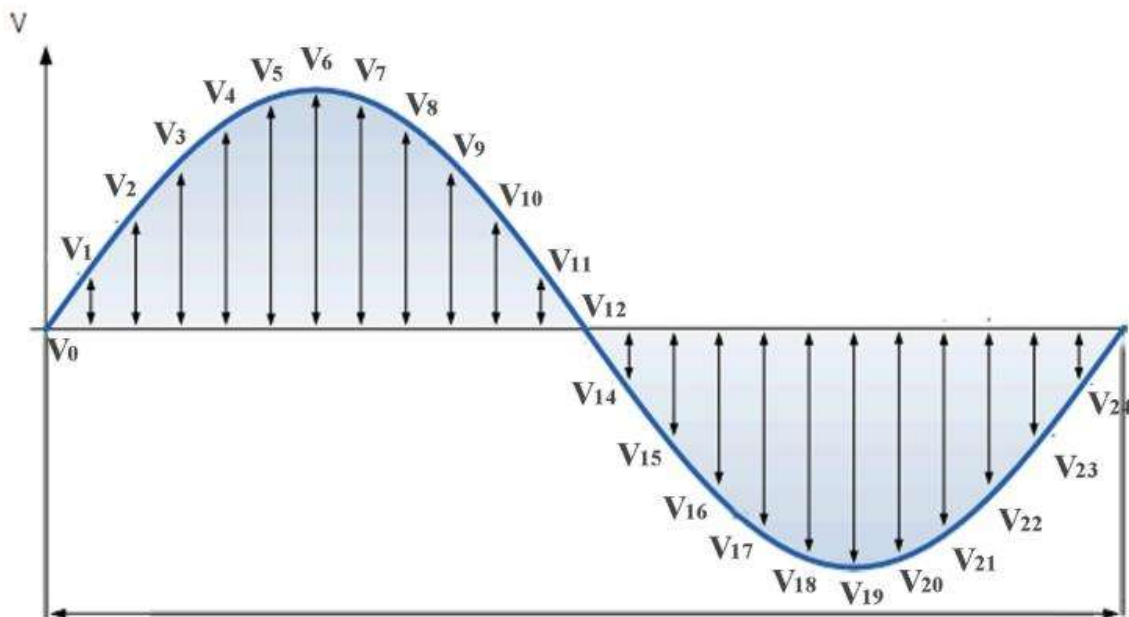
Isso acontece devido ao acoplamento AC, ou capacitivo, adotado na maioria dos

multímetros convencionais, que consiste na utilização de um capacitor para filtrar a componente DC de um sinal que possui componente contínua e alternada, com o objetivo de aumentar a resolução do sinal medido. Contudo na escala de sinal alternado, o valor entregue como sendo o rms, é apenas o valor da componente AC do sinal não senoidal, fazendo com que para os casos em que há presença de uma componente DC no sinal, a mesma seja desprezada.

3.3 Medidor *True RMS*

O medidor do tipo *true rms* utiliza-se de um conversor analógico digital para amostragem da onda que se deseja medir, como pode ser observado na figura 4.

Figura 4 - Sinal senoidal amostrado



Fonte: Valor médio e eficaz. Nakashima, Kazuo.

Após ter o espectro da onda convertido em valores discretos, o medidor realiza o cálculo do valor *rms* utilizando a seguinte fórmula:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}{n}} \quad (28)$$

Sendo “n” o número de amostras guardadas na memória do equipamento. Em termos mais simples, o medidor realizará os cálculos para o valor médio da função utilizado valores discretos medidos em um período previamente projetado pelo fabricante do aparelho [10].

Os medidores utilizados com a finalidade de medirem esse valor *true rms* são mostrados nas figuras 5 e 6, e suas especificações de *datasheet* nas tabelas 2 e 3, respectivamente.

Figura 5 - Multímetro Digital True RMS Professional Amprobe 34XR-A



Fonte: Site Amprobe, 2019.

Tabela 2 - Especificações Técnicas do Multímetro Digital Amprobe 34XR-A

Função	Alcance	Precisão
Voltagem DC		
Escala	400 mV, 4 V, 40 V, 400 V, 1000 V	$\pm (0.5 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dgt})$
Resolução	100 μV	
Voltagem AC (45 Hz to 2 kHz) True RMS		
Escala	400 mV, 4 V, 40 V, 400 V, 750 V	
Precisão	400 mV escala, 45 to 100 Hz:	$\pm (1.2 \% \text{ rdg} + 8 \text{ dgts})$
	750 V escala: 45 to 1 kHz:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 8 \text{ dgts})$
	Todas as outras escalas, 45 to 500 Hz:	$\pm (1.2 \% \text{ rdg} + 8 \text{ dgts})$

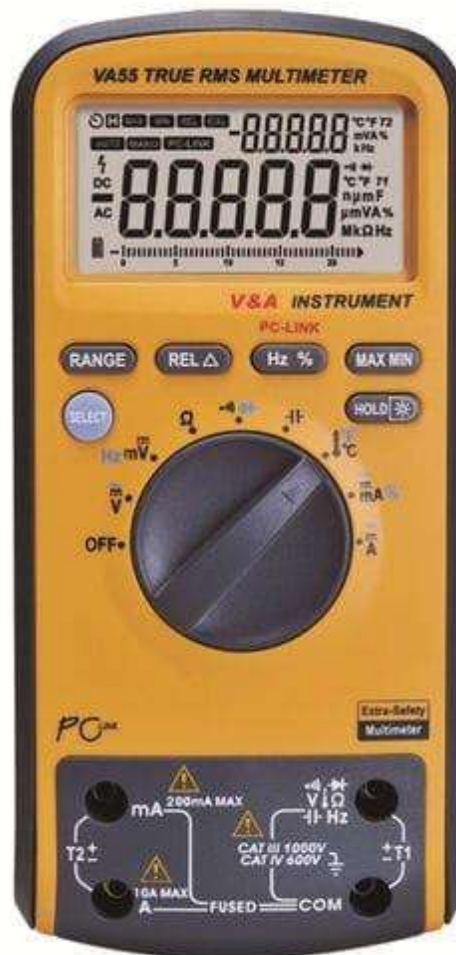
Função	Alcance	Precisão
	Todas as outras escalas, 500 to 2 kHz:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 8 \text{ dgts})$
Resolução	100 μV	
AC acoplado True RMS especificadas de 5 % a 100 % de escala		
Corrente DC		
Escalas	400 μA , 4 mA, 40 mA, 300 mA, 10 A	
Precisão	400 μA a 300 mA escalas:	$\pm (1.0 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dgt})$
	10 A escala:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 3 \text{ dgts})$
Resolução	0.1 μA	
Corrente AC (45 Hz to 1 kHz) True RMS		
Escalas	400 μA , 4 mA, 40 mA, 300 mA, 10 A	
Precisão	400 μA a 300 mA escalas:	$\pm (1.5 \% \text{ rdg} + 8 \text{ dgts})$
	10 A escala:	$\pm (2.5 \% \text{ rdg} + 10 \text{ dgts})$
Resolução	0.1 μA	
Resistência		
Escala	400 W, 4 kW, 40 kW, 400 kW, 4 MW, 40 MW	
Precisão	400, 4 k, 40 k, 400 k, 4 MW escala:	$\pm (1.0 \% \text{ rdg} + 4 \text{ dgts})$
	40 MW escala:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dgts})$
Resolução	100 mW	
Capacitância		
Escala	4 μF , 40 μF , 400 μF , 4000 μF	
Precisão	4 μF escala:	$\pm (5.0 \% \text{ rdg} + 10 \text{ dgts})$
	40 μF , 400 μF escalas:	$\pm (5.0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dgts})$

Função	Alcance	Precisão
	4000 μ F escala:	$\pm (5.0 \% \text{ rdg} + 15 \text{ dgts})$
Resolução	1 nF	
Temperatura		
Escalas	-20 °C to 1000 °C, -4 °F to 1832 °F	
Precisão	-20 °C to 10 °C:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 4 \text{ °C})$
	10 °C to 200 °C:	$\pm (1.0 \% \text{ rdg} + 3 \text{ °C})$
	200 °C to 1000 °C:	$\pm (3.0 \% \text{ rdg} + 2 \text{ °C})$
	-4 °F to 50 °F:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 8 \text{ °F})$
	50 °F to 400 °F:	$\pm (1.0 \% \text{ rdg} + 6 \text{ °F})$
	400 °F to 1832 °F:	$\pm (3.0 \% \text{ rdg} + 4 \text{ °F})$
Resolução	1 °C, 1 °F	
Frequência		
Escalas	4 kHz, 40 kHz, 400 kHz, 1 MHz	$\pm (0.1 \% \text{ rdg} + 3 \text{ dgts})$
Resolução	1 Hz	
Duty Cycle		
Escalas	0 to 90 %	
Precisão	5 V logic:	$\pm (2.0 \% \text{ rdg} + 5 \text{ dgts})$
Escala de frequência	40 Hz to 20 kHz	
Continuidade		
Indicação Auditiva	< 35 W	
Teste de Diodo		
Teste de Corrente	1.2 mA (aproximadamente)	
Tensão de Circuito Aberto	3.0 V DC típica	
Proteção de Sobrecarga		
AC/DC Voltagem	Todas as escalas 1000 V DC ou 750 V AC RMS	

Função	Alcance	Precisão
AC/DC Corrente	μA / mA entrada: 0,315 A / 1000 Válvula rápida (6,3 x 32 mm) 10 A entrada: 10 cerâmica rápida A / 1000 V 10 x 38 mm (10 A por 4 minutos no máximo, seguidos de um período de resfriamento de 12 minutos)	

Fonte: Site Amprobe, 2019.

Figura 6 - Multímetro Digital True RMS VA55 V&A Instrument



Fonte: Site Direct Industry, 2019.

Tabela 3 - Especificações Técnicas do Multímetro Digital VA55 V&A Instrument

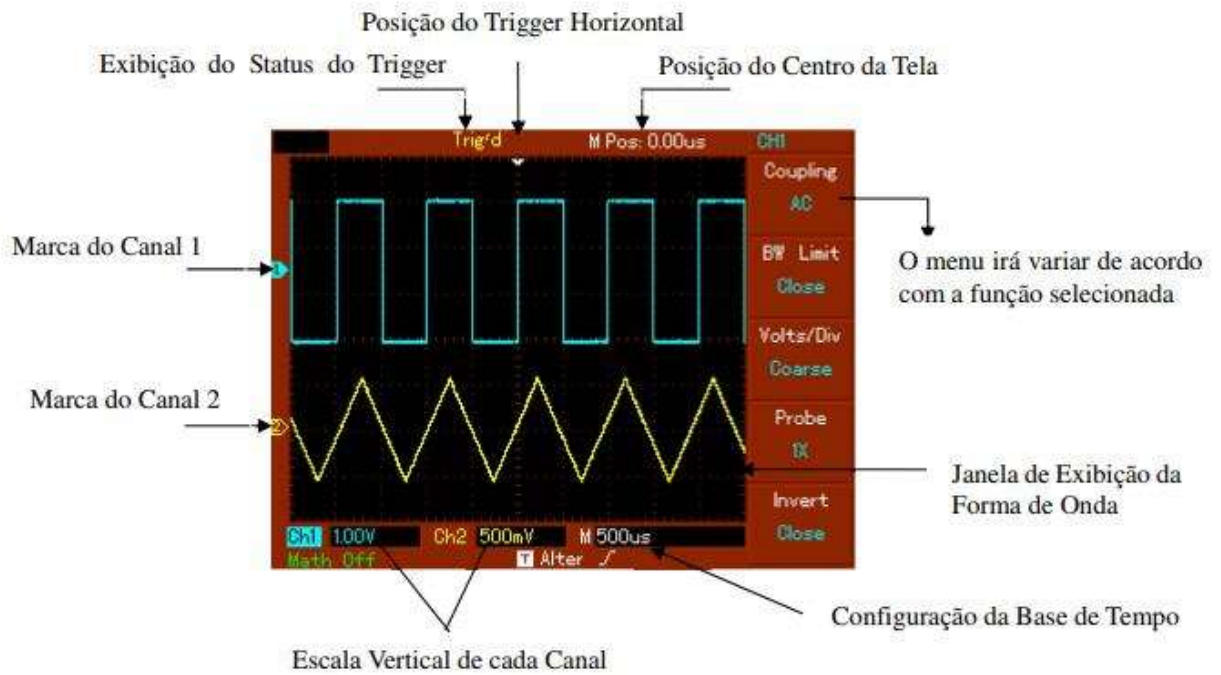
Funções Básicas	Escala	Precisão
DC Voltagem	200mV/2V/20V/200V/1000V	$\pm(0.05\%+10)$
AC Voltagem	2V/20V/200V/1000V	$\pm(0.5\%+40)$
DC Corrente	200mA/10A	$\pm(0.2\%+20)$
AC Corrente	200mA/10A	$\pm(1.0\%+30)$
Resistência	200 Ω /2K Ω /20K Ω /200K Ω /2M Ω /20M Ω	$\pm(0.5\%+10)$
Capacitância	20nF/ 200nF/2 μ F/20 μ F	$\pm(1.5\%+20)$
	200 μ F/1000 μ F	$\pm(2\%+20)$
Frequência Lógica	10Hz~2MHz	$\pm(0.05\%+10)$
Frequência de Linha	10Hz~200KHz	$\pm(0.05\%+10)$
Ciclo de Trabalho	10%~90%	$\pm(1\%+30)$
Temperatura1	-200°C~-100°C	$\pm(1\%+10)$
	-100°C~1300°C	$\pm(0.5\%+10)$
Temperatura2	-200°C~-100°C	$\pm(1\%+10)$
	-100°C~1300°C	$\pm(0.5\%+10)$

Fonte: Site Mastech, 2019.

