



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

VITOR CORREA FERNANDES ALVES

**Propostas para implementação de
Wattímetros baseados em Eletrônica
Analógica**

NITERÓI

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

VITOR CORREA FERNANDES ALVES

**Propostas para implementação de Wattímetros baseados em
Eletrônica Analógica**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador

Felipe Sass, D. Sc.

NITERÓI

2021

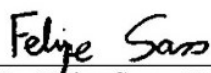
(Espaço reservado para a ficha catalográfica)

VITOR CORRÊA FERNANDES ALVES

PROPOSTAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE WATTÍMETROS BASEADOS EM
ELETRÔNICA ANALÓGICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial para a
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia
Elétrica.

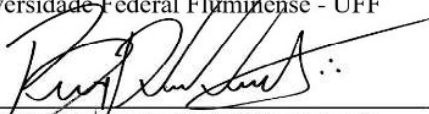
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Felipe Sass - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Bruno de Nadai Nascimento
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR



Prof. Dr. André da Costa Pinho
Universidade Federal Fluminense - UFF

Niterói
(fevereiro/2021)

Dedico este trabalho ao meu pai Sergio Fernandes e a minha mãe Maria Inês Corrêa, que nunca mediram esforços para me proporcionar todas as condições e oportunidades de ter uma boa base de estudos e de conhecimento, me dando condições para que eu chegasse até aqui.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado saúde e condições de estar aqui nesse momento, concluindo essa dissertação de mestrado. Obrigado por me abençoar em toda a minha vida e em toda minha trajetória acadêmica.

Gostaria de agradecer ao meu pai, por sempre estar ao meu lado, sendo meu grande incentivador e motivador, para que eu pudesse alcançar esse grande objetivo. Sempre me apoiando e me motivando nos momentos mais difíceis, em que eu mesmo duvidava da minha capacidade. Obrigado por ser meu grande Pilar.

Gostaria de agradecer a minha mãe e a minha irmã. Muito obrigado pelo carinho e pelo incentivo enorme que vocês sempre me deram.

Gostaria de agradecer a minha esposa, que sempre me apoiou e me incentivou para que eu pudesse alcançar esse objetivo. Muito obrigado por me apoiar de forma incondicional em todos os momentos que eu mais precisei.

Gostaria de agradecer aos professores da Escola de Engenharia da UFF, os quais eu tive o privilégio de conviver e aprender novos conhecimentos, que guardarei para sempre. Principalmente o professor Marcio Zamboti, com quem tive a oportunidade de desenvolver um artigo e aprender muito em suas disciplinas. Muito obrigado por todos os seus ensinamentos.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Felipe Sass, que desde o início da minha caminhada no mestrado esteve ao meu lado, sempre com muita paciência e muito conhecimento para me orientar da melhor forma possível, me ajudando a vencer todos os desafios. Muito obrigado por nunca ter desistido do nosso objetivo e por sempre me orientar da melhor forma possível. Obrigado por ter sido mais que um orientador, pois sempre foi um grande exemplo de vida e profissionalismo. Com certeza se tornou um grande amigo.

Resumo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de wattímetro baseado em eletrônica analógica. Um ponto de destaque para esse projeto é a implementação de parte dos cálculos utilizando uma eletrônica analógica, requisitando menor poder de processamento dos microcontroladores. A metodologia usada consiste, basicamente, na construção de um protótipo e realização de experimentos que visam avaliar o desempenho do equipamento e sua viabilidade operacional dentro dos parâmetros estabelecidos em comparação com aparelhos comercializados no mercado. Para alcançar os objetivos propostos foram usados os conceitos de potência e energia e seus desdobramentos teóricos. O circuito eletrônico usado no trabalho teve como componente principal um multiplicador analógico de quatro quadrantes - o AD633 – usado para fazer a multiplicação dos dois sinais analógicos de tensão e corrente transduzidos e condicionados. O resultado obtido foi uma tensão de saída proporcional à potência instantânea da carga analisada. As conclusões deste trabalho indicam que, apesar de ser sensível à ruídos e ao mal condicionamento dos sinais fornecidos pelos transdutores de tensão e corrente, a metodologia proposta para cálculo de potência ativa funciona e pode ser facilmente embarcada em outros dispositivos sem sobrecarregar o processamento realizado pelo microcontrolador.

Palavras-chaves: medição de potência, microcontrolador, multiplicadores analógicos, sinal analógico, wattímetro analógico

Abstract

The objective of this work is to develop a wattmeter prototype based on analog electronics. A highlight of this project is the implementation of part of the calculations using analog electronics, requiring less processing power from the microcontrollers. The methodology used basically consists of building a prototype and carrying out experiments that aim to evaluate the performance of the equipment and its operational viability within the parameters established in comparison with devices sold on the market. To achieve the proposed objectives, the concepts of power and energy and their theoretical developments were used. The electronic circuit used in the work had as main component a four-quadrant analog multiplier - the AD633 - used to multiply the two transduced and conditioned analog voltage and current signals. The result obtained was an output voltage proportional to the instantaneous power of the analyzed load. The conclusions of this academic work indicate that, despite being sensitive to noise and poor conditioning of the signals provided by voltage and current transducers, the proposed methodology for calculating active power works and can be easily loaded into other devices without overloading the processing performed by the microcontroller.

Keywords: analog multipliers, analog signal, analog wattmeter, power measurement, microcontroller

Lista de Figuras

Figura 1 - Fonte de tensão alternada senoidal que alimenta uma carga Z .	20
Figura 2 - Potência instantânea de uma carga puramente resistiva.	22
Figura 3 - Potência instantânea de uma carga indutiva.	23
Figura 4 - Potência instantânea de uma carga capacitiva.	23
Figura 5 - Potência Instantânea de uma carga genérica (Termo variável/Termo constante)	24
Figura 6 - Potência Instantânea de uma carga genérica (Contribuição do resistor/Contribuição do Indutor)	25
Figura 7 – Triângulo das potências.	27
Figura 8 – Tetraedro das potências	30
Figura 9 – Medidor eletromecânico. Fonte: [14].	31
Figura 10 – Diagrama de Blocos	33
Figura 11 – Amostragem de uma conversão Analógica/Digital	34
Figura 12 – Multiplicador analógico AD633	37
Figura 13 - Diagrama de blocos para cálculo do Valor Eficaz da Tensão.	38
Figura 14 - Transdução e condicionamento do sinal de tensão	39
Figura 15 – Filtro Passa Baixa cálculo da tensão eficaz	41
Figura 16 – Placa de Prototipagem Arduino UNO	42
Figura 17 – Código para Processamento do valor Eficaz de Tensão no Arduino	43
Figura 18 - Diagrama de blocos para cálculo do valor eficaz da corrente.	43
Figura 19 - Transdução e condicionamento do sinal de corrente.	45
Figura 20 – Filtro Passa Baixa cálculo da corrente eficaz	46
Figura 21 - Código para Processamento do Valor Eficaz de Corrente no Arduino	47
Figura 22 - Fluxograma para cálculo da potência ativa.	48
Figura 23 – Trecho do Código para Cálculo da Potência Ativa no Arduino	50
Figura 24 – Circuito construído no <i>proto board</i>	51
Figura 25 – Osciloscópio YOKOGAWA DL850 DIGITAL	52
Figura 26 – Fonte programável PACIFIC AFX 3120AFX	52
Figura 27 – Resistores de carga	52
Figura 28 - Diodo SKKH570/18E	53
Figura 29 – Multímetro Agilent 34401A	53
Figura 30 – Ponteira de corrente Tektronix a622	53
Figura 31 – Esquema dos ensaios para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição do valor eficaz de tensão.	55

Figura 32 – Tensão calculada pelo equipamento proposto em função do valor de adcv .	57
Figura 33 – Tensão medida (valores eficazes) com Wattímetro Analógico x Multímetro de Bancada	59
Figura 34 – Comparação do gráfico da tensão medida com o gráfico da tensão esperada no divisor de tensão	62
Figura 35 – Valor de k (razão entre os valores de pico medido e calculado) em função da tensão aplicada pela fonte.	62
Figura 36 - Esquema dos ensaios para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição do valor eficaz de corrente.	63
Figura 37 – Curva Corrente X adci	65
Figura 38- Corrente medida com Wattímetro Analógico x Fonte Programada	66
Figura 39 - Comparação do gráfico da corrente medida com o gráfico da corrente calculada na saída do condicionamento de sinais no caso de 15 Arms.	67
Figura 40 – Foto do ensaio montado em bancada	68
Figura 41 – 1 resistor em paralelo	69
Figura 42 – 2 resistores em paralelo	69
Figura 43 – 7 resistores em paralelo	69
Figura 44 – 7 ramos em paralelo, com 2 resistores em série por ramo	69
Figura 45 – Comparação das formas de onda obtidas na simulação com as obtidas analiticamente para a potência desejada de 4500 W.	71
Figura 46 – Janela selecionada para comparação dos sinais de potência instantânea obtidos na simulação e analiticamente para a potência desejada de 4500 W.	72
Figura 47 – Comparação dos sinais de potência instantânea após o filtro (pc) obtidos na simulação e analiticamente para a potência desejada de 4500 W.	73
Figura 48 – Resultados apresentados no terminal serial da simulação para a potência desejada de 4500 W.	73
Figura 49 - Potência X adcp	74
Figura 50 - Potência medida com Fonte Programada x Wattímetro Analógico	75
Figura 51 – Comportamento das formas de onda obtidas nos ensaios experimentais para a potência deseja de 2500 W.	76
Figura 52 – Janela selecionada mostrando a defasagem das curvas de tensão e corrente condicionadas	77
Figura 53 – Comparação dos sinais de tensão medido e calculado.	79
Figura 54 - Comparação dos sinais de corrente medido e calculado.	79
Figura 55 - Comportamento das formas de onda obtidas nos ensaios experimentais com a dição no circuito de carga resistiva	80
Figura 56 - Janela selecionada mostrando a defasagem das curvas de tensão e corrente condicionadas	81
Figura 57 - Esquema dos ensaios para avaliação de desempenho do circuito com diodo em série com a carga	81
Figura 58 - Comportamento das formas de onda obtidas no ensaio experimental do circuito com diodo	83
Figura 59 - Forma de onda da corrente obtida com o sensor de efeito Hall.	84