3.4 Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento de medição que permite visualizar graficamente sinais elétricos variantes no tempo, além de fornecer diversos parâmetros de medição do sinal medido, tais como amplitude, período, frequência, valor pico a pico, valor RMS, componente contínua, componente alternada, entre outros [11]. Além disso possibilita a comparação de dois sinais que podem ser medidos em pontos distintos de um circuito, fornecendo seus parâmetros de acordo com a função selecionada pelo operador, como podemos observar na figura 7, a seguir.

Figura 7 - Diagrama Esquemático da Interface do Display do Minipa 2061



Fonte: Minipa. Manual do usuário, 2019.

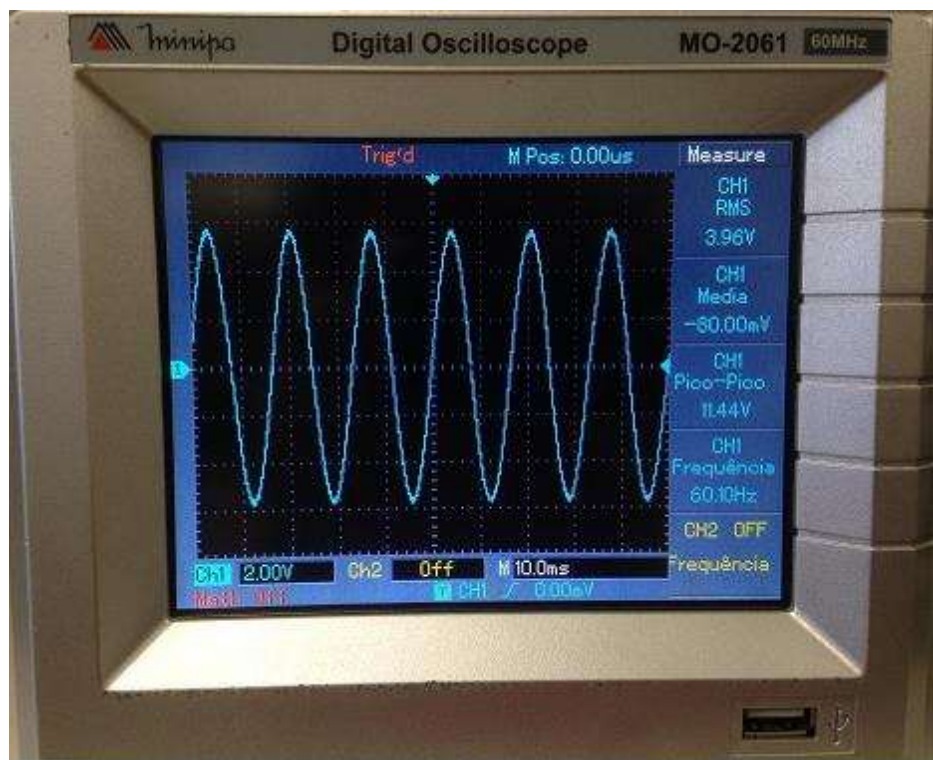
O osciloscópio utilizado neste artigo foi o Osciloscópio Digital MO2061 da marca Minipa, como o mostrado na figura 8 e foi configurado para mostrar os parâmetros de valor *RMS*, valor médio, valor pico-pico e frequência dos sinais estudados, como é mostrado na figura 9 a seguir.

Figura 8 - Osciloscópio Digital Minipa MO 2061



Fonte: Site Clube das Ferramentas, 2019.

Figura 9 - Osciloscópio Minipa com Forma de Onda Senoidal e Parâmetros Medidos

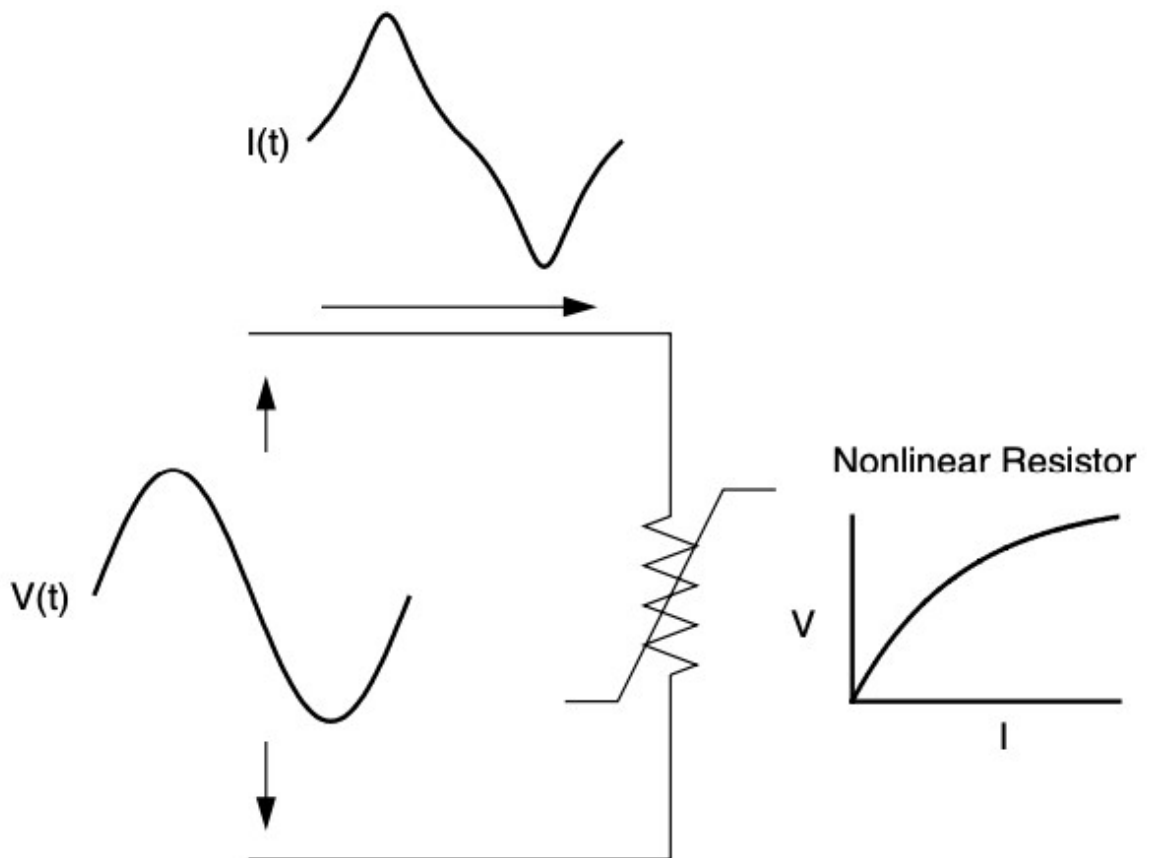


Fonte: O próprio autor.

4 FORMAS DE ONDAS ESTUDADAS

Como já comentado ao longo do trabalho, sinais perfeitamente senoidais são praticamente impossíveis na realidade cotidiana das empresas, indústrias e residências, e isso deve-se a presença de distorções e distúrbios causados por equipamentos não lineares quando conectados ao sistema elétrico de potência. Um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional a tensão aplicada. A figura 10 ilustra a forma de onda da corrente distorcida quando uma tensão é aplicada a um resistor não linear, onde a relação tensão-corrente é dada.

Figura 10- Formas de onda da corrente distorcida



Fonte: Dugan (2002)

Se observado o gráfico da corrente na figura 10, percebe-se facilmente com o conhecimento teórico adquirido até o presente momento, que para o cálculo do valor *rms* é necessária a utilização da fórmula com integral, e assim, neste capítulo, será apresentada o cálculo analítico dos valores *rms* para funções de ondas comumente presentes em situações reais, através do uso das integrais.

4.1 Senoidal

Seja um sinal senoidal dado pela equação a seguir:

$$v(t) = V_m \text{sen}(wt) \quad (29)$$

Em que V_m é o valor de pico da onda, seu valor *rms* é dado por:

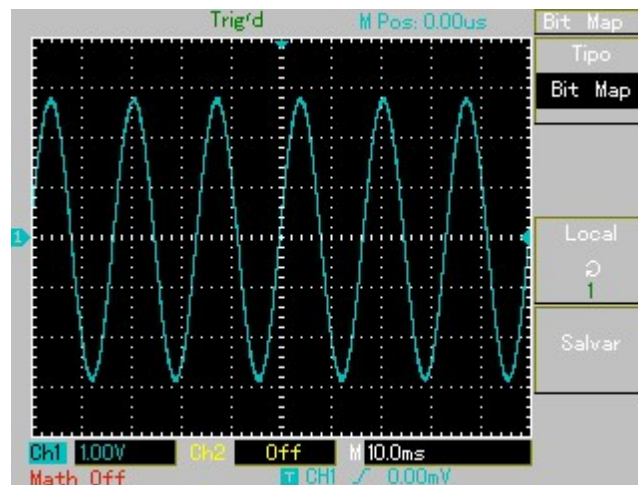
$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (30)$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^T \text{sen}^2(wt) \cdot dt} \quad (31)$$

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

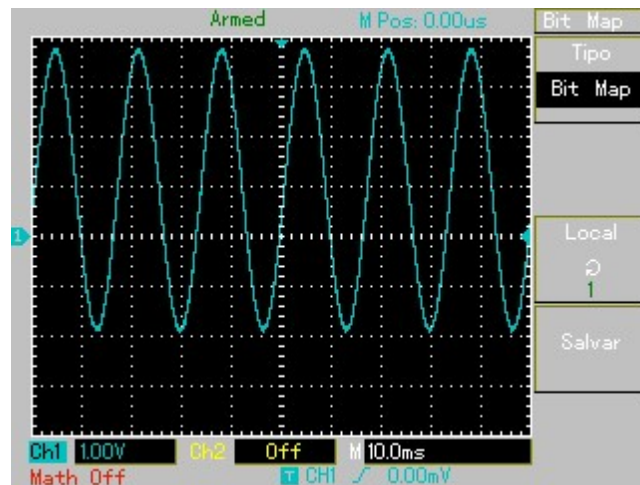
As formas das ondas estudadas vistas pelo osciloscópio estão mostradas a seguir, nas figuras 11, 12 e 13

Figura 11 - Forma de Onda Senoidal Sem Offset



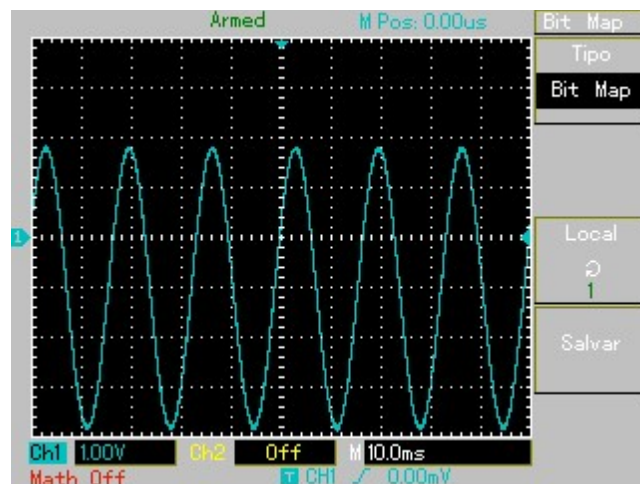
Fonte: O próprio autor.

Figura 12 - Forma de Onda Senoidal Com Offset Positivo



Fonte: O próprio autor.

Figura 13 - Forma de Onda Senoidal Com Offset Negativo

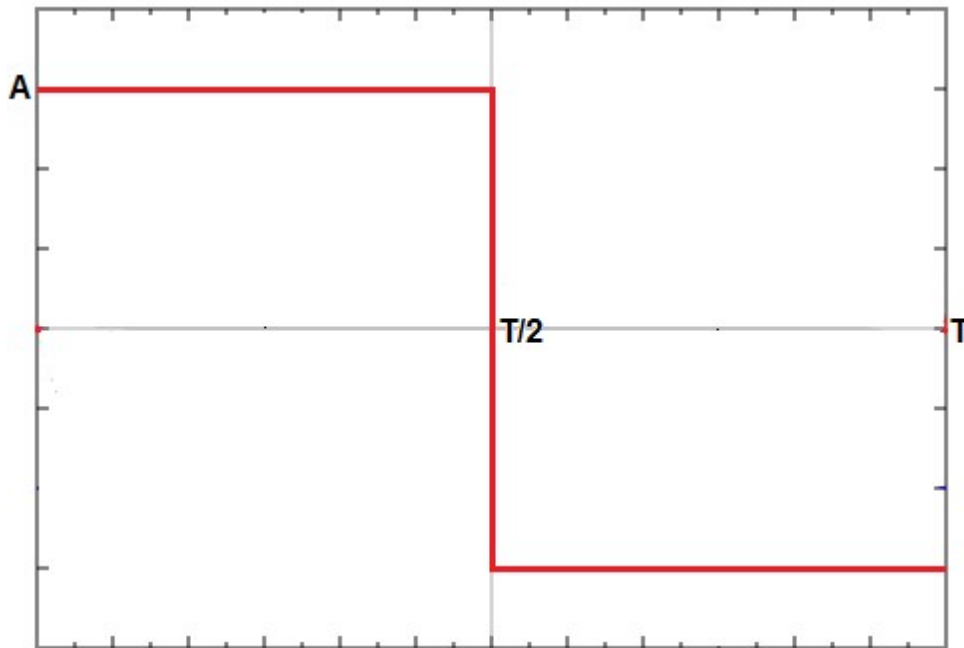


Fonte: O próprio autor.

4.2 Quadrada

Uma onda quadrada tem a forma de onda que pode ser representada pela figura 14:

Figura 14 - Forma de onda quadrada



Fonte: Dugan (2002)

Em que A é a amplitude da onda, e T o seu período. Considerando que esta é uma onda simétrica, pode-se dividi-la em duas partes iguais para facilitar no cálculo do valor *rms*, e após obtido esse valor, multiplica-lo por dois para então obter o valor *rms* total da onda dada. Se adotarmos o trecho de 0 a $T/2$, teremos uma função constante cuja equação será:

$$y(t) = A \quad (33)$$

Substituindo-se a equação da onda na fórmula do valor eficaz, tem-se que:

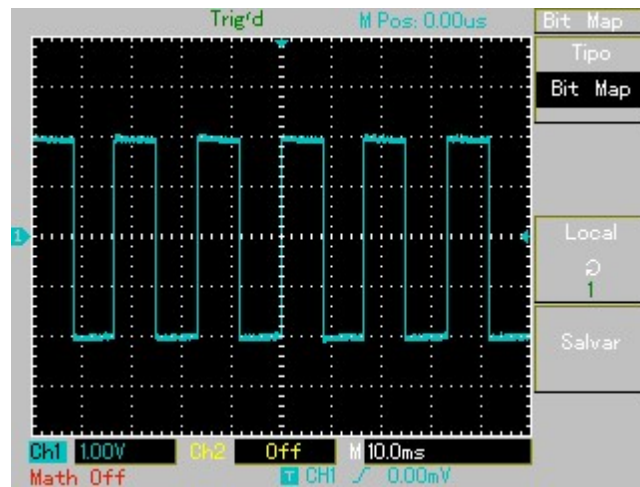
$$Y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\left(\int_0^{T/2} A^2 \cdot dt \right) + \left(\int_{T/2}^T A^2 \cdot dt \right) \right]} \quad (34)$$

$$Y_{ef} = \sqrt{\frac{A^2}{T} \left[\left(\frac{T}{2} - 0 \right) + \left(T - \frac{T}{2} \right) \right]} \quad (35)$$

$$Y_{ef} = A \quad (36)$$

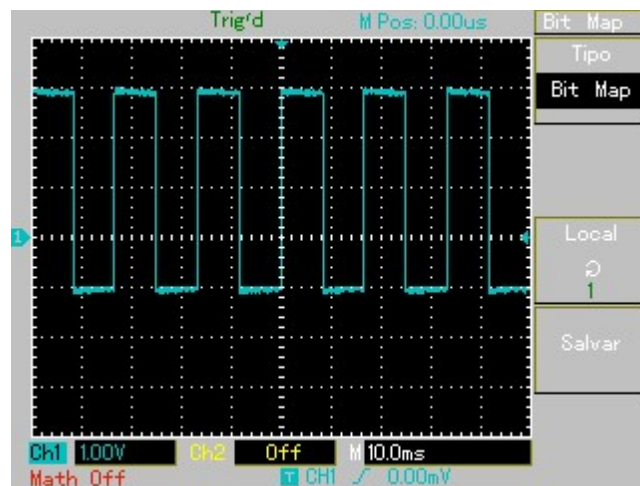
As formas das ondas estudadas vistas pelo osciloscópio estão mostradas a seguir, nas figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 - Forma de Onda Quadrada Sem Offset



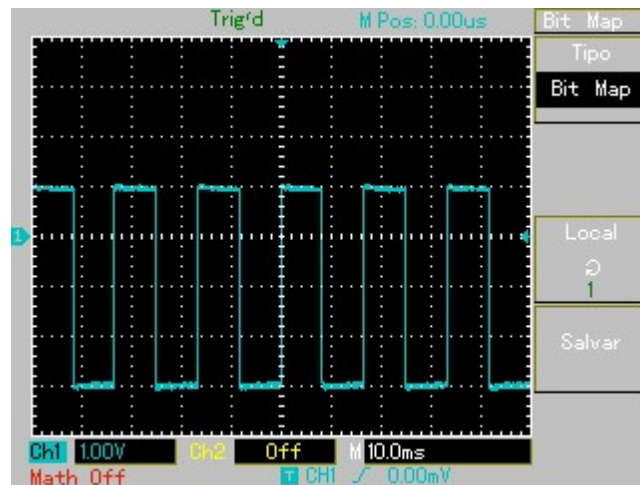
Fonte: O próprio autor.

Figura 16 - Forma de Onda Quadrada Com Offset Positivo



Fonte: O próprio autor.

Figura 17 - Forma de Onda Quadrada Com Offset Negativo



Fonte: O próprio autor.

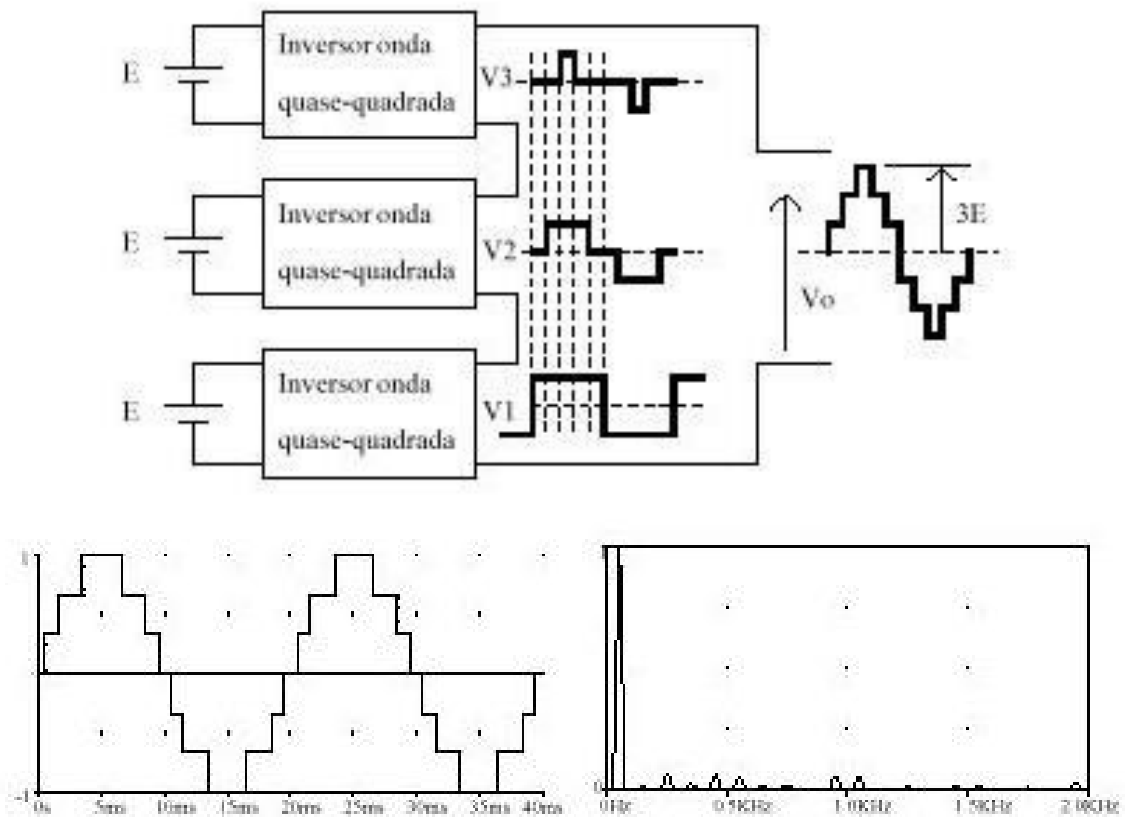
4.3 Forma de onda de um conversor multinível

Um conversor multinível pode ser definido como um fixador de níveis de tensão, em que a tensão alternada da saída é gerada através dos níveis de tensão que se tem na entrada por meio da escolha específica da comutação dos seus interruptores [12].

Em termos mais simples, a combinação de inversores em série permite-se obter níveis intermediários de tensão ou corrente que viabiliza a síntese de uma forma de onda alternada em degraus, com baixa distorção harmônica, sendo seu principal objetivo a redução de perdas e a melhoria da estabilidade mecânica no acionamento de motores de corrente alternada, já que minimiza os efeitos sobre o torque na partida do motor [13].

Um diagrama esquemático pode ser visualizado na figura abaixo, onde três inversores são conectados em série com a finalidade de produzir uma onda alternada com 7 níveis de tensão.

Figura 18 - Diagrama Esquemático de um Conversor Multinível e Forma de onda e espectro harmônico

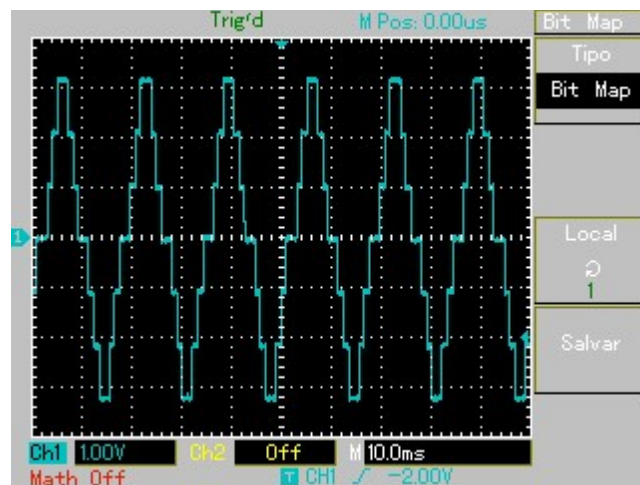


Fonte: Site Geocities, 2019.

Nesse sentido uma aplicação bastante conhecida para esse tipo de conversor é no acionamento de motores para elevador, em que sua partida deve ser gradual e suave para que o usuário do sistema não perceba o deslocamento do mesmo. Outras aplicações são em controle de sistemas de aquecimento, fontes de alimentação, carregadores de baterias, *no breaks*, linhas de transmissão em corrente contínua, além de interconexão entre diferentes fontes de energia, como eólica e solar.