Figura 60 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 100 V	91
Figura 61 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 110 V	92
Figura 62 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 120 V	92
Figura 63 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 130 V	93
Figura 64 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 140 V	93
Figura 65 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 150 V	94
Figura 66 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 160 V	94
Figura 67 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 170 V	95
Figura 68 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 180 V	95
Figura 69 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 190 V	96
Figura 70 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 200 V	96
Figura 71 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 5 A	97
Figura 72 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 10 A	98
Figura 73 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 15 A	98
Figura 74 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 500 w	99
Figura 75 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 1000 w	100
Figura 76 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 1500 w	100
Figura 77 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 2000 w	101
Figura 78 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 2500 w	101
Figura 79 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 3000 w	102
Figura 80 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 3500 w	102
Figura 81 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 4000 w	103
Figura 82 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 4500 w	103
Figura 83 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 5000 w	104
Figura 84 – Formas de onda de um modelo de circuito com diodo em serie com uma carga resistiva	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Análise de desempenho do circuito medidor de tensão.	56
Tabela 2– Tensão medida com correção	60
Tabela 3 – Análise de desempenho do circuito medidor de corrente	64
Tabela 4 - Análise de desempenho do medidor de potência ativa na simulação	70
Tabela 5 - Análise de desempenho do medidor de potência no ensaio experimental	74
Tabela 6 – Parâmetros fixos do ensaio	77
Tabela 7 – Análise de desempenho do circuito medidor de potência com carga resistiva	78
Tabela 8 – Análise do circuito medidor de potência com carga resistiva	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente alternada

CC – Corrente continua

RMS – *Root Mean Square*

THD – *Total Harmonic Distortion*

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	16
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivos	18
1.3. Organização do trabalho	18
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica	19
2.1 Potência e Energia	19
2.1.1 Potência em condições senoidais.....	19
2.1.1.1 Potência ativa.....	25
2.1.1.2 Potência reativa.....	26
2.1.1.3 Potência aparente	26
2.1.1.4 Fator de potência	27
2.1.2 Potência em condições não senoidais	28
2.2. Medição de Energia	30
2.2.1 Medidores de energia eletromecânicos.....	30
2.2.2 Medidores de energia eletrônicos	32
2.2.3 Medidores baseados em eletrônica analógica.....	34
2.2.4 Medidores de baixo custo e seu uso em IoT (Internet das Coisas).....	35
Capítulo 3 – Metodologia	37
3.1 Funcionamento do Multiplicador Analógico AD633.....	37
3.2. Medição do valor eficaz de tensão	38
3.2.1 Transdutor de tensão e condicionamento de sinais	39
3.2.2 Atuação do Multiplicador Analógico	40
3.2.3 Filtros RCs.....	40
3.2.4 Processamento	41
3.3 Medição do valor eficaz de corrente	43
3.3.1 Transdutor de corrente e condicionamento de sinais.....	44
3.3.2 Atuação do Multiplicador Analógico	45
3.3.3 Filtro RC.....	46
3.3.4 Processamento	46
3.4 Medição de potência	48
3.5 Construção do protótipo	50
3.5.1 Procedimentos de calibração	51
3.5.2 Equipamentos utilizados nos ensaios experimentais	51
Capítulo 4 – Resultados e Discussões.....	55

4.1 Medição do valor eficaz de tensão.....	55
4.1.1 Descrição do ensaio	55
4.1.2 Resultados dos primeiros ensaios de tensão medida	56
4.1.3 Resultado do segundo ensaio de tensão medida	59
4.1.4 Investigação do comportamento não-linear apresentado pelo equipamento proposto	60
4.2 Medição do valor eficaz de corrente	63
4.2.1 Descrição do ensaio	63
4.2.2 Resultado dos primeiros ensaios de corrente medida	64
4.3 Medição de Potência Ativa.....	68
4.3.1 Descrição do ensaio	68
4.3.2 Análise dos resultados	69
4.4 Teste com carga resistiva	77
4.4.1 Descrição do ensaio	77
4.4.2 Análise de resultados	78
4.5 Teste com carga resistiva com diodo	81
4.5.1 Descrição do ensaio	81
4.5.2 Análise de resultados	81
Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros.....	85
5.1. Trabalhos futuros	86
Bibliografia	88
Apêndice A - Formas de onda obtidas nos ensaios de tensão	91
Apêndice B - Formas de onda obtidas nos ensaios de corrente.....	97
Apêndice C - Formas de onda obtidas nos ensaios de potência	99
Apêndice D - Cálculos dos valores analíticos no circuito com adição do diodo.....	105

Capítulo 1 – Introdução

A energia elétrica é o que move uma indústria ou uma residência, sendo também um de seus maiores custos [1]. Em tempos recentes, a sustentabilidade e a eficiência energética passaram a ser um compromisso de toda sociedade, especialmente por parte da indústria. No Brasil, o custo de energia tem um grande impacto no preço final dos produtos, e por isso existe uma preocupação por parte dos fabricantes com o impacto deste custo no orçamento da empresa. Isso motiva os empresários a buscarem constantemente ações que possam aumentar a eficiência energética. O crescimento das demandas energéticas exige uma necessidade cada vez maior de precisão e eficácia na medição de consumo energético, tornando comum o uso de dispositivos eletrônicos nesta função. Além disso, muitos equipamentos elétricos instalados em uma planta industrial ou até mesmo em uma residência precisam de medição e controle [2], visando o uso de energia elétrica de forma eficiente, com custos e perdas menores.

É crescente a preocupação da população com selos de eficiência energética [2], porém a energia consumida por aparelhos eletrônicos e elétricos não é facilmente identificada pelo consumidor. Muitos aparelhos somente apresentam informações de consumo de energia através de uma etiqueta. Em muitos casos, se trata de um valor médio ou máximo, uma vez que estes aparelhos podem apresentar na prática um consumo diferente daquele especificado [2].

Atualmente existem duas soluções: os equipamentos digitais e os equipamentos analógicos. Neste trabalho, o termo “medidor analógico” não se refere a um medidor eletromecânico, mas sim, a um medidor baseado em eletrônica analógica. As duas soluções de medição têm vantagens e desvantagens. Os dispositivos digitais oferecem excelente precisão e fornecem vários recursos e parâmetros de medição, mas são sensíveis à presença de harmônicos e à pequenas variações na frequência da rede [3]. Já a solução analógica possui maior estabilidade [3], fornecendo mais segurança na medição independentemente das formas de onda. Entretanto, como será discutido neste trabalho, o medidor analógico é sensível ao mal condicionamento de sinais dos sensores de tensão e corrente.

Dessa forma, este trabalho apresenta o projeto de um wattímetro analógico de baixo custo. Este equipamento utiliza um multiplicador analógico de quatro quadrantes para realizar operações matemáticas em tempo real, o que na solução digital seria realizado por um microcontrolador, evitando problemas de integração numérica, além de apresentar resultados confiáveis de medição de potência para diferentes cargas e considerando a presença de harmônicos na rede. Uma das vantagens desta solução é exigir menos processamento por parte dos microcontroladores, deixando-os livres para executar funções secundárias, como conexão com a internet e gerenciamento dos resultados em um banco de dados. Em outras palavras, o medidor analógico aqui proposto é de certa forma inspirado na filosofia da internet das coisas.

Motivação

Nos últimos anos, principalmente após o surgimento da plataforma Arduino, a população em geral foi introduzida à programação de microcontroladores. Isso se deve ao surgimento de plataformas de desenvolvimento de fácil utilização e de *kits* de fácil conexão (*shields*). Com o aumento do interesse pelo assunto, surgiram diversas soluções para problemas cotidianos desenvolvidas, muitas vezes, por indivíduos com pouco ou nenhum conhecimento técnico. Dentre estas soluções se destacam os medidores de energia e wattímetros com microcontroladores de baixo custo integrados à rede para monitoramento de consumo de energia.

A internet apresenta uma infinidade de projetos para esta aplicação, muitos deles, entretanto, são limitados dos pontos de vista conceitual e técnico. O fato é que muitos dos microcontroladores usados não possuem a capacidade para realizar o processamento com a precisão e a rapidez necessárias para esta aplicação. Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma interface que realize parte dos cálculos de forma analógica, não sobrecarregando o microcontrolador de baixo custo e deixando-o livre para executar outras funções.

Este trabalho abre possibilidades para futuras pesquisas e aplicações, uma vez que o equipamento proposto pode ser embarcado em outros dispositivos, adicionando outras funcionalidades e proporcionando um fácil controle das informações de potências das cargas de uma indústria ou de uma residência.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da metodologia proposta para medição de potência ativa através do uso de multiplicadores analógicos. Para que este objetivo geral fosse atingido, este trabalho teve como objetivos específicos o projeto, a construção e a análise de desempenho por meio de simulações e experimentos de um protótipo de wattímetro baseado em eletrônica analógica, aqui chamado de wattímetro analógico.

1.2. Organização do trabalho

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte maneira: a presente *introdução* que apresentou a contextualização da pesquisa, seus objetivos e motivações. Seguida pelo *Capítulo 2*, que consiste na fundamentação teórica através dos conceitos de potência em condições senoidais e não senoidais e de medição de energia. O *Capítulo 3* que indica a metodologia aplicada no desenvolvimento do equipamento proposto e nos ensaios experimentais. O *Capítulo 4*, que descreve os ensaios e seus resultados, as análises de possíveis causas para as não-linearidades obtidas e soluções para melhorar o desempenho do aparelho projetado. E, por fim, o *Capítulo 5*, que traz as conclusões e sugestões para futuros projetos.

Capítulo 2 - Fundamentação Teórica

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos necessários para a compreensão das etapas seguintes do projeto. Ao longo do texto são apresentadas as definições de potência e energia, além de uma breve contextualização sobre os tipos de medidores de energia disponíveis no mercado.

2.1 Potência e Energia

A potência é a grandeza responsável pela medição da velocidade com que a energia elétrica se transformada em outra forma de energia, ou seja, é a velocidade em que se realiza um trabalho elétrico [4]. Todos os equipamentos que necessitam de energia elétrica para funcionar, ao receberem essa energia, a transformam em outra forma de energia. No caso de uma resistência, por exemplo, a energia elétrica é transformada em energia térmica. A unidade de energia elétrica, no Sistema Internacional, é o joule (J), porém, na conta de consumo de eletricidade das residências, enviada pelas concessionárias de energia, a unidade de medida é apresentada como quilowatt hora (kWh).

Em sistemas de corrente alternada, pode-se definir potência elétrica instantânea (p) como uma grandeza de potência que varia continuamente com o tempo, calculada através da energia elétrica transformada (ΔE), ou trabalho realizado ($\Delta \tau$), em um intervalo de tempo infinitesimal (Δt), ou seja, um intervalo de tempo considerado muito pequeno [4]. Analogamente, a potência instantânea de um elemento de circuito pode ser calculada pelo produto da tensão (v) sobre este elemento e da corrente (i) que o percorre, como apresentado na equação (1).

$$p(t) = \frac{\Delta \tau}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = v(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

2.1.1 Potência em condições senoidais

Considerando sistemas monofásicos em condições senoidais, a tensão, a corrente e a potência instantânea de cada elemento variam no tempo. A análise da potência

instantânea em condições senoidais, deu origem aos conceitos de potência ativa (P), potência reativa (Q), potência aparente (S) e fator de potência (fp). Esta situação é ilustrada no circuito representado na Figura 1, que é alimentado pela tensão $v(t)$, matematicamente representada pela equação (1):

$$v(t) = V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta_V) \quad (1)$$

onde V_p é o valor máximo, ou de pico, de $v(t)$ em V; ω é a frequência angular de $v(t)$ em rad/s; e θ_V é o ângulo inicial (em $t = 0$ s) da função senoidal presente na equação (1) em rad.

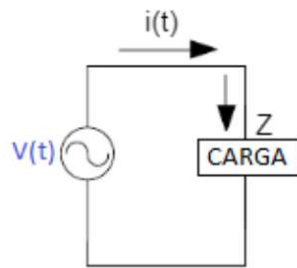


Figura 1 - Fonte de tensão alternada senoidal que alimenta uma carga Z .

Como $v(t)$ é puramente senoidal, a corrente na impedância complexa $\bar{Z} = R \pm jX$ também será. Esta corrente, $i(t)$, pode ser matematicamente representada pela equação (2):

$$i(t) = I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta_I) \quad (2)$$

onde I_p é o valor máximo, ou de pico, de $i(t)$ em A; θ_I é o ângulo inicial (em $t = 0$ s) da função senoidal presente na equação (2) em rad. Considerando:

$$\theta_V = 0, \quad (3)$$

e sabendo que o ângulo da impedância (φ) é dado por

$$\varphi = \theta_V - \theta_I = 0 - \theta_I = -\theta_I, \quad (4)$$

então:

$$\theta_I = -\varphi \quad (5)$$

Substituindo a equação (3) na equação (1) e a equação (5) na equação (2), obtém-se:

$$v(t) = V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (6)$$

$$i(t) = I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \varphi) \quad (7)$$

Como $v(t)$ e $i(t)$ são variáveis no tempo, conseqüentemente a potência não será constante no tempo. A potência instantânea $p(t)$ na impedância $\bar{Z}$ do circuito da Figura 1 pode ser determinada pelo produto da tensão instantânea pela corrente instantânea. Assim, substituindo as equações (6) e (7) na equação (1):

$$p(t) = V_p \cdot I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \varphi) \quad (8)$$

Considerando a identidade trigonométrica

$$\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\beta) = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)], \quad (9)$$

e aplicando a equação (9) na equação (8), tem-se como resultado a equação (10):

$$p(t) = V_p \cdot I_p \cdot \left[\frac{1}{2} \cos(\omega \cdot t - \omega \cdot t + \varphi) - \frac{1}{2} \cos(\omega \cdot t + \omega \cdot t - \varphi) \right]. \quad (10)$$

Simplificando a equação (10), chega-se à Equação Geral da Potência Instantânea:

$$p(t) = \frac{1}{2} V_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi) - \frac{1}{2} V_p \cdot I_p \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi) \quad (11)$$

A equação da potência instantânea é composta por duas partes que são diferentes em relação ao tempo. A primeira parte é constante e a segunda parte é oscilatória, possuindo o dobro da frequência da tensão e da corrente, como observado na equação (11) [4] [5]. O termo da equação (11) que varia cossenoidalmente tem seu valor médio igual a zero [4] [5].

A Figura 2 ilustra o comportamento da potência instantânea (azul) de uma carga resistiva, decomposta nos termos constante (verde) e variável (laranja). Nota-se que, para uma carga puramente resistiva, a potência instantânea sempre será positiva. O valor médio da potência instantânea da carga resistiva é igual ao termo constante, sendo esse o primeiro termo da equação (11).

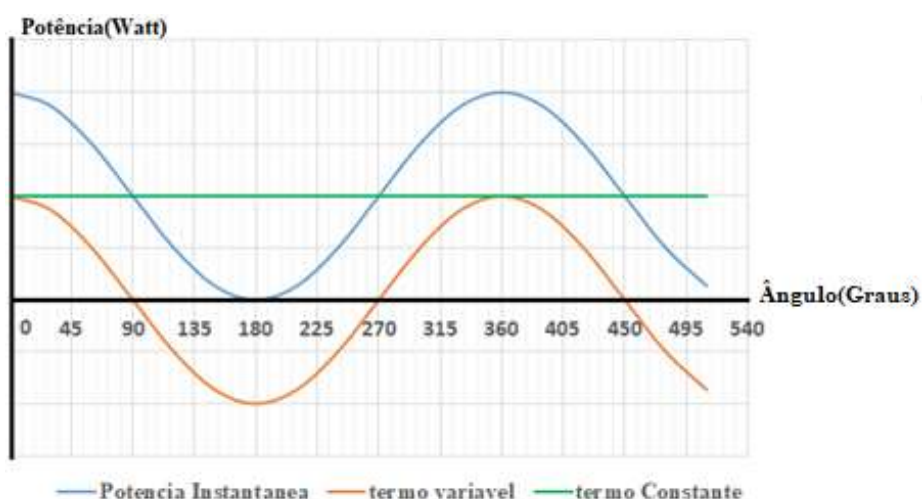


Figura 2 - Potência instantânea de uma carga puramente resistiva.

A Figura 3 ilustra o comportamento da potência instantânea em uma carga puramente indutiva. Neste caso, a potência instantânea oscila de forma cossenoidal, sendo formada apenas pela parte variável da equação (11). Portanto o valor médio desta potência é nulo. Esse caso se caracteriza como uma transferência de energia para a carga, ou seja, no campo magnético do indutor e devolução de energia para a fonte, não caracterizando consumo de energia.

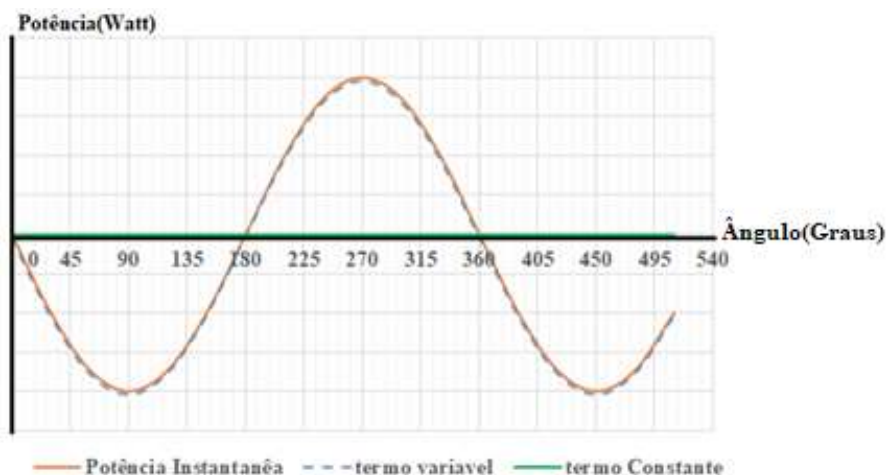


Figura 3 - Potência instantânea de uma carga indutiva.

A Figura 4, representa o exemplo de uma carga capacitiva. A potência instantânea da carga indutiva, assim como no exemplo anterior (Figura 3), é formada apenas pela parte variável da equação (11). Porém, no caso da carga capacitiva o comportamento da potência instantânea será oposto ao da carga indutiva, considerando que ambas as cargas sejam alimentadas pela mesma tensão, como pode ser observado pela Figura 4. O comportamento oposto dessas cargas é o motivo pelo qual o capacitor é utilizado na correção do fator de potência em instalações com cargas indutivas. Neste caso, o capacitor tem a função de alinhar as curvas de tensão e corrente, considerando que uma carga capacitiva antecipa a corrente e uma carga indutiva adianta a tensão [5].

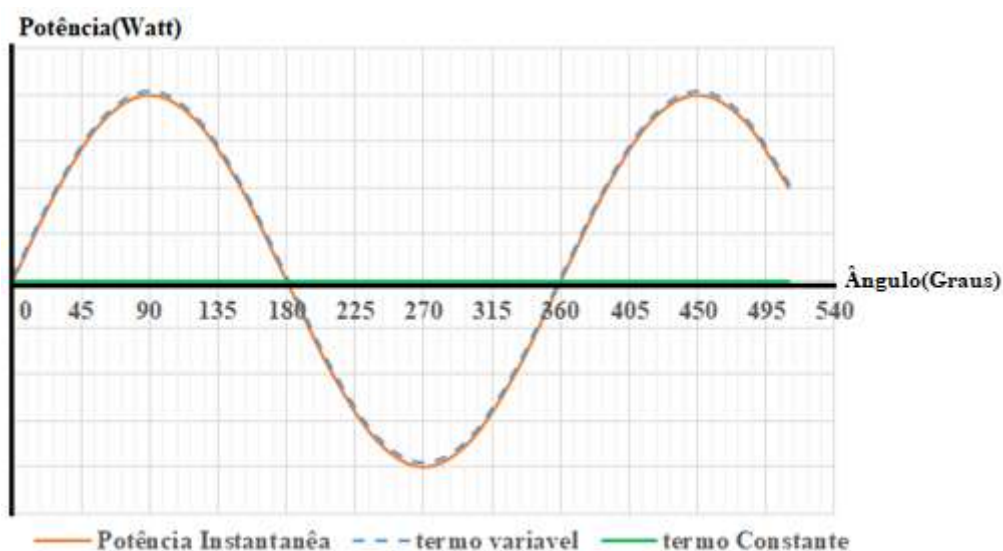


Figura 4 - Potência instantânea de uma carga capacitiva.