Diante disso, a terceira forma de onda a ser estudada no presente trabalho é a forma de onda particular de um conversor multinível com 7 níveis, que é mostrada na figura a seguir.

Figura 19 - Forma de Onda Característica de um Conversor Multinível com Sete Níveis Sem Offset



Fonte: O próprio autor.

O valor *rms* para o sinal de saída pode ser obtido pelo método das áreas, sendo que para este tipo de onda o período de cada estágio de subida é igual a um sexto do meio período total da onda, em termos equacionais, tem-se que:

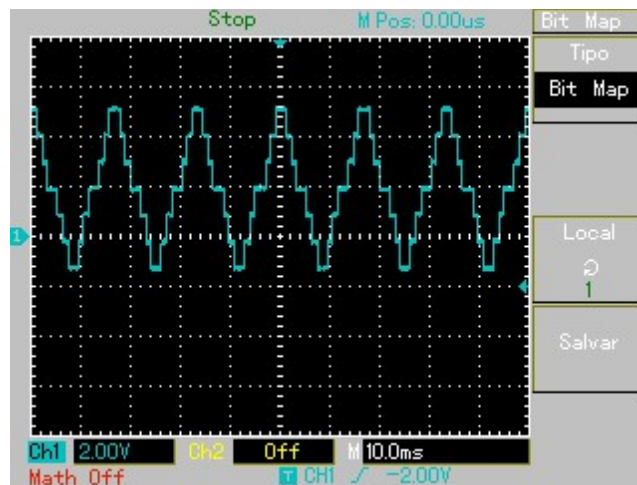
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2E^2 \cdot t + 2(E + E)^2 \cdot t + 2(E + E + E)^2 \cdot t}{6t}} \quad (37)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{14}{3} E^2} \quad (38)$$

Tal que *E* é a amplitude de cada nível da onda, sendo eles de mesmo valor, e *t* o período de cada degrau.

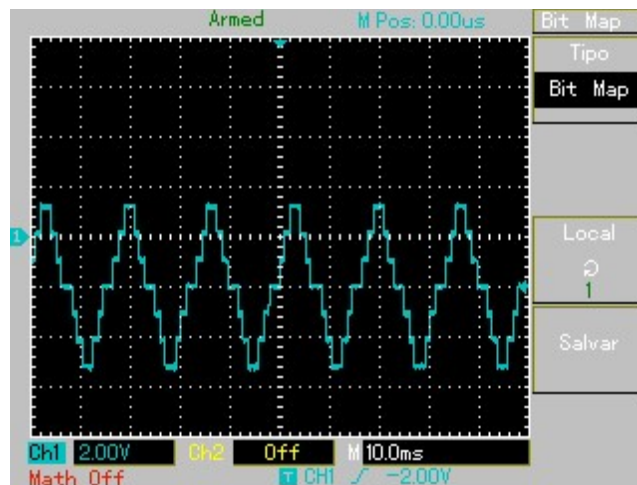
As outras formas das ondas estudadas vistas pelo osciloscópio estão mostradas a seguir, nas figuras 20 e 21.

Figura 20 - Forma de Onda Característica de um Conversor Multinível Com Offset Positivo



Fonte: O próprio autor.

Figura 21 - Forma de Onda Característica de um Conversor Multinível Com Offset Negativo



Fonte: O próprio autor.

4.4 Forma de onda de um retificador monofásico de onda completa

Sabe-se que o fornecimento de energia elétrica é feito a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada, e isso deve-se ao facto principal da facilidade de adaptação do nível de tensão por meio dos transformadores empregados ao longo do sistema. Com tudo em muitas aplicações a carga a ser alimentada exige uma tensão contínua e uma conversão CA-CC faz-se necessária e pode ser obtida por conversores chamados retificadores [14].

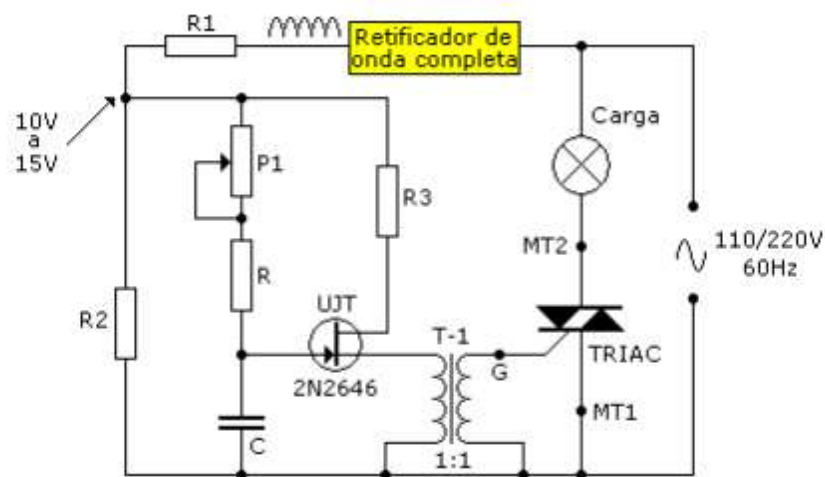
Os circuitos retificadores dividem-se em dois grupos, os de meia-onda e os de onda

completa (em ponte) e podem ser classificados entre controlados, não controlados e semi-controlados sendo que se diferem pela utilização de tiristores e transistores, diodos ou ambos, como elementos de retificação, respectivamente. Estes elementos empregados no circuito, tem o objetivo de ajustar o valor da tensão de saída.

Além do parâmetro de composição do circuito, os retificadores podem ser classificados também de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada, sendo os mais comuns monofásicos e os trifásicos.

Nesse sentido, um circuito com retificador controlado monofásico de onda completa bastante conhecido é o *dimmer* utilizado em lâmpadas de descarga para controle de luminosidade, e pode ser observado na figura 22 a seguir.

Figura 22 - Circuito Próprio de um Dimmer

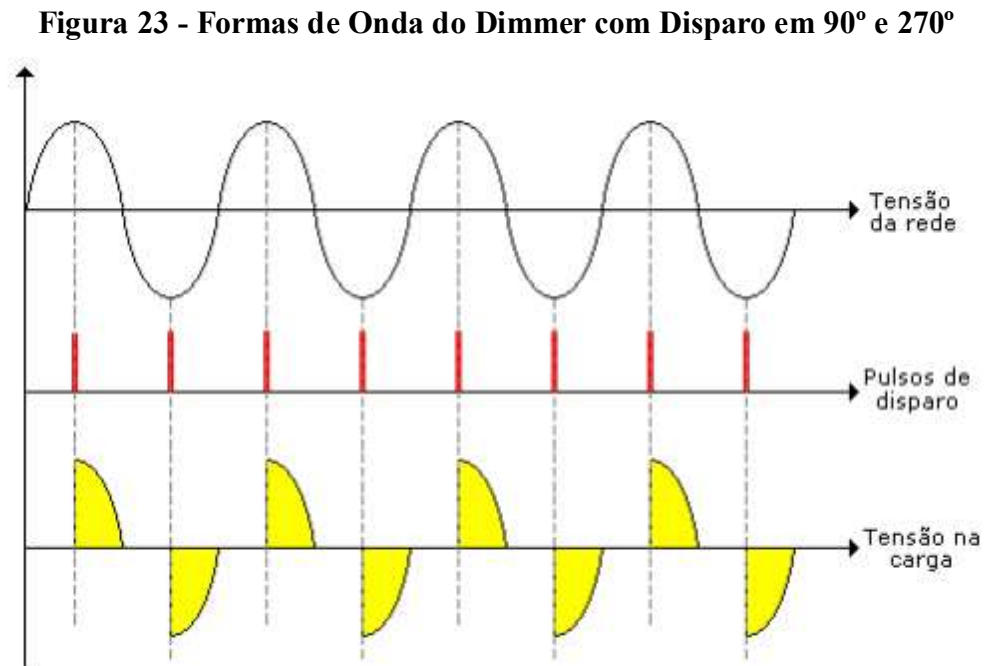


Fonte: Zuim, Edgar.

O retificador de onda completa tem por finalidade fornecer ao circuito de disparo um semiciclo positivo. O circuito de disparo é formado por um transistor UJT acoplado ao *gate* através de um transformador de pulsos (T-1), que tem a função apenas de isolar o circuito de disparo do TRIAC. Ao início de um semiciclo da tensão alternada de alimentação, que aparece após o retificador de onda completa, o capacitor C carrega-se por meio do resistor R, até que o ponto de disparo do UJT é atingido. Ao ser disparado o UJT, o capacitor C descarrega através do enrolamento primário do transformador T-1, e isso faz aparecer em seu secundário um pulso de curta duração que é suficiente para disparar o TRIAC. Nesse sentido pode-se alterar a constante de tempo de carga do capacitor (RC), e assim alterar o ângulo de disparo do dispositivo, o que afeta o brilho da lâmpada, tendo assim um circuito de controle de

luminosidade [15].

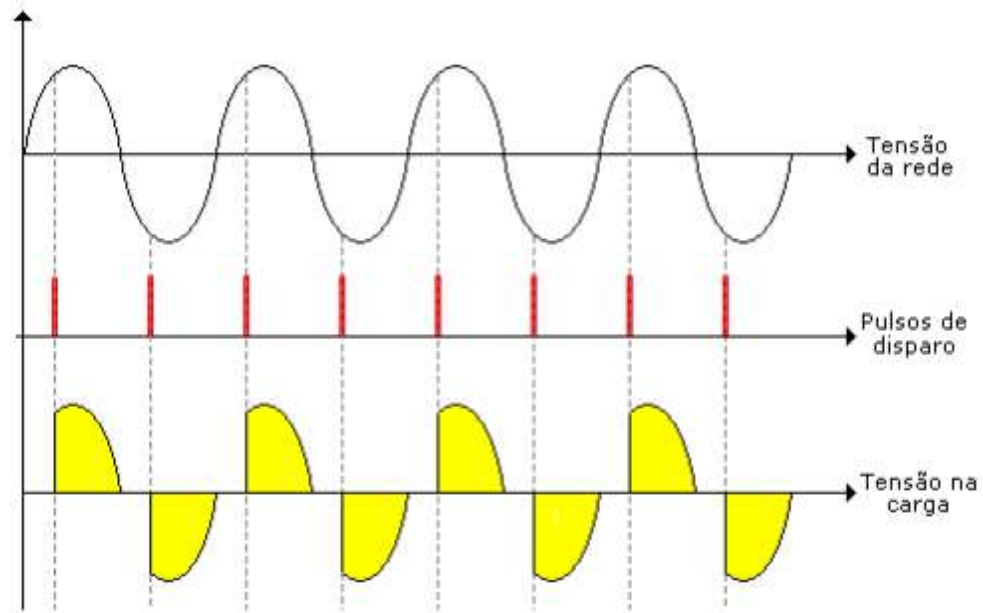
A figura 23 mostra a forma de onda da tensão na carga quando o disparo ocorre em um ângulo de 90° e 270° , respectivamente. Nesse caso observa-se que a potência na carga foi reduzida pela metade, concluindo-se que efetivamente na carga circula uma corrente proveniente da metade de cada semiciclo.



Fonte: Zuim, Edgar.

Se o ângulo de disparo fosse adiantado, por exemplo 45° , é obtido uma potência maior na carga, como ilustra a figura 24. Nesse caso se uma lâmpada incandescente estiver sendo utilizada como carga do circuito o seu brilho seria maior que no caso anterior.

Figura 24 - Formas de Onda do Dimmer com Disparo em 45° e 220°



Fonte: Zuim, Edgar ()

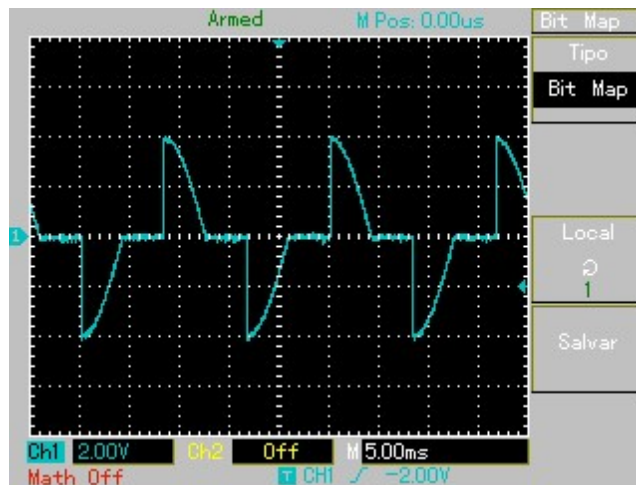
Sendo a forma de onda da figura 23, e α o ângulo no instante em que ocorre o pulso de disparo, tem-se que o valor eficaz da tensão da carga R, pode ser calculado da seguinte forma [16].