A Figura 5, representa uma carga genérica, onde a potência instantânea resultante (cor laranja), terá um comportamento oscilante, variando com partes negativas e positivas em diferentes instantes de tempo. Esse comportamento é diferente de uma carga resistiva, pois a potência instantânea em uma carga resistiva é sempre maior ou igual a zero. No caso de uma carga genérica, como por exemplo uma carga RL (Resistência e Indutância), a componente constante (verde) representa o valor médio da potência instantânea.

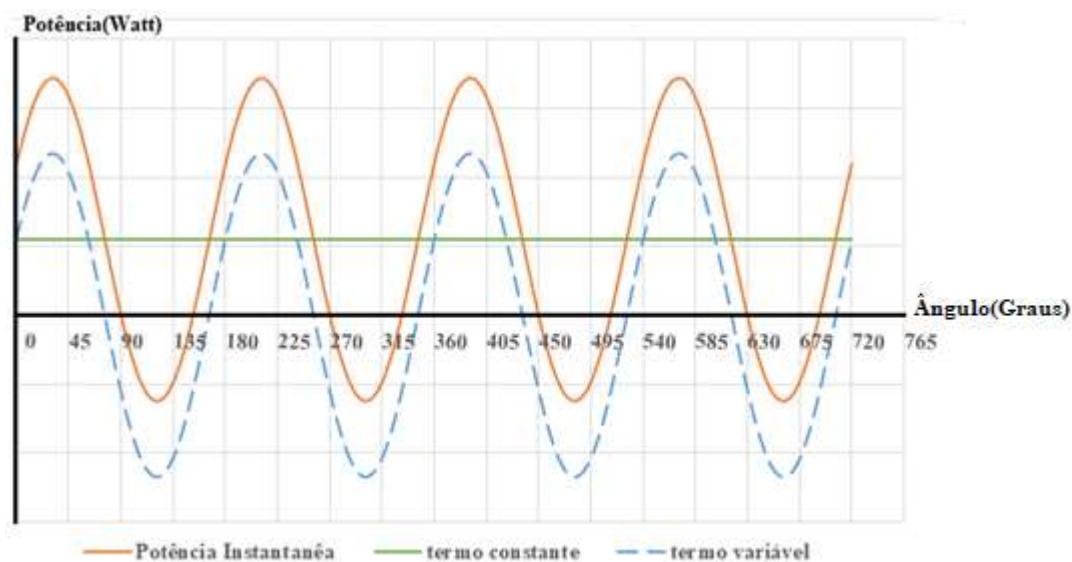


Figura 5 - Potência Instantânea de uma carga genérica (Termo variável/Termo constante)

A Figura 6, continua representando o exemplo de uma carga genérica, como por exemplo uma carga RL, porém nessa figura é possível observar que a potência instantânea resultante é formada por dois componentes: a contribuição do resistor (preto) e a contribuição do indutor (Azul).

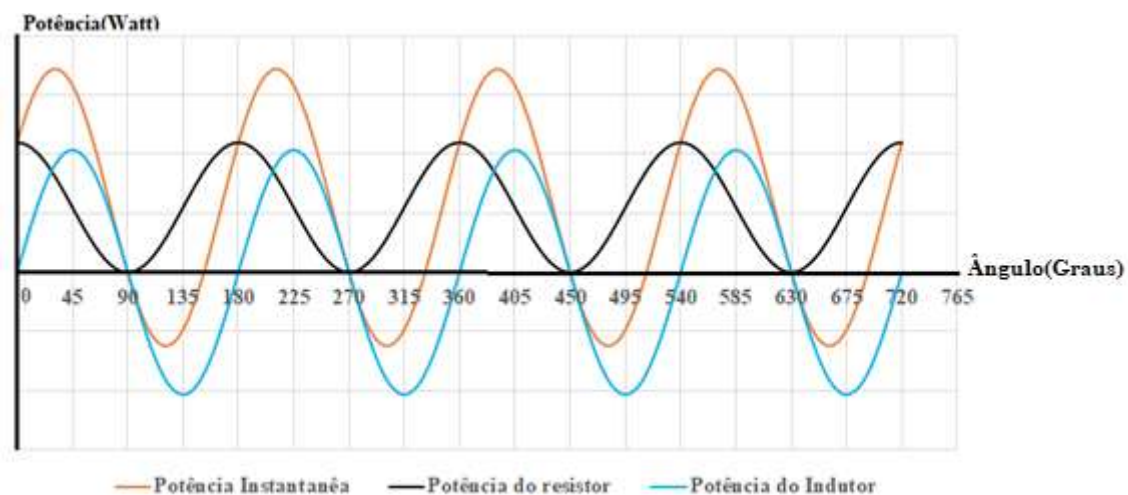


Figura 6 - Potência Instantânea de uma carga RL genérica (Contribuição do resistor/Contribuição do Indutor)

2.1.1.1 Potência ativa

A potência ativa pode ser denominada como potência média ou potência real. Ela é a parcela da potência que produz o trabalho elétrico útil e por isso é associada à componente resistiva da carga. Nos equipamentos, é a parte da potência transferida sob forma de calor, luz, ou para o eixo do motor sob forma de potência mecânica, dentre outras formas de trabalho.

O cálculo da potência ativa (P) é feito considerando o valor médio da potência instantânea, como consta na equação (12) [1][3].

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (12)$$

O valor médio da potência instantânea é equivalente à parte constante da equação (11), aqui denominada P_{cte} . A potência média total (ou potência ativa) é dada pela soma das potências médias do termo constante e do termo variável. Como o valor médio da potência do termo variável é nulo, então a potência média total é dada apenas pelo termo constante, resultando na equação (14).

$$P = P_{cte} = \frac{1}{2} V_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi) \quad (14)$$

Para uma senoide, sabe-se que $V_p = \sqrt{2} \cdot V_{ef}$ e $I_p = \sqrt{2} \cdot I_{ef}$, onde V_{ef} é o valor eficaz de tensão e I_{ef} é o valor eficaz de corrente. Assim, considerando a potência média em relação aos valores eficazes, tem-se:

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi) \quad (15)$$

2.1.1.2 Potência reativa

A potência reativa é associada à parcela da potência que não é convertida em trabalho útil, ou seja, a energia que circula no circuito que pode ser absorvida e devolvida sem produzir trabalho. Por isso, a potência reativa está ligada às cargas indutivas e capacitivas [4], [6].

A representação da potência reativa se dá pela letra Q e sua unidade de medida é Volt-Ampere reativo (Var). O valor da potência reativa equivale à contribuição do indutor ou capacitor, para o valor final da potência instantânea. A potência reativa pode ser calculada através da equação (16).

$$Q = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin(\varphi) \quad (16)$$

2.1.1.3 Potência aparente

A potência aparente é definida pela combinação entre as potências ativa e reativa do circuito. Seu valor numérico é dado pelo produto:

$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} \quad (17)$$

A potência aparente é representada pela letra S , sendo a unidade de medida Volt Ampère (VA) [1] [5]. Considerando que as potências ativa e reativa podem ser escritas em função da potência aparente, substituindo a equação (17) na equação (15) e na equação (16) tem-se:

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \quad (18)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (19)$$

Assim, pode-se concluir:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (20)$$

A equação (20) caracteriza matematicamente um triângulo de potências, como mostra a Figura 7. É um triângulo retângulo, onde a hipotenusa é a potência aparente S e os catetos do triângulo são a potência ativa P e a potência reativa Q. Esses conceitos são considerados em condições puramente senoidais [1][3].

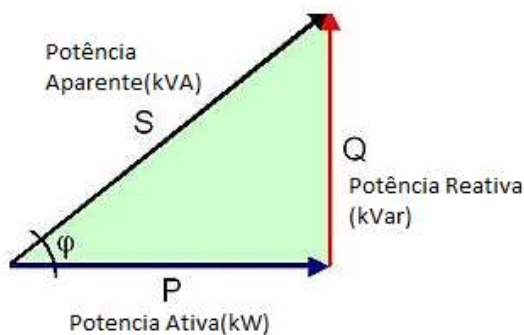


Figura 7 – Triângulo das potências.

2.1.1.4 Fator de potência

O fator de potência de um sistema elétrico que opera em corrente alternada (CA) é definido matematicamente pela razão entre a potência ativa e a potência aparente. Utilizando a definição da equação (17), a equação (21) define o fator de potência (FP) [5] [6].

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi)}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \cos(\varphi) \quad (21)$$

O valor do fator de potência é dado pela razão entre a potência ativa e a potência aparente, como consta na equação (21). Com essa equação é possível obter a eficiência com que a energia está sendo utilizada pela carga, ou seja, quanto da energia total está realmente exercendo trabalho útil [6]. Como referência, considere o fator de potência perfeito igual a 1 – sendo este o valor utópico do rendimento energético máximo, onde potência aparente é igual a potência ativa [4] [5] [6]. Portanto, analisando a equação (21), o fator de potência é definido por $\cos(\varphi)$ onde φ é o ângulo da impedância. O fator de potência pode estar atrasado, no caso de uma carga indutiva, ou adiantado, no caso de uma carga capacitiva [6].

2.1.2 Potência em condições não senoidais

O estudo de potências em condições não senoidais é referente a cargas não lineares, ou seja, cargas que não estabelecem uma relação linear entre a tensão e a corrente. Por exemplo, dispositivos que utilizam diodos, tiristores e fontes chaveadas consomem uma corrente não linear. A tensão (v) e a corrente (i) elétrica não senoidais são descritas conforme a série de Fourier, como apresentado nas equações (22) e (23) [7]:

$$v(t) = V_M + \sum_{n=1}^{\infty} V_{P_n} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \theta_{PV_n}) \quad (22)$$

onde V_M é o valor médio da tensão; V_{P_n} é o valor de pico do harmônico de ordem n da tensão, ω é a frequência angular de $v(t)$ em rad/s e; θ_{PV_n} é o ângulo de fase do harmônico de ordem n da tensão.

$$i(t) = I_M + \sum_{n=1}^{\infty} I_{P_n} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \theta_{PI_n}) \quad (23)$$

onde I_M é o valor médio da corrente; I_{P_n} é o valor de pico do harmônico de ordem n da corrente; ω é a frequência angular de $i(t)$ em rad/s e; θ_{PI_n} é o ângulo de fase do harmônico de ordem n da corrente.

A potência instantânea pode ser calculada pelo produto da tensão e da corrente não senoidais mostradas nas equações (22) e (23). Usando essas mesmas equações e tendo como referência a fórmula da equação (12), o valor da potência média pode ser calculado através da equação (24).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\left(V_M + \sum_{n=1}^{\infty} V_P \sin(n \cdot \omega \cdot t + \theta_{PV}) \right) \cdot \left(I_M + \sum_{n=1}^{\infty} I_P \sin(n \cdot \omega \cdot t + \theta_{PI}) \right) \right] dt \quad (24)$$

Pode-se considerar que num sistema elétrico de potência, as componentes harmônicas relevantes são as primárias, pois as harmônicas de ordem elevada terão uma amplitude cada vez menor e por isso serão desprezíveis [6].

O aumento do uso de cargas não lineares tem gerado uma distorção das formas de onda de tensão e corrente do sistema elétrico. O sistema elétrico foi projetado para operar com uma frequência fundamental de 60 Hz, por isso todas as outras frequências que se encontram no sistema elétrico podem ser consideradas distorções harmônicas indesejáveis para o sistema [8]. Várias teorias e conceitos foram criados ao longo dos anos para definir as propriedades de potências não senoidais. A teoria de Constantin Budeanu considera que em condições não senoidais, a potência aparente é composta por duas componentes ortogonais, sendo elas a potência ativa e a potência não ativa – esta dividida entre potência reativa de Budeanu e potência de distorção [9] [10].

Usando como base a teoria de Constantin Budeanu, em condições não senoidais devem ser consideradas: a potência ativa, já definida como a potência média calculada na equação (24); a componente de potência reativa, que é calculada pela soma das potências reativas de cada ordem harmônica múltipla da frequência fundamental observada na equação (25); e a potência de distorção harmônica que consiste no resultado da equação (26) [9] [10].

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_{ef.n} \cdot I_{ef.n} \cdot \sin(n\theta) \quad (25)$$

A potência de distorção (D), é dada por:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (26)$$

A partir da equação (26), a potência aparente em condições não senoidais pode ser calculada pela equação (27):

$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (27)$$

A potência aparente será formada pela potência ativa, a potência reativa e a potência de distorção definida por Budeanu. Estas potências podem ser representadas graficamente, como ilustrado na Figura 8, que apresenta o tetraedro de potências [8].

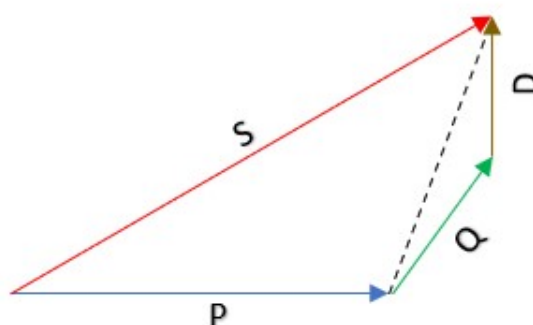


Figura 8 – Tetraedro das potências

2.2. Medição de Energia

Existem diferentes formas de obter a correta medição do consumo de energia elétrica referente a uma carga. Ao longo do tempo foram aperfeiçoados alguns tipos de medidores, visando dois objetivos: obter maior segurança e dados mais confiáveis nas medições e monitorar de forma correta o consumo de uma carga.

2.2.1 Medidores de energia eletromecânicos

A medição com tecnologia eletromecânica é a mais antiga. Esse medidor tem como característica predominante a robustez do equipamento. No entanto, ao longo do tempo, o aparelho apresentou facilidades para ser adulterado. Aos poucos, o medidor eletromecânico foi se tornando obsoleto em termos de tecnologia, além de apresentar alto custo de manutenção.

O princípio de funcionamento do medidor eletromecânico é a indução magnética. Ela consiste na criação de um torque eletromagnético que impulsiona um disco de

alumínio, que ao girar movimentava o componente que marca o faturamento do cliente. Esse torque eletromagnético acontece através de duas bobinas, uma de corrente e outra de tensão. O disco de alumínio fica preso na região do campo magnético originado pela corrente na bobina de corrente. Nesse disco são induzidas correntes de Foucault, que são correntes elétricas induzidas dentro de um material condutor, quando expostos a um campo magnético variável [11]. A reação destas correntes e o campo magnético criado pela bobina de tensão, gera o torque, que causa a rotação do disco. Dessa forma, a energia consumida pelo cliente e medida pela distribuidora está relacionada com a quantidade de giros dados pelo disco.

Os componentes descritos do medidor eletromecânico podem ser observados na Figura 9. Para as distribuidoras de energia, o número de voltas completas realizadas pelo disco é proporcional à energia consumida pelo cliente [12].

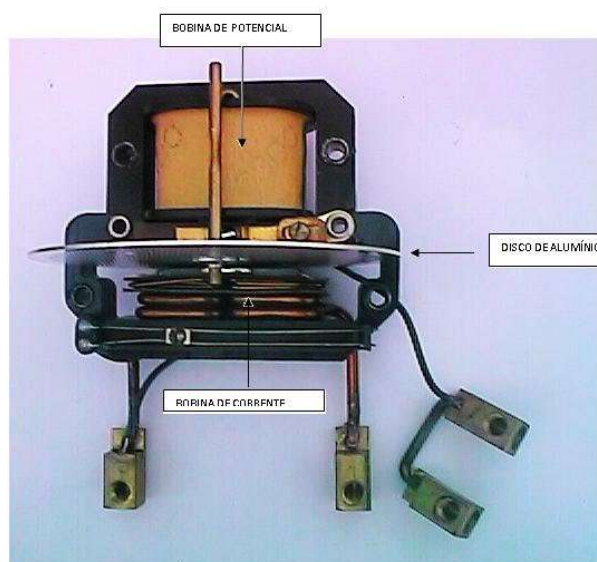


Figura 9 – Medidor eletromecânico. Fonte: [13].

O medidor eletromecânico, porém, vem se tornando cada vez mais defasado. Ele vem sendo substituído gradativamente pela falta de compatibilidade com algumas inovações propostas pelas concessionárias de energia como, por exemplo, a implementação da tarifação horo-sazonal, que consiste em tarifa mais elevada na conta de energia do consumidor, proporcional ao consumo no período de três horas consecutivas de segunda a sexta na tarifa de ponta [12], a medição distribuída e a cogeração.

Além disso, o medidor eletromecânico possibilita uma maior facilidade na execução de manobras para fraudar os sistemas de medição das distribuidoras. O sistema desse medidor facilita algumas práticas consideradas simples e fáceis de fazer pelos fraudadores. Uma delas consiste em inclinar o aparelho, de modo que o disco que marca o consumo gire numa velocidade menor. Tal manobra influencia diretamente o valor da conta fazendo com que a concessionária de energia registre um consumo menor [12] [14].

2.2.2 Medidores de energia eletrônicos

Os medidores eletrônicos vêm substituindo progressivamente os modelos eletromecânicos. Eles são mais modernos e atendem às inovações das distribuidoras de energia, visando novas formas de faturar o consumidor e atuando no combate aos furtos. Essa mudança no tipo de medidor foi acelerada pelo processo de implantação das redes inteligentes no Brasil, que utilizam de tecnologia de informação para serem mais eficientes.

O medidor eletrônico tem como ponto forte a capacidade de trabalhar como um medidor bidirecional, que lê a energia consumida pelo cliente e a energia gerada que é injetada na rede, sendo muito utilizado por aqueles que utilizam fontes de energia renováveis. Outras vantagens dos medidores eletrônicos são: as leituras do consumo de energia reativa, a possibilidade de novas modalidades de tarifação e o fornecimento de informações mais confiáveis [15] [16].

Outro ponto positivo do modelo eletrônico é a medição digital. O medidor eletrônico faz a medição através de sensores de corrente e de tensão com registradores ciclométricos ou digitais, substituindo a forma de medição dos medidores eletromecânicos baseados em indução magnética [16]. Um benefício notório dos modelos eletrônicos é a capacidade de estabelecer uma comunicação remota com sistemas de medição automática, o que descarta a utilização de mão de obra física, usada nos processos de leitura e digitação, minimizando a ocorrência de erros humanos.

A Figura 10 mostra um diagrama de blocos que ilustra o funcionamento de um medidor eletrônico de forma simplificada. Nesse diagrama é representada a estrutura de um medidor eletrônico, começando pelos transdutores de corrente e tensão, que possuem a função de converter os sinais de entrada de tensão e corrente. Após passar pelo transdutor a corrente se transforma em um sinal de tensão. Dessa maneira os dois sinais

de tensão serão multiplicados por um microcontrolador ou algum tipo de processador resultando um valor de potência instantânea. A energia será alcançada através do bloco integrador, cuja saída é armazenada em um registrador [13].

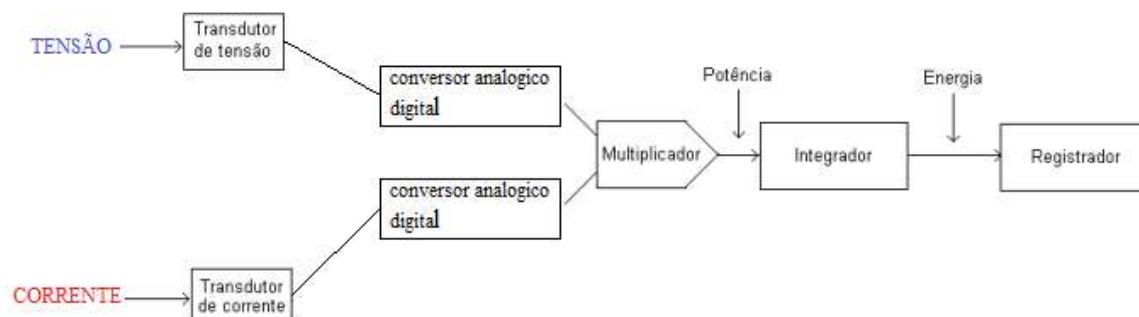


Figura 10 – Diagrama de Blocos

Para que a tensão seja convertida num número é necessária a presença de um bloco de conversão analógica digital. Um conversor analógico-digital (também conhecido como conversor A/D ou ADC) é um dispositivo que transforma um sinal de tensão em número a ser processado por um microcontrolador, por exemplo. Os gráficos da

Figura 11 representam a ação de um conversor analógico-digital. Neles é possível perceber que durante a conversão não é possível representar todos os valores, ou seja, não é feita a leitura dos valores em todos os instantes de tempo. Por essa razão, nem toda informação é armazenada e não há registros do que acontece do instante de uma leitura até o instante da leitura seguinte. No eixo vertical do gráfico de sinal digital, existem valores específicos que são representados e tudo que está entre esses valores será uma aproximação.