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} V_p \text{sen}\theta)^2 d\theta} \quad (39)$$

$$V_{ef} = V_p \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2\pi}} \quad (40)$$

As formas das ondas estudadas vistas pelo osciloscópio estão mostradas a seguir, nas figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 - Forma de Onda Característica de um Retificador Monofásico sem Offset



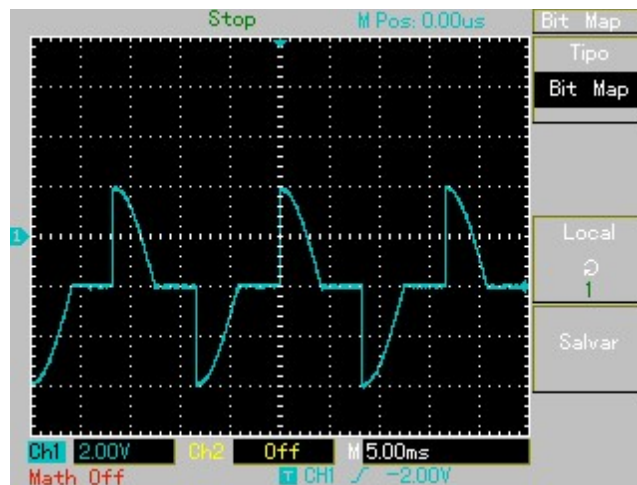
Fonte: O próprio autor.

Figura 26 - Forma de Onda Característica de um Retificador Monofásico Com Offset Positivo



Fonte: O próprio autor.

Figura 27 - Forma de Onda Característica de um Retificador Monofásico Com Offset Negativo

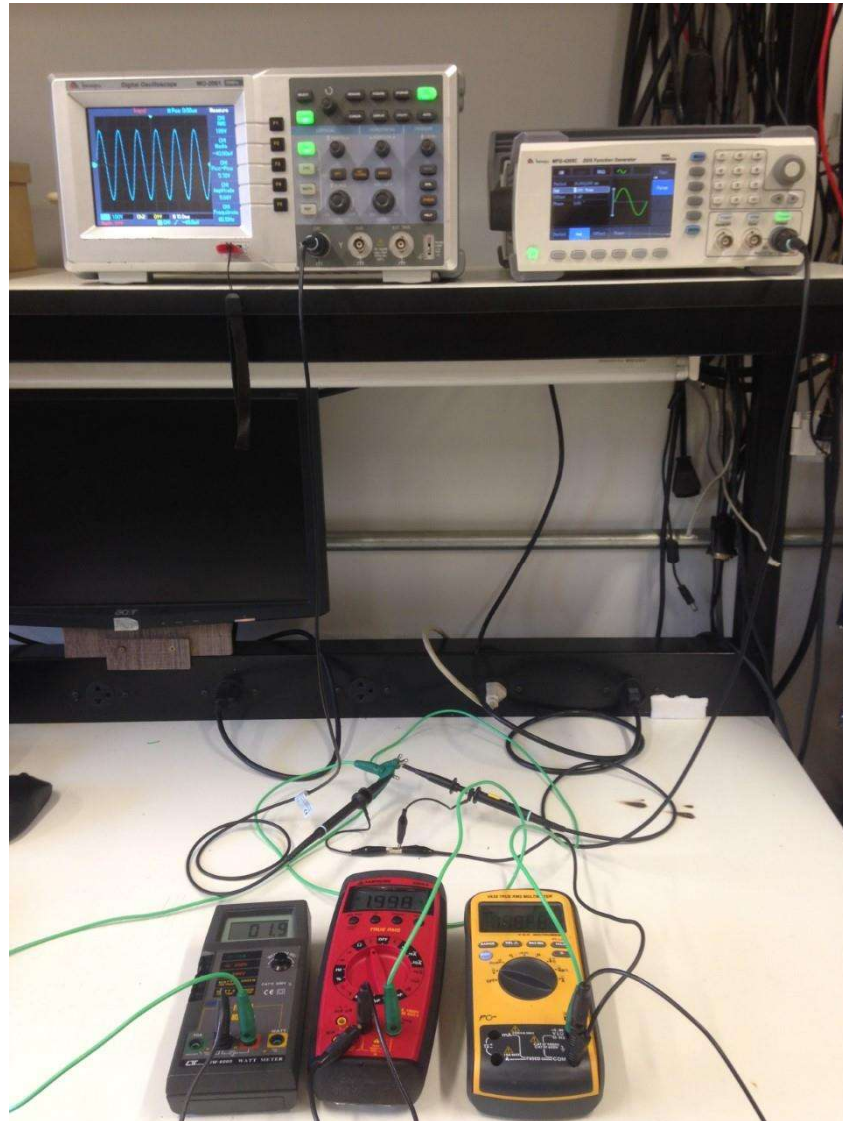


Fonte: O próprio autor.

5 ANÁLISE DE MEDIÇÕES

As medições foram realizadas em laboratório na Universidade Federal da Goiás, utilizando os equipamentos anteriormente descritos, dispostos e conectados conforme a figura 28 a seguir.

Figura 28 - Montagem da Bancada



Fonte: O próprio autor.

Os resultados encontrados para as medições em cada multímetro são apresentados nas tabelas 4 a 7.

Tabela 4 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Osciloscópio

DADOS DO GERADOR						TEÓRICOS			MEDIDOS		
Formas de onda	Amp. [V]	Vrms [V]	Offset [V]	Âng. [°]	Duty [%]	DC [V]	AC [V]	TRUE RMS [V]	OSC		
									DC [V]	RMS [V]	ERRO [%]
Senoidal	2,828	2	0		-	0	1,9997	1,9997	-0,08	1,98	0,99
	2,828	2	1	0	-	1	1,9997	2,2358	0,88	2,19	2,09
	2,828	2	-1	0	-	-1	1,9997	2,2358	-1,04	2,24	-0,19
Quadrada	2	2	0	-	50	0	2,0000	2,0000	-0,04	1,94	3,09
	2	2	1	-	50	1	2,0000	2,2361	0,92	2,15	4,00
	2	2	-1	-	50	-1	2,0000	2,2361	-1,04	2,2	1,64
	2	2	2	-	-	2	2,0000	2,8284	1,92	2,73	3,61
	2	2	-2	-	-	-2	2,0000	2,8284	-2,00	2,79	1,38
Conversor Multinível	6,45	2	0	0	-	0	2,0000	2,0000	-0,08	1,97	1,52
	6,45	2	2	0	-	2	2,0000	2,8284	1,84	2,74	3,23
	6,45	2	-2	0	-	-2	2,0000	2,8284	-2,08	2,81	0,66
Ret. onda completa	3,986	2	0	0	-	0	2,8185	2,8185	-0,08	1,97	43,07
	3,986	2	4	0	-	4	2,8185	4,8933	3,8	4,29	14,06
	3,986	2	-4	0	-	-4	2,8185	4,8933	-4,2	4,6	6,38
	3,986	2	2	0	-	2	2,8185	3,4560	1,84	2,72	27,06
	3,986	2	-2	0	-	-2	2,8185	3,4560	-2,08	2,81	22,99

Fonte: O próprio autor.

Tabela 5 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos Multímetro da Marca Lutron

DADOS DO GERADOR						TEÓRICOS			MEDIDOS		
Formas de onda	Amp. [V]	Vrms [V]	Offset [V]	Âng. [°]	Duty [%]	DC [V]	AC [V]	TRUE RMS [V]	Lutron		
									DC [V]	AC [V]	ERRO [%]
Senoidal	2,828	2	0		-	0	1,9997	1,9997	-0,01	1,7	17,63
	2,828	2	1	0	-	1	1,9997	2,2358	1,00	2,9	-22,90
	2,828	2	-1	0	-	-1	1,9997	2,2358	-1,00	2,9	-22,90
Quadrada	2	2	0	-	50	0	2,0000	2,0000	0,01	1,9	5,26
	2	2	1	-	50	1	2,0000	2,2361	1,00	3,0	-25,46
	2	2	-1	-	50	-1	2,0000	2,2361	-1,006	3,0	-25,46
	2	2	2	-	-	2	2,0000	2,8284	2,00	4,1	-31,01
	2	2	-2	-	-	-2	2,0000	2,8284	-2,00	4,1	-31,01
Conversor Multinível	6,45	2	0	0	-	0	2,0000	2,0000	0,001	1,5	33,33
	6,45	2	2	0	-	2	2,0000	2,8284	1,99	4,3	-34,22
	6,45	2	-2	0	-	-2	2,0000	2,8284	-2,00	4,4	-35,72
Ret. onda completa	3,986	2	0	0	-	0	2,8185	2,8185	0,001	1,3	116,81
	3,986	2	4	0	-	4	2,8185	4,8933	4,00	8,3	-41,04
	3,986	2	-4	0	-	-4	2,8185	4,8933	4,00	8,3	-41,04
	3,986	2	2	0	-	2	2,8185	3,4560	1,998	4,4	-21,45

	3,986	2	-2	0	-	-2	2,8185	3,4560	2,00	4,4	-21,45
--	-------	---	----	---	---	----	--------	--------	------	-----	--------

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro da Marca Amprobe

DADOS DO GERADOR						TEÓRICOS			MEDIDOS		
Formas de onda	Amp. [V]	Vrms[V]	Offset [V]	Âng. [°]	Duty [%]	DC [V]	AC [V]	TRUE RMS [V]	Amprobe		
									DC [V]	TRUE RMS [V]	ERRO [%]
Senoidal	2,828	2	0		-	0	1,9997	1,9997	0,001	1,999	0,03
	2,828	2	1	0	-	1	1,9997	2,2358	1,002	2,001	11,73
	2,828	2	-1	0	-	-1	1,9997	2,2358	-1,000	2,001	11,73
Quadrada	2	2	0	-	50	0	2,0000	2,0000	0,003	2,005	-0,25
	2	2	1	-	50	1	2,0000	2,2361	1,003	2,003	11,64
	2	2	-1	-	50	-1	2,0000	2,2361	-0,999	2,000	11,80
	2	2	2	-	-	2	2,0000	2,8284	2,009	2,005	41,07
	2	2	-2	-	-	-2	2,0000	2,8284	-2,002	2,003	41,21
Convesor Multinível	6,45	2	0	0	-	0	2,0000	2,0000	0,001	2,011	-0,55
	6,45	2	2	0	-	2	2,0000	2,8284	2,008	2,011	40,65
	6,45	2	-2	0	-	-2	2,0000	2,8284	-2,005	2,010	40,72
Ret. onda completa	3,986	2	0	0	-	0	2,8185	2,8185	0,002	1,995	41,28
	3,986	2	4	0	-	4	2,8185	4,8933	4,020	1,996	145,15
	3,986	2	-4	0	-	-4	2,8185	4,8933	-3,990	1,997	145,03
	3,986	2	2	0	-	2	2,8185	3,4560	2,008	2,994	15,43
	3,986	2	-2	0	-	-2	2,8185	3,4560	-2,003	1,994	73,32

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7 - Comparação entre Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro da Marca V&A

DADOS DO GERADOR						TEÓRICOS			MEDIDOS		
Formas de onda	Amp. [V]	Vrms[V]	Offset [V]	Âng. [°]	Duty [%]	DC [V]	AC [V]	TRUE RMS [V]	V&A		
									DC [V]	TRUE RMS [V]	ERRO [%]
Senoidal	2,828	2	0		-	0	1,9997	1,9997	-0,0200	1,990	0,49
	2,828	2	1	0	-	1	1,9997	2,2358	1,0290	1,9956	12,04
	2,828	2	-1	0	-	-1	1,9997	2,2358	-1,0200	1,9950	12,07
Quadrada	2	2	0	-	50	0	2,0000	2,0000	0,0320	2,0260	-1,28
	2	2	1	-	50	1	2,0000	2,2361	1,0200	2,0180	10,81
	2	2	-1	-	50	-1	2,0000	2,2361	-1,0200	2,0040	11,58
	2	2	2	-	-	2	2,0000	2,8284	1,9800	2,0020	41,28
	2	2	-2	-	-	-2	2,0000	2,8284	-1,1200	2,0100	40,72
Convesor Multinível	6,45	2	0	0	-	0	2,0000	2,0000	0,0019	2,0140	-0,70
	6,45	2	2	0	-	2	2,0000	2,8284	1,9970	2,0100	40,72