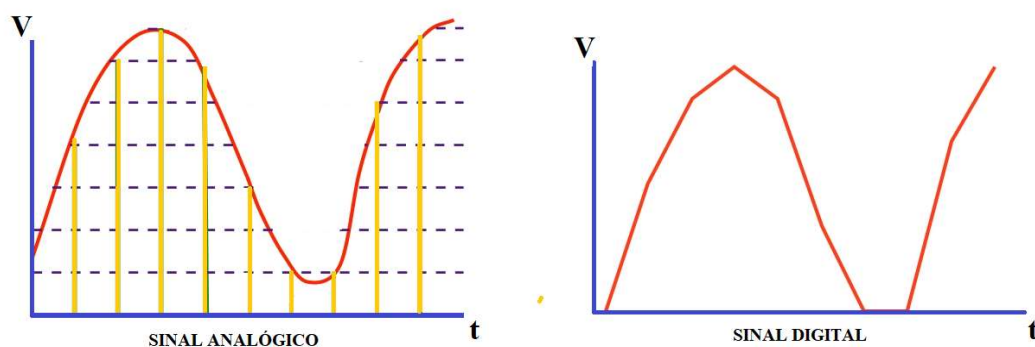


Figura 11 – Amostragem de uma conversão Analógica/Digital

Entrando nos aspectos do funcionamento de um medidor eletrônico, uma etapa necessária é um bom condicionamento de sinais. Sinais analógicos precisam ser condicionados para que estejam em condições adequadas quando forem exigidos, podendo assim se conectarem com outros elementos sem gerar distorções harmônicas ou ruídos que atrapalham os resultados medidos. A aquisição do sinal analógico resulta na sua amostragem e na conversão analógica digital (A/D). No condicionamento é necessário amplificar, filtrar e homogeneizar o sinal para que ele ganhe níveis de tensão adequados, visando uma medição confiável. Se, por exemplo, o conversor analógico-digital mede na faixa de 0 a 5 V, e o sinal do seu sensor varia de 0 a 100 mV, seria necessário aplicar também um ganho no sinal do sensor para obter mais precisão na medição [17].

2.2.3 Medidores baseados em eletrônica analógica

Com a modernização dos instrumentos de medição, a maioria dos novos equipamentos são fabricados para operar no domínio digital, por fornecerem muitos parâmetros de medição, mesmo que isso exija mais poder computacional [3]. Os dispositivos digitais oferecem excelente precisão, mas podem apresentar limitações na presença de formas de onda distorcidas. Por isso, o medidor baseado em eletrônica analógica se destaca por possuir uma maior estabilidade trabalhando em frequências que sofrem variações.

Considerando um cálculo de potência ativa, feito a partir do valor médio da potência instantânea, e considerando uma taxa de amostragem selecionada que seja o resultado do período da rede (T) dividido por um número inteiro, se a conversão de analógico para digital ocorrer num período mais curto, consequentemente acontecerá um número maior de conversões para completar um período. Exemplificando, numa rede onde a frequência é 50 Hz, e o período da rede é igual a $T=20$ ms, se a conversão AD ocorrer a cada 1 ms, serão 20 conversões para completar um período. Se esta mesma rede estivesse operando com 50,1 Hz, isso dificultaria muito realização dessa operação [3].

Os dispositivos com eletrônica analógica têm a vantagem de realizar a medição independentemente de as formas de onda estarem apresentando distorção. A solução proposta neste trabalho requer o uso de um conversor AD (converte sinal analógico para

digital) somente na etapa final do processamento dos cálculos, o que exige um poder computacional menor [3]. Neste trabalho, a solução proposta consiste na multiplicação analógica dos sinais de tensão e corrente transduzidos e condicionados, como apresentado na Figura 10. Dessa forma, a multiplicação é feita de forma instantânea e em todos os instantes de tempo, poupando o microcontrolador para executar outras funções.

2.2.4 Medidores de baixo custo e seu uso em IoT (Internet das Coisas)

A tendência conhecida como *Internet of Things* (IoT) ou, em português, Internet das Coisas, está se consolidando cada dia mais. Ela é referente à conexão digital da internet com as coisas ou equipamentos cotidianos, que permite um melhor controle e monitoramento sobre diversas áreas, criando inúmeras possibilidades, tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial. Sua aplicabilidade permite, por exemplo, ter mais praticidade e melhores controles no consumo de energia de uma indústria ou residência através da instalação de sensores em todos os equipamentos consumidores de energia, eficazes para a obtenção de informação sobre o custo energético de todas as tecnologias utilizadas [18].

Analisando o cenário atual, que visa o crescimento do conceito de redes inteligentes pautadas pela otimização e expansão da rede elétrica, destaca-se o uso de equipamentos mais eficientes que buscam monitorar a rede e seu uso de forma a perceber possíveis falhas ou problemas. Por isso, tem crescido o desenvolvimento das aplicações de softwares e hardwares para monitorar o consumo de energia elétrica residencial através de medidores de baixo custo e seu uso através do conceito de Internet of Things (IoT).

Muitos projetos utilizam a plataforma de hardware do Arduino UNO conectado à sensores, para que juntos com aplicações da Web possam monitorar os dados [16] [18]. Porém esse hardware apresenta limitações para implementação de um wattímetro eletrônico, pois não possui a capacidade de realizar as operações no tempo e com a precisão necessárias. Por exemplo, o microcontrolador presente no Arduino Uno, o ATMEGA328p, não consegue realizar conversões ADs simultâneas, de modo que seu uso para cálculo de potência ativa teria que considerar defasagens nas leituras dos sinais de tensão e corrente de pelo menos 100 microssegundos. Por outro lado, apesar de suas

limitações, a plataforma Arduino foi um grande alavancador da IOT, considerando sua grande contribuição para a popularização do uso de microcontroladores.

Os conceitos apresentados até aqui servirão de base para a compreensão das etapas experimentais. No próximo capítulo serão discutidos e apresentados os materiais utilizados para a construção do protótipo bem como as principais fases dos ensaios e simulações.

Capítulo 3 – Metodologia

Esse capítulo descreve a metodologia aplicada no desenvolvimento do equipamento. Também apresenta os métodos considerados para os ensaios experimentais realizados para avaliar o desempenho do aparelho proposto. A abordagem escolhida para a execução do projeto consiste, primeiramente, na criação e simulação de um circuito através do programa *Proteus* da *Labcenter Electronics*. Através desta ferramenta foi possível simular o comportamento do circuito do wattímetro baseado em eletrônica analógica. O circuito foi montado em laboratório onde foram realizados testes de desempenho experimentais. Parte-se da premissa de que o wattímetro foi projetado para operar com tensões entre -350 V e +350 V e correntes de -40 A até +40 A.

3.1 Funcionamento do Multiplicador Analógico AD633

O multiplicador analógico AD633 é o componente principal no funcionamento do circuito proposto. Esse multiplicador analógico tem um papel fundamental nos cálculos de valores RMS de tensão e corrente, assim como no valor médio da potência instantânea (potência ativa). Esse equipamento possui uma grande variedade de aplicações se destacando por sua fácil operação e baixo custo. Esse multiplicador opera em quatro quadrantes e possui duas entradas diferenciais de alta impedância que são a entrada $X = X_1 - X_2$ e a entrada $Y = Y_1 - Y_2$, como ilustrado na Figura 12.

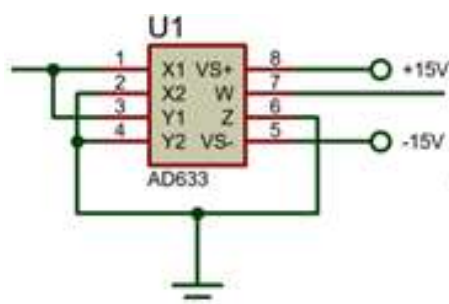


Figura 12 – Multiplicador analógico AD633

O AD633 é um multiplicador analógico pioneiro em conseguir um bom custo-benefício. Possui largura de banda de 1 MHz e taxa de variação de 20 V / μ s [19]. Dentro da proposta deste trabalho, o multiplicador analógico AD633 permite que parte dos

cálculos necessários para determinar os valores médios e eficazes de determinadas grandezas elétricas sejam executados de forma analógica, deixando o microcontrolador livre para executar outras funções.

No projeto, o AD633 será alimentado com -15 V e +15 V, mas as tensões de entrada e saída deverão variar entre -10 V e +10 V. Sua função de transferência é dada pela equação (28). Neste trabalho, o terminal Z foi conectado ao terra do circuito, eliminando o segundo termo da equação (28)

$$W = \frac{X \cdot Y}{10}(t) + Z \quad (28)$$

3.2. Medição do valor eficaz de tensão

O cálculo do valor eficaz de tensão (V_{rms}) está representado no diagrama de blocos mostrado na Figura 13, onde K_v é a constante de transdução e condicionamento dos sinais de tensão.