	6,45	2	-2	0	-	-2	2,0000	2,8284	-2,0200	1,8360	54,05
Ret. onda completa	3,986	2	0	0	-	0	2,8185	2,8185	0,0200	1,9800	42,35
	3,986	2	4	0	-	4	2,8185	4,8933	3,9670	1,4990	226,44
	3,986	2	-4	0	-	-4	2,8185	4,8933	-4,0000	1,2850	280,80
	3,986	2	2	0	-	2	2,8185	3,4560	1,999	1,9194	80,06
	3,986	2	-2	0	-	-2	2,8185	3,4560	1,997	1,7042	102,79

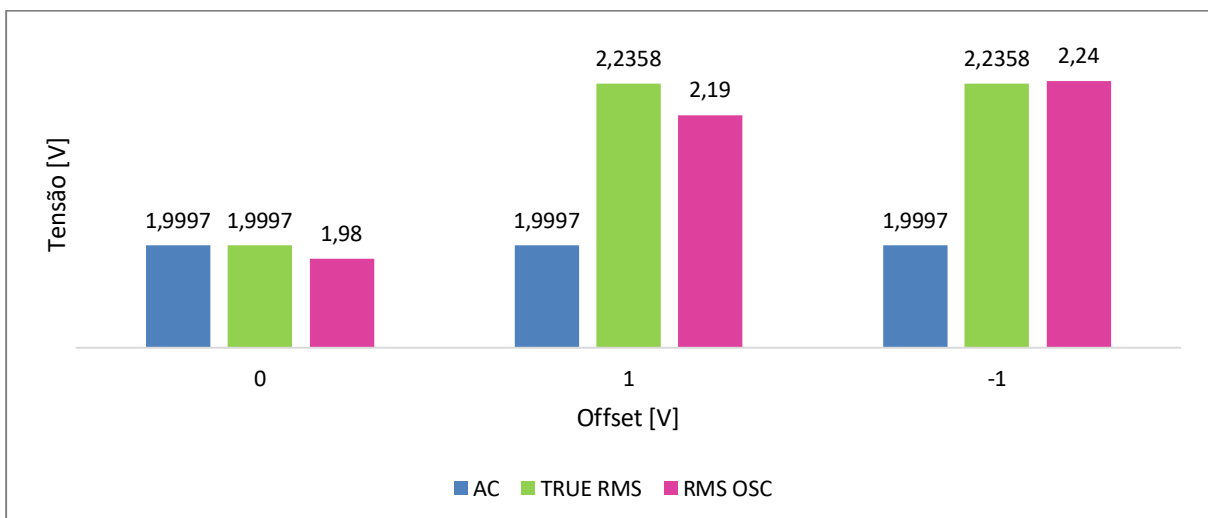
Fonte: O próprio autor.

Os erros relacionando os valores teóricos, calculados conforme as equações estabelecidas na parte teórica do presente artigo e os dados do gerador de funções mostrados na tabela, e as grandezas medidas pelos diferentes equipamentos foram calculados tendo como base a fórmula do erro relativo, explicitada a seguir.

$$Erro(\%) = \frac{\text{valor teórico} - \text{valor medido}}{\text{valor medido}} \times 100\% \quad (41)$$

Como pode-se observar nas tabelas de resultados e nos gráficos a seguir, o equipamento que fornece uma medição com menos erros para qualquer tipo de onda é o osciloscópio, porém quanto mais distorcida a forma de onda, maiores são os erros nas medições, até mesmo no equipamento mais confiável. É válido ainda ressaltar que o osciloscópio mede apenas o valor *rms* real da forma de onda, como pode ser observado facilmente nos gráficos, uma vez que não fornece o valor apenas da componente alternada.

Figura 29 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Osciloscópio para Onda Senoidal



Fonte: O próprio autor.

Figura 30 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Osciloscópio para Onda Quadrada



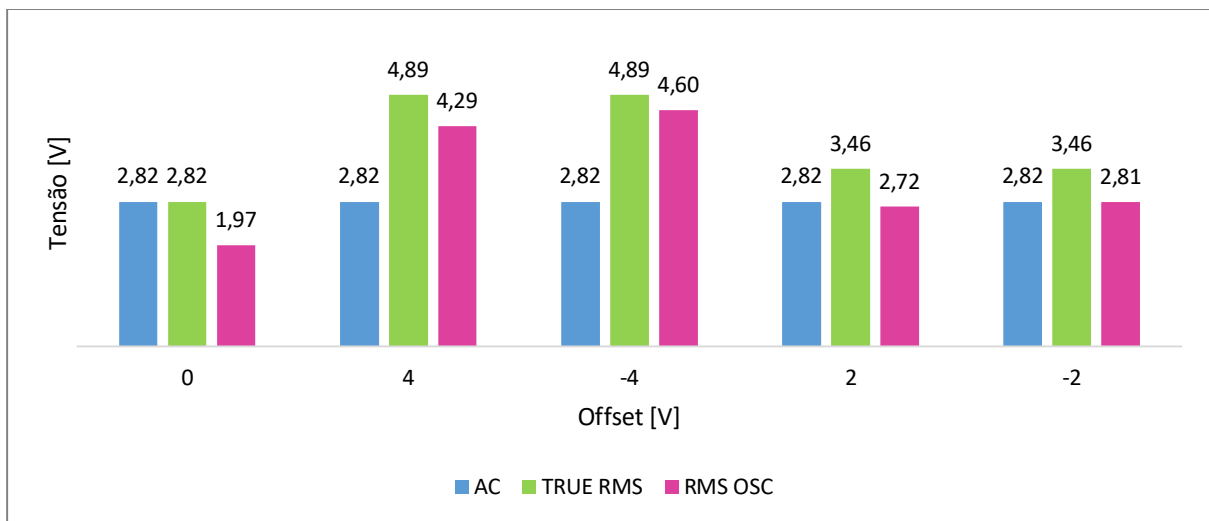
Fonte: O próprio autor.

Figura 31 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Osciloscópio para Onda Típica de um Conversor Multinível.



Fonte: O próprio autor.

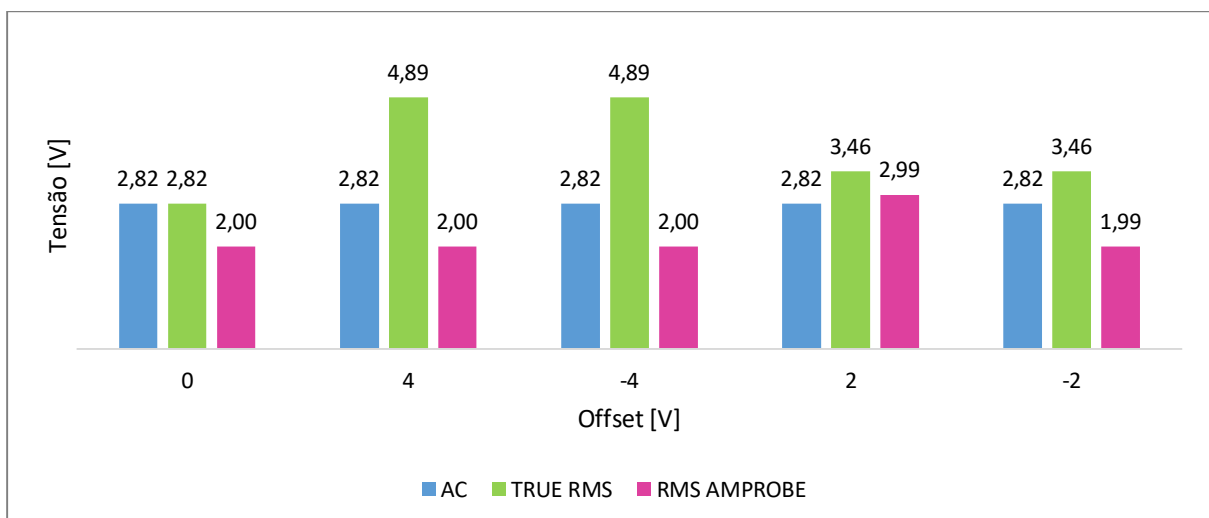
Figura 32 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Osciloscópio para Onda Típica de um Retificador Monofásico.



Fonte: O próprio autor.

Outro ponto que é facilmente percebido são os grandes erros, maiores que 100% para as formas de onda do retificador e maiores que 50% para as formas de onda do inversor multinível. Como já esperado, os equipamentos de medição possuem uma dificuldade física de medir, portanto, quanto mais distorcida for a forma de onda, maior o erro do valor fornecido ao leitor. Essa discrepância é percebida também nos gráficos a seguir, onde o valor medido normalmente é consideravelmente menor que os valores teóricos calculados.

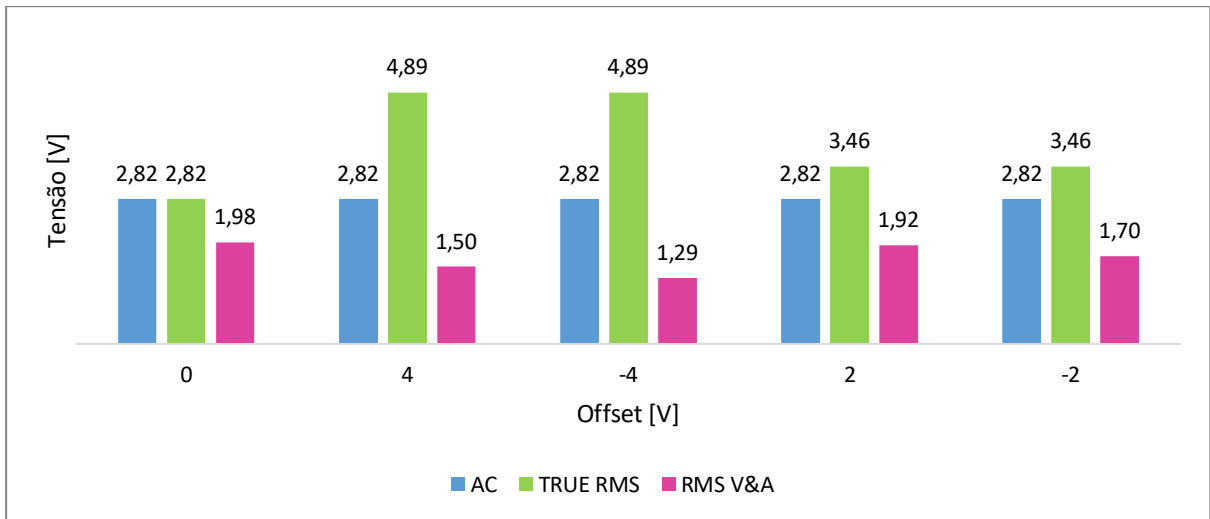
Figura 33 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Amprobe para Onda Típica de um Retificador Monofásico.



Fonte: O próprio autor.

Figura 34 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo

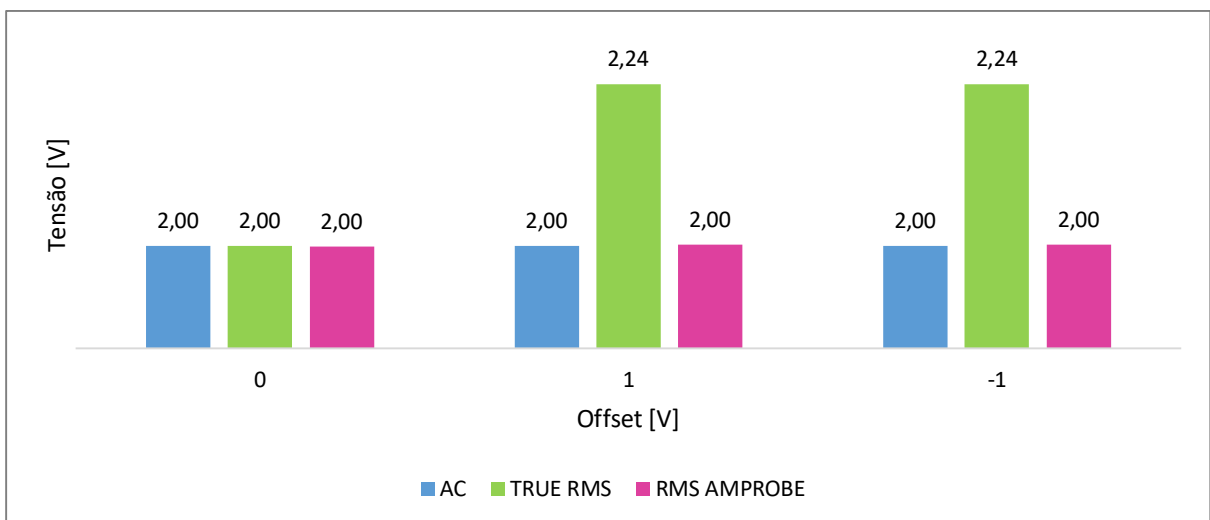
Multímetro V&A para Onda Típica de um Retificador Monofásico.