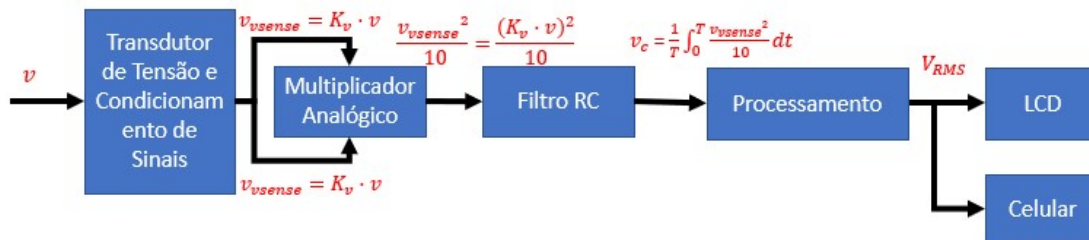


Figura 13 - Diagrama de blocos para cálculo do Valor Eficaz da Tensão.

O diagrama (Figura 13) mostra um sinal de tensão v que entrará no transdutor e passará pelo condicionamento de sinais. Depois da transdução o sinal de tensão será igual a v_{vsense} . Após o transdutor e o condicionamento de sinais, o sinal de tensão passará por dois terminais do multiplicador analógico (X_1 e Y_1 , conforme Figura 12).

O multiplicador analógico multiplicará a tensão v_{vsense} por ela mesma. Este componente, além de multiplicar os sinais, dividirá o resultado desta multiplicação por 10. Portanto o sinal resultante será igual a $\frac{v_{vsense}^2}{10}$, que posteriormente passará por 3 filtros RC's em série, todos com a mesma frequência de corte de 15 Hz. Após os filtros,

o sinal entregue ao microcontrolador será igual ao valor médio da tensão que pode ser calculado através da equação (29), considerando T como o período de v_{vsense}^2 .

$$v_c = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v_{vsense}^2}{10} dt \quad (29)$$

Dentro do microcontrolador existe um conversor analógico digital que fará a leitura do valor médio da tensão, para que o microcontrolador calcule o valor final de V_{RMS} . É importante ressaltar que os sinais que entram no multiplicador analógico e também no filtro RC são sinais analógicos. O microcontrolador converterá a tensão de saída do filtro RC em número inteiro sem sinal de 10 bits. Em seguida, a última etapa do processamento será executada pelo microcontrolador, que não realizará nenhuma integração numérica, e então calculará o valor eficaz da tensão (V_{RMS}). Mais detalhes sobre estes cálculos serão apresentados a seguir.

3.2.1 Transdutor de tensão e condicionamento de sinais

Analisando o diagrama da Figura 13, observa-se que o primeiro bloco representa o transdutor de tensão e condicionamento de sinais. Ele está detalhado na Figura 14:

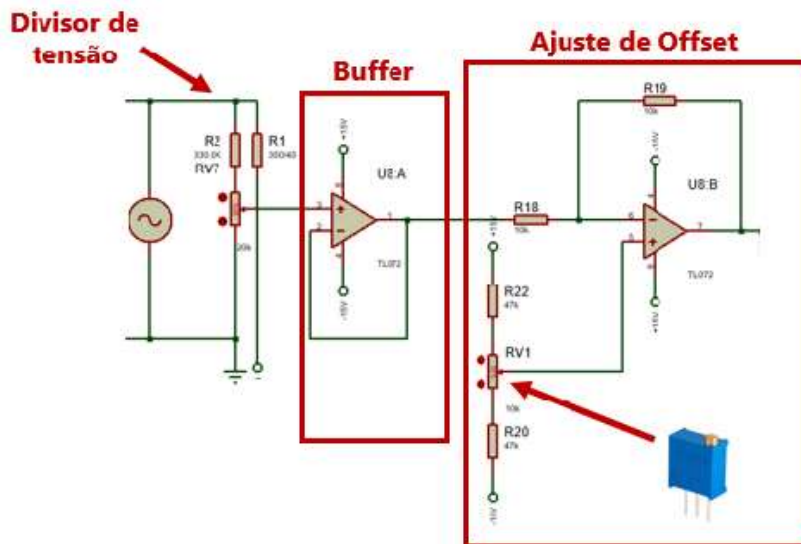


Figura 14 - Transdução e condicionamento do sinal de tensão

O sinal de tensão será transduzido através de um divisor de tensão resistivo utilizando um trimpot para calibração. Posteriormente, o sinal será condicionado com o auxílio de amplificadores operacionais em 3 estágios, como mostrado na Figura 14:

- O circuito *buffer* foi construído utilizando o amplificador operacional modelo TL072. No *buffer* a entrada e a saída serão iguais, porém o amplificador criará uma alta impedância entre a entrada e a saída. Ou seja, o que é conectado na saída não vai influenciar na entrada.
- O ajuste de *offset* receberá a tensão de entrada e adicionará um termo constante a ela. O valor deste termo constante poderá ser ajustado modificando as resistências do circuito, o que na prática é feito com o auxílio de um trimpot.
- O ajuste de ganho é um circuito capaz de amplificar ou atenuar um sinal de tensão. O valor do ganho poderá ser ajustado modificando as resistências do circuito, o que na prática é feito com o auxílio do trimpot presente no divisor de tensão.

O sinal de tensão transduzido e condicionado é igual a v_{vsense} , e pode ser relacionado com a tensão v , através da equação (30)

$$v_{vsense} = K_v \cdot v \quad (30)$$

onde $K_v = \frac{1}{35}$ é a constante de transdução e condicionamento dos sinais de tensão. Considerando que a tensão máxima tem valor de pico igual a 350 V, logo a tensão v_{vsense} terá valor de pico igual a 10 V.

3.2.2 Atuação do Multiplicador Analógico

O multiplicador analógico tem a função de elevar ao quadrado o sinal de tensão, transduzido e condicionado, v_{vsense} . Dessa forma ele multiplica os sinais que chegam nele e divide por 10 o resultado, gerando um valor de tensão que pode ser calculado pela equação (31).

$$\frac{v_{vsense}^2}{10} = \frac{(v \cdot K_v)^2}{10} \quad (31)$$

3.2.3 Filtros RCs

O filtro passa-baixa (figura 15) é um componente do circuito que permite a passagem de sinais de baixa frequência ao mesmo tempo que atenua a intensidade de

senais de alta frequência [20]. O filtro passa-baixa do circuito proposto é composto por três filtros de circuitos RC em série e um amplificador (AMP OP TL072) que funciona configurado como um *buffer*.

A rede possui a frequência fundamental igual a 60 Hz. Quando o multiplicador analógico eleva ao quadrado o valor da tensão v_{vsense} , a frequência do sinal resultante dobra em relação à frequência da rede, obtendo uma frequência fundamental igual 120 Hz. Sendo assim, para filtrar os 120 Hz, a frequência de corte foi configurada para o valor de 15 Hz, tendo os três filtros a mesma frequência de corte.

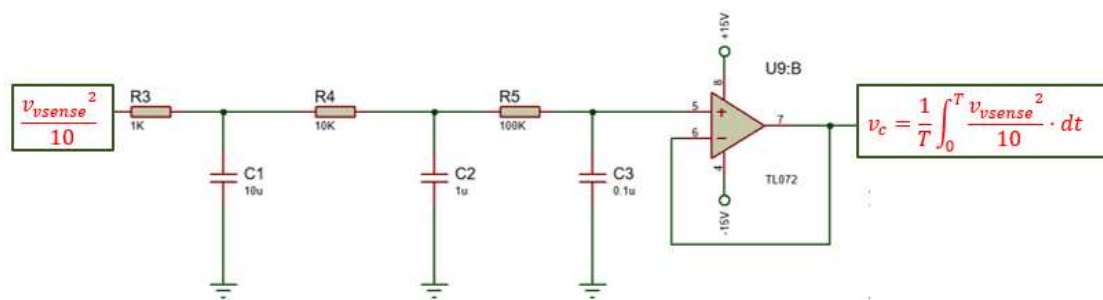


Figura 15 – Filtro Passa Baixa cálculo da tensão eficaz

A tensão que entra no filtro, dada pela equação (31), vai sair após o *buffer* como uma tensão média que pode ser calculada pela equação (29). Substituindo a equação (30) na equação (29), o valor de v_c , será igual a equação (32):

$$v_c = \frac{1}{10} \frac{1}{35^2} \frac{1}{T} \int_0^T v^2 \cdot dt \quad (32)$$

3.2.4 Processamento

O processamento será feito através do microcontrolador Atmega328p, presente na placa de prototipagem Arduino UNO (Figura 16). Este dispositivo consiste em uma placa composta por um microcontrolador e circuitos de entrada/saída que podem ser facilmente conectados à um computador e programados via IDE (*Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB. Depois de programado, o microcontrolador pode ser usado de forma independente, sendo uma solução barata, funcional e fácil de programar.



Figura 16 – Placa de Prototipagem Arduino UNO

O bloco de processamento é executado pelo microcontrolador que não realiza nenhuma integração numérica. Um código foi escrito pelo Arduino para calcular o valor da tensão eficaz do circuito. A tensão que chega no conversor analógico digital foi condicionada para variar de 0 V a 5 V, pois o Arduino não aceita tensões negativas e nem valores maiores que 5 V. Ela é calculada pela equação (32). Durante a conversão Analógica-Digital, o Arduino pega a tensão, que está na faixa de 0 a 5 V, e converte em um número entre 0 e 1023. Assim, o resultado da conversão AD consiste em multiplicar a equação (32) por $\frac{1023}{5}$, o que resulta na equação (33). Este resultado será armazenado na variável adc_v do microcontrolador, que é do tipo inteiro de 16 bits sem sinal.

$$adc_v = \frac{1023}{5} \frac{1}{35^2 \cdot 10} \frac{1}{T} \int_0^T v^2 \cdot dt \quad (33)$$

Para calcular o valor de V_{rms} , será necessário multiplicar o valor da equação (33) por $\frac{35^2 \cdot 10 \cdot 5}{1023}$ e extrair a raiz quadrada do resultado, conforme apresentado na equação (34):

$$V_{rms} = \sqrt{adc_v \cdot \frac{35^2 \cdot 10 \cdot 5}{1023}} = \sqrt{adc_v \cdot 59,8729} \quad (34)$$

Para efeito de demonstração, a equação (34) pode ser expandida conforme apresentado na equação (36):

$$V_{rms} = \sqrt{59,8729 \cdot \frac{1023}{5} \cdot \frac{1}{35^2 \cdot 10} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T v^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 \cdot dt} \quad (36)$$

A implementação da equação (34) no Arduino pode ser visualizada através do trecho de código apresentado na Figura 17.



```

RESULTADOS | Arduino 1.8.12
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

RESULTADOS

ADMUX <= ~(1 << MUX1);

printString("*****");

Irms = sqrt(0.782013685239492 * adc_i);
printString("Corrente = ");
printWord(adc_i);
printString(" = ");
printCorrente(Irms);
printString(" A\r\n");

Vrms = sqrt(59.872922776148584 * adc_v);
printString("Tensao = ");
printWord(adc_v);
printString(" = ");
printTensao(Vrms);
printString(" V\r\n");

```

Figura 17 – Código para Processamento do valor Eficaz de Tensão no Arduino

3.3 Medição do valor eficaz de corrente

O cálculo do valor eficaz de corrente (I_{rms}) é uma implementação análoga à usada no valor eficaz de tensão apresentada na seção anterior. Estes procedimentos estão representados no diagrama de blocos mostrado na Figura 18, onde K_i é a constante de transdução e condicionamento dos sinais de corrente.