Fonte: O próprio autor.

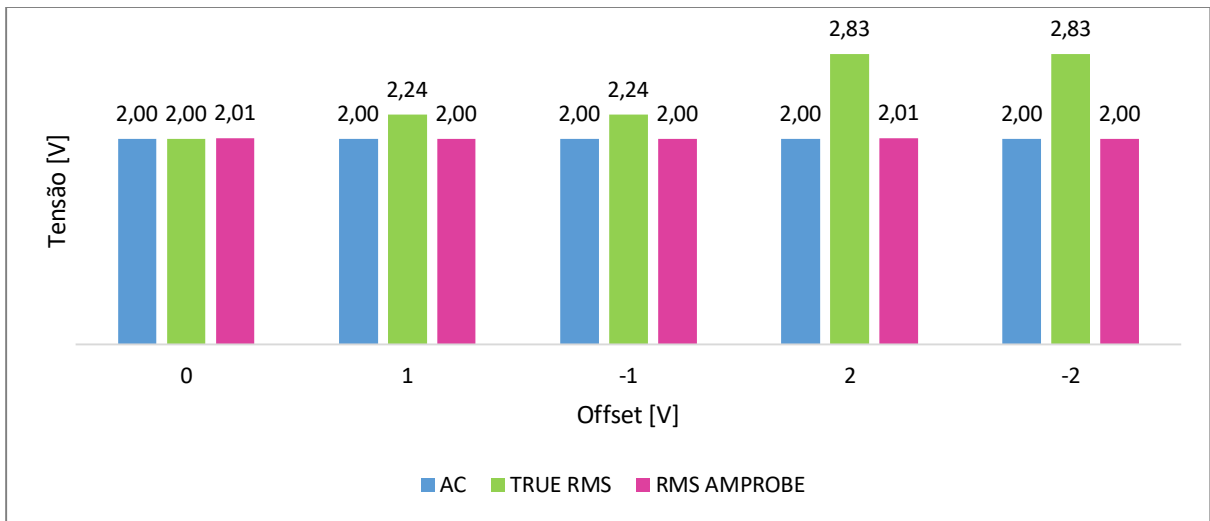
Ainda é possível perceber nos gráficos das figuras 33 a 40 que os medidores das marcas Amprobe e V&A fornecem como valor medido *true rms* o que na verdade se trata de uma medida do valor da componente alternada do sinal apenas, sem considerar o offset, até mesmo para o caso de ondas senoidais.

Figura 35 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Amprobe para Onda Senoidal



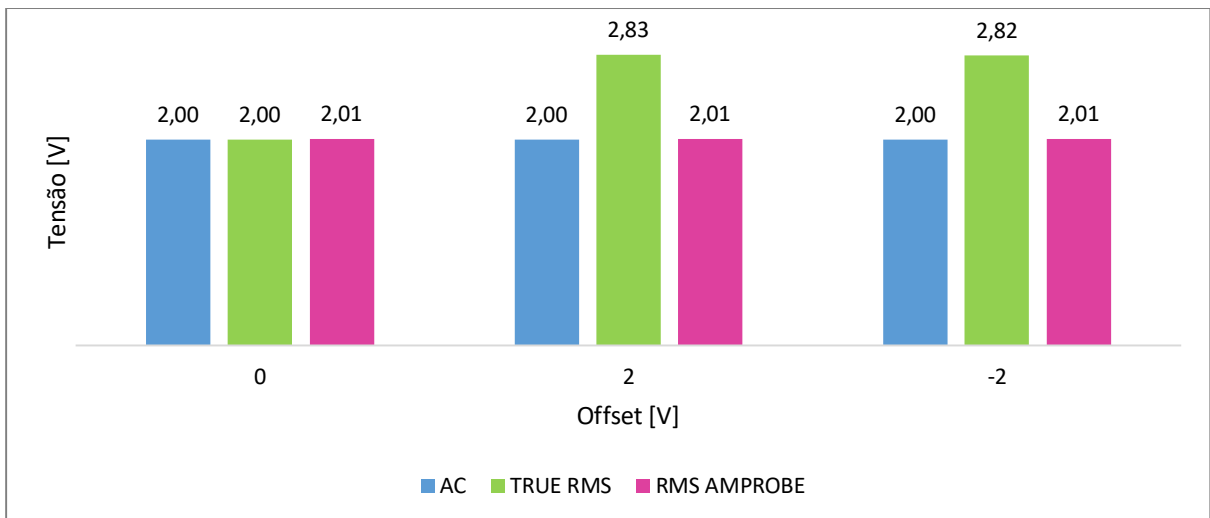
Fonte: O próprio autor.

Figura 36 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Amprobe para Onda Quadrada



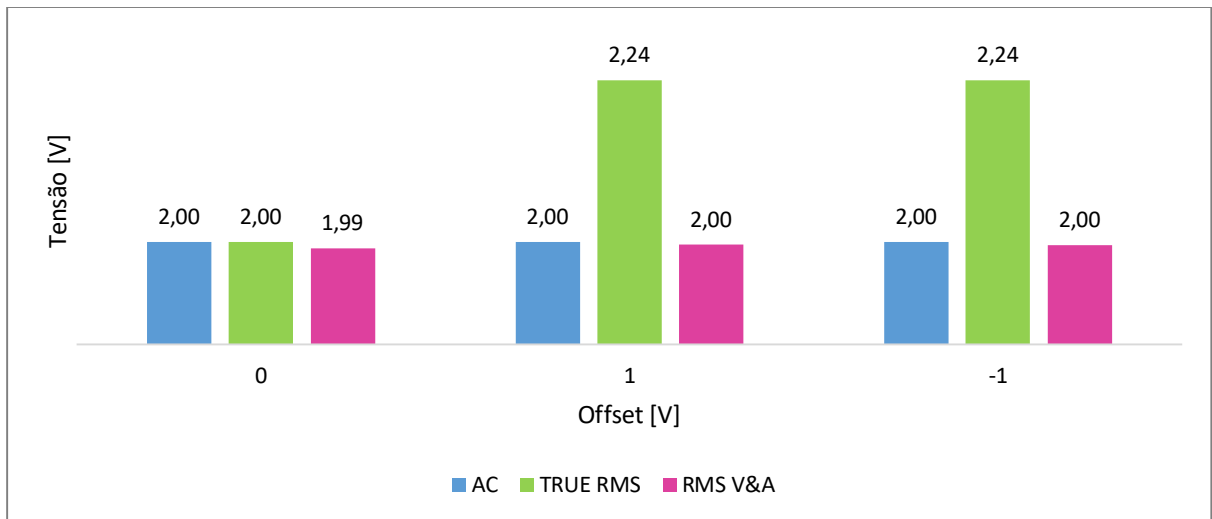
Fonte: O próprio autor.

Figura 37 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Amprobe para Onda Típica de um Conversor Multinível.



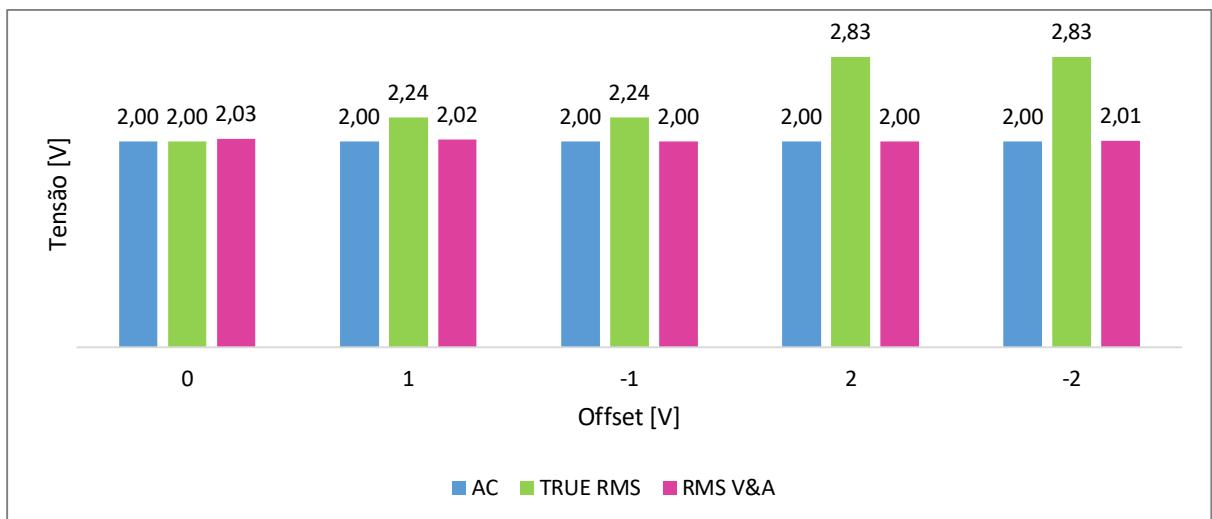
Fonte: O próprio autor.

Figura 38 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro V&A para Onda Senoidal



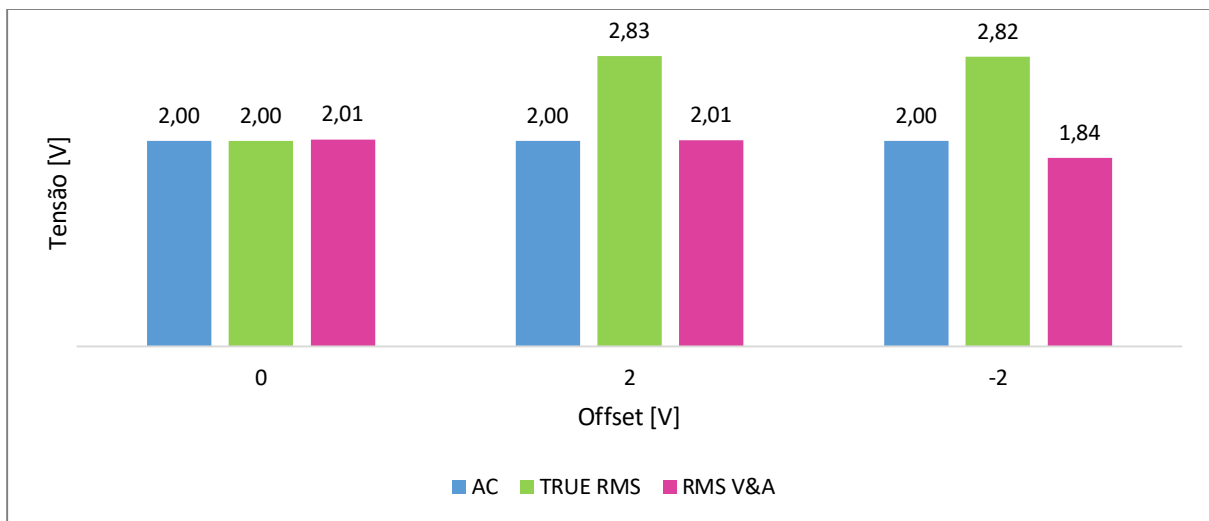
Fonte: O próprio autor.

Figura 39 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro V&A para Onda Quadrada



Fonte: O próprio autor.

Figura 40 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro V&A para Onda Típica de um Conversor Multinível.

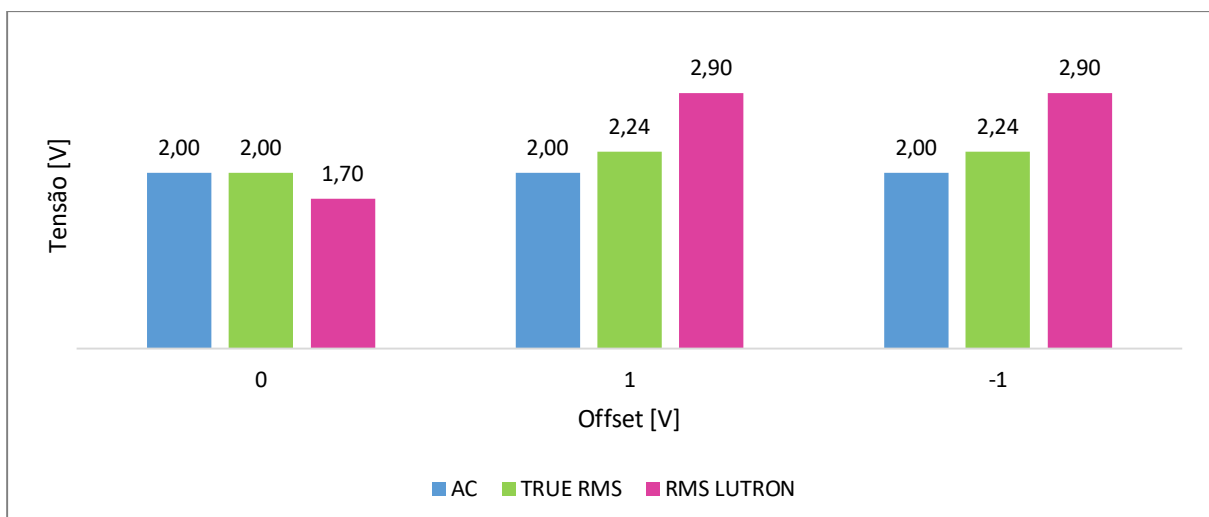


Fonte: O próprio autor.

É facilmente constatado também que com a presença de offset, até mesmo as ondas senoidais que deveriam ser medidas corretamente, possuem um erro na casa de 11%, e que quanto maior o valor desse offset, maior a porcentagem de erro na medição. Analisando-se os dados para o retificador de onda completa, medidos pelo multímetro da marca V&A, para um valor de offset de menos quatro volts, o erro da medição foi maior que 280%.

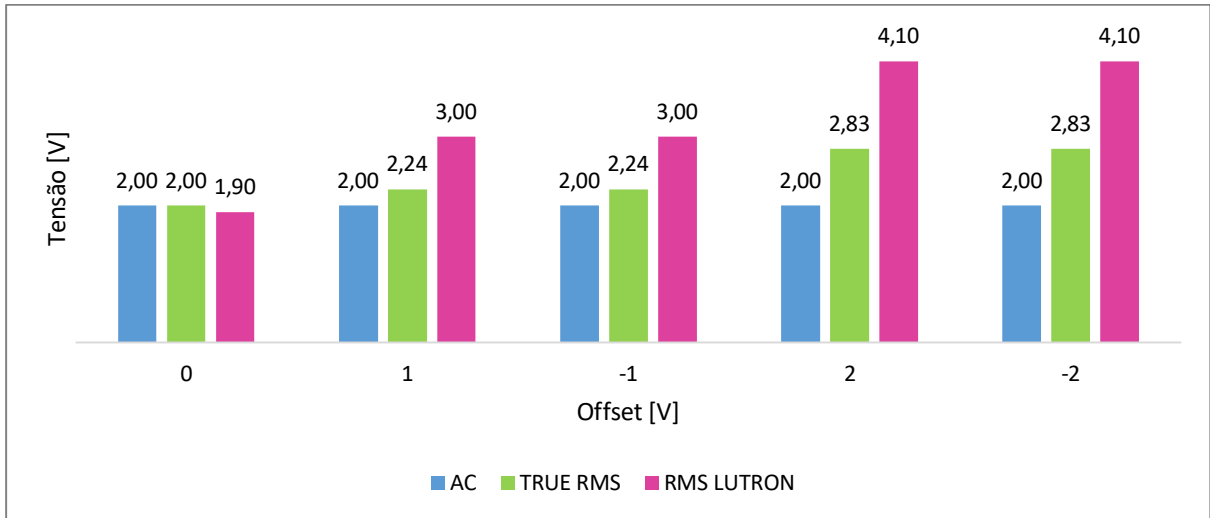
Para o multímetro da marca Lutron, observou-se ainda que os valores medidos foram todos acima dos valores teóricos, até mesmo para os casos da forma de onda senoidal, e podem ser constatados analisando as figuras a seguir.

Figura 41 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Lutron para Onda Senoidal



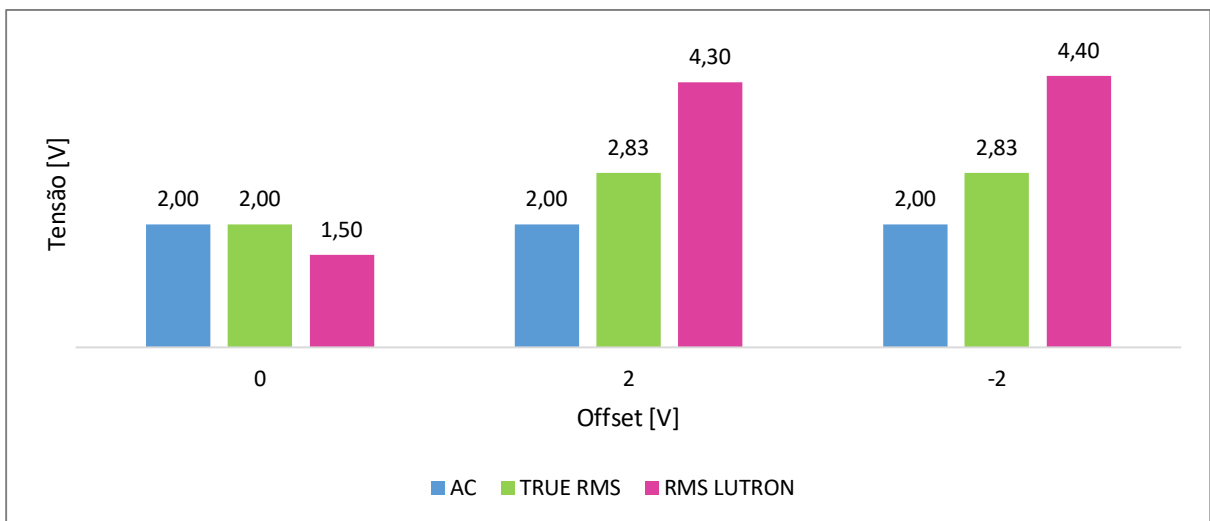
Fonte: O próprio autor.

Figura 42 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Lutron para Onda Quadrada



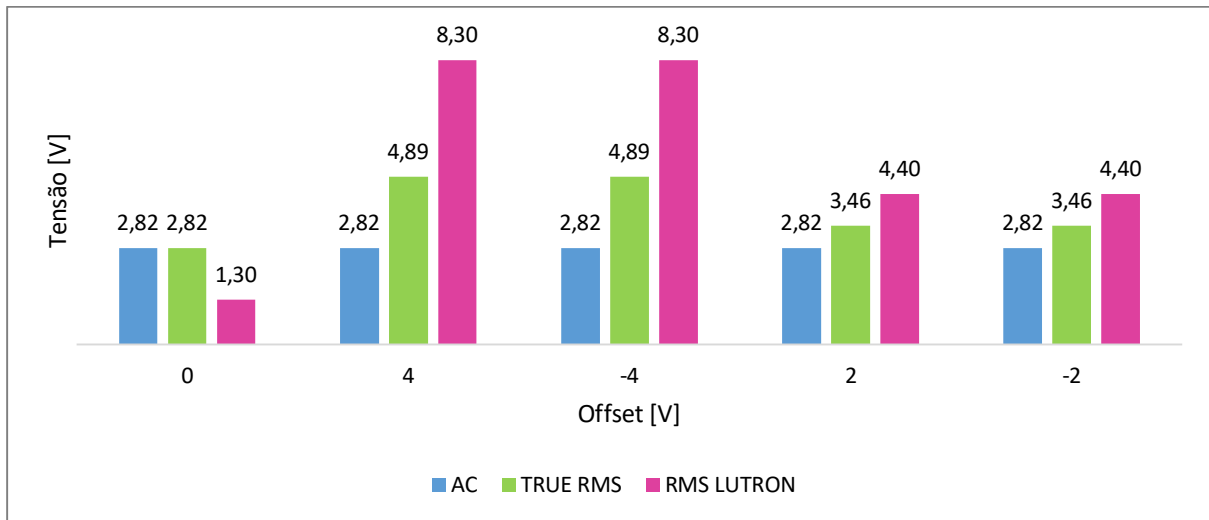
Fonte: O próprio autor.

Figura 43 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Lutron para Onda Típica de um Conversor Multinível



Fonte: O próprio autor.

Figura 44 - Gráfico Comparativo de Valores Teóricos e Valores Medidos pelo Multímetro Lutron para Onda Típica de um Retificador Monofásico.



Fonte: O próprio autor.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma revisão teórica relacionando parâmetros importantes para o entendimento do tema em questão, e diante disso, e dos resultados apresentados, pode-se concluir que medidores ditos como sendo *true rms* medem na verdade apenas a componente alternada do sinal, sem considerar o *offset* quando existente. Isso pode gerar erros em porcentagens significativas quando trata-se de sinais distorcidos, e quanto mais distante da forma de onda senoidal, maior o erro em questão.

Essa divergência de valores, quando se trata da necessidade de resultados para obtenção de parâmetros de tensão e correntes em fábricas, pode ser altamente prejudicial e comprometedora, visto que os equipamentos são sensíveis a variações mínimas destes parâmetros. E uma vez que o valor fornecido nas medições utilizando este tipo de equipamento mostrado no artigo, é consideravelmente menor que o valor real, os circuitos podem ser erroneamente dimensionados e a verificação de um possível defeito devido a flutuação de tensão não detectado de forma correta.

Por isso é possível concluir que a análise da energia deve ser feita com medidores que sejam homologados, estabelecidos pelas normas vigentes e testados para tal finalidade, afim de obter-se parâmetros aceitáveis para as medições.

REFERÊNCIAS

- [1] BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. New York, USA: IEEE Press, 2000.
- [2] NEWTONCBRAGA. **TRUE RMS - O que isso influi no seu equipamento (INS218)**. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/instrumentacao/108-artigos-diversos/6341-ins218>>. Acesso em: 23 jun. 2019.
- [3] PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENRGIA ELÉTRICA. **Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 18 julho, 2019.
- [3] NAKASHIMA, Kazuo. **Valor Médio e Eficaz**. Setembro, 2013a. Universidade Federal de Itajubá.
- [4] NAKASHIMA, Kazuo. **Valor Médio e Eficaz**. Setembro, 2013b. Universidade Federal de Itajubá.
- [5] NAKASHIMA, Kazuo. **Valor Médio e Eficaz**. Setembro, 2013c. Universidade Federal de Itajubá.
- [6] NAKASHIMA, Kazuo. **Valor Médio e Eficaz**. Setembro, 2013d. Universidade Federal de Itajubá.
- [7] NAKASHIMA, Kazuo. **Valor Médio e Eficaz**. Setembro, 2013e. Universidade Federal de Itajubá.
- [8] NAKASHIMA, Kazuo. **Valor Médio e Eficaz**. Setembro, 2013f. Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <https://www.academia.edu/10076286/True_RMS_vs._Average_Sensing>. Acesso em: 23 mar. 2019.
- [9] ATHOSELETRONICS. **True RMS e RMS – O que é?** Disponível em: <<https://athoselectronics.com/true-rms/>>. Acesso em: 23 mar. 2019.
- [10] ALVES, Mário. **ABC do Osciloscópio**. Março, 1998. 2ª Edição. Instituto Politécnico do Porto. Disponível em: <<https://www.ft.unicamp.br/~leobravo/TT%20305/O%20Osciloscopio.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- [11] PEREIRA, Ivo. **Projecto e Implementação de um Inversor Multinível**. Julho, 2008. 104 páginas. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Disponível em:

<<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57969/1/000136085.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

[12] BRAGA, H; BARBI, I. **Conversores Estáticos Multiníveis – Uma Revisão**. Abril, 2000. Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <<http://www.sba.org.br/revista/voll1/v11a262.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

[13] POMILIO, J.A. **Conversores ca-cc – Retificadores**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/eltpot/cap3.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2019.

[14] ZUIM, Edgar. Tiristores: Triac. Disponível em: < <http://www.ezuim.com/pdf/tirist2.pdf> >. Acesso em: 16 jun. 2019.

[15] KOMATSU, W; JUNIOR, L.; KAISER, W. **PEA-3487 Eletrônica de Potência I – Notas de Aula**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2708167/mod_resource/content/1/Apostila%20de%20Eletr%C3%B4nica%20de%20Pot%C3%Aancia%20vers%C3%A3o%20112_06mar%C3%A7o2017.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2019.