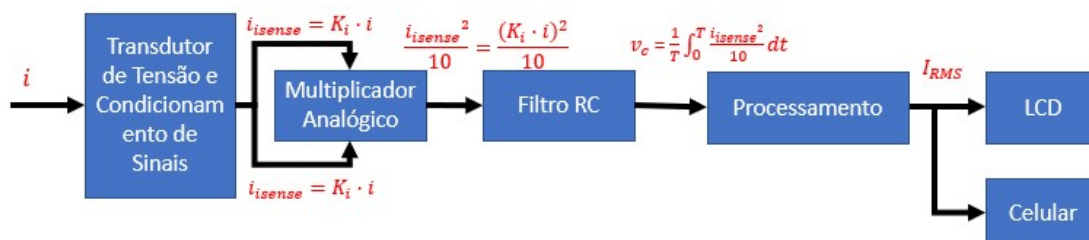


Figura 18 - Diagrama de blocos para cálculo do valor eficaz da corrente.

O diagrama da Figura 18 mostra um sinal de corrente i que entra no transdutor e passa pelo condicionamento de sinais. Depois da transdução, o resultado é um sinal de tensão (i_{sense}) proporcional à corrente i . Após a transdução e o condicionamento de sinais, o sinal de tensão i_{sense} entra em dois terminais do multiplicador analógico. Este componente, além de multiplicar os sinais, dividirá o resultado desta multiplicação por 10. Por isso, o sinal resultante será igual à $\frac{i_{sense}^2}{10}$, que posteriormente passará pelos 3 filtros RC's em série, todos com a mesma frequência de corte. Após os filtros, o sinal que será entregue ao microcontrolador corresponderá ao valor médio de $\frac{i_{sense}^2}{10}$, que pode ser calculado aplicando a formula da equação (36), onde T é o período de i_{sense}^2 .

$$i_c = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i_{sense}^2}{10} \cdot dt \quad (36)$$

Os sinais que entram no multiplicador analógico e no filtro RC são sinais analógicos. O microcontrolador converterá a tensão de saída do filtro RC em um número inteiro sem sinal de 10 bits. Em seguida, o microcontrolador iniciará a última etapa do processamento e calculará o valor eficaz da corrente (I_{RMS}), conforme apresentado na próxima seção.

3.3.1 Transdutor de corrente e condicionamento de sinais

Essa parte do circuito é responsável por transduzir e condicionar o sinal de corrente. Isto é feito por um sensor de corrente não invasivo (modelo SCT-013 de 100 A) e por um circuito de condicionamento que utiliza amplificadores operacionais, como ilustrado na Figura 19.

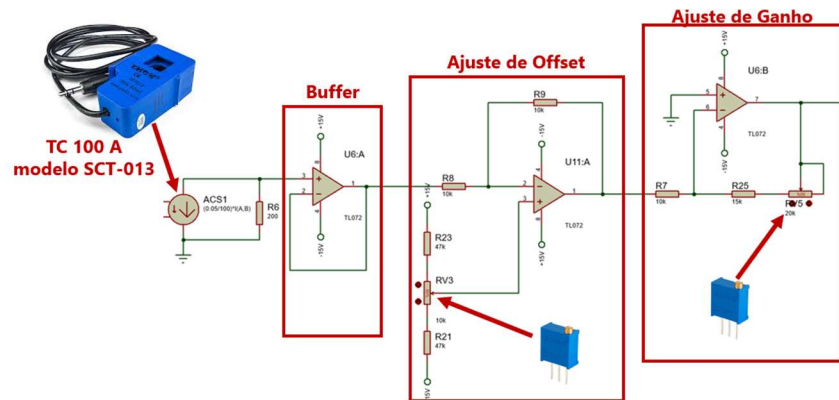


Figura 19 - Transdução e condicionamento do sinal de corrente.

O diagrama da Figura 19 mostra uma corrente i que entra no transdutor e passa pelo condicionamento de sinais. Como apresentado na Figura 19, foi utilizado um sensor de corrente alternada não invasivo para até 100 A modelo SCT-013-000. Este sensor é baseado no efeito da relação de transformação usada em transformadores. Esse TC possui a relação de 100 A / 50 mA, ou seja, fornece 50 mA na saída quando está circulando 100 A pelo fio em que a corrente está sendo medida.

O sinal de corrente transduzido e condicionado foi chamado de i_{sense} , e pode ser relacionado com a corrente i , através da equação (37):

$$i_{sense} = K_i \cdot i \quad (37)$$

onde $K_i = \frac{1}{4}$ V/A é a constante de transdução e condicionamento dos sinais de corrente. Considerando que a corrente máxima tem valor de pico igual a 40 A, o valor máximo de i_{sense} é de 10 V. O sinal foi condicionado com o auxílio de amplificadores operacionais em 3 estágios (*buffer*, ajuste de *offset* e ajuste de *ganho*), análogos aos usados e já explicados no tópico de transdução de tensão eficaz (3.2.1).

3.3.2 Atuação do Multiplicador Analógico

O multiplicador analógico tem a função de elevar ao quadrado o sinal de corrente, transduzido e condicionado, i_{sense} . Dessa forma ele multiplica esse valor por ele mesmo, e no final divide o resultado por 10, resultando em um valor de tensão que pode ser calculado pela equação (38).

$$\frac{(i \cdot K_i)^2}{10} = \frac{i_{isense}^2}{10} \quad (38)$$

3.3.3 Filtro RC

O filtro passa-baixa para o cálculo da corrente eficaz é análogo ao usado para o cálculo da tensão eficaz que foi apresentado e explicado na seção 2.2.3.

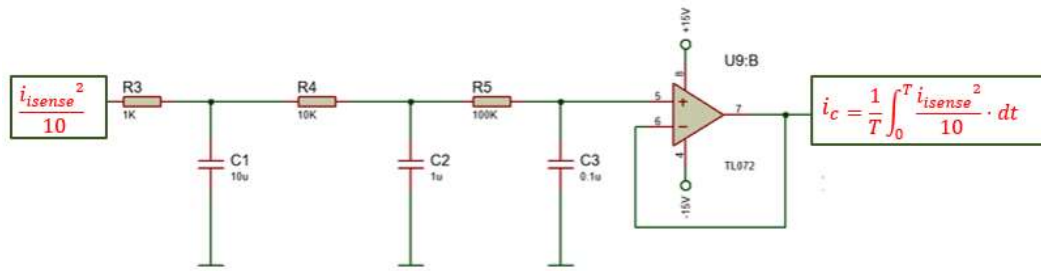


Figura 20 – Filtro Passa Baixa cálculo da corrente eficaz

O sinal que entra no filtro, $\frac{i_{ise}^2}{10}$, sairá após o *buffer* com uma tensão média que pode ser calculada pela equação (39):

$$i_c = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i_{isense}^2}{10} \cdot dt. \quad (39)$$

Substituindo a equação (37) na equação (39), obtém-se a equação (40).

$$i_c = \frac{1}{10} \frac{1}{4^2} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt \quad (40)$$

3.3.4 Processamento

Análogo ao bloco de processamento da tensão eficaz, explicado no tópico 2.2.4, o processamento para o cálculo do valor eficaz de corrente também será feito através do microcontrolador Atmega328p (presente no Arduino UNO). Um código foi escrito para calcular o valor da corrente eficaz do circuito. Nele o Arduino coleta o sinal que chega ao microcontrolador, que deverá estar na faixa de 0 a 5 V, e o converte em um número entre 0 e 1023. Deste modo, a equação (40) será multiplicada pela constante $\frac{1023}{5}$, resultando

na equação (41). O resultado desta conversão AD é armazenado na variável adc_i do microcontrolador.

$$adc_i = \frac{1023}{5} \frac{1}{4^2 \cdot 10} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt \quad (41)$$

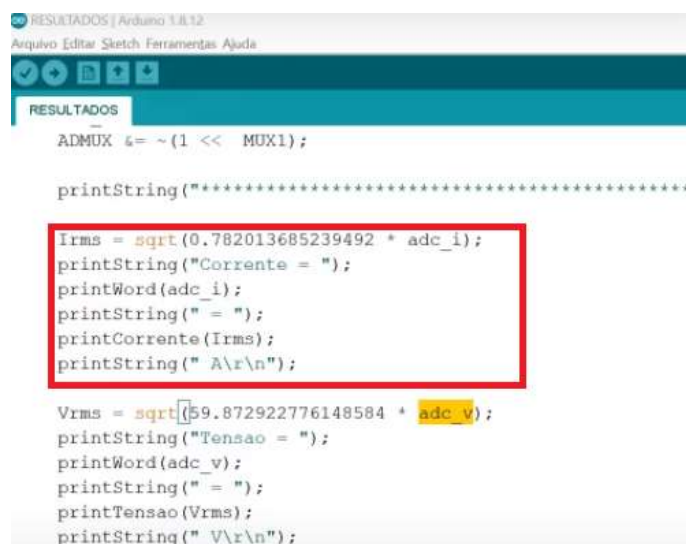
Para calcular o valor de I_{rms} , será necessário multiplicar o valor da equação (41) por $\frac{4^2 \cdot 10 \cdot 5}{1023}$ e extrair a raiz quadrada do resultado, conforme apresentado na equação (42):

$$I_{rms} = \sqrt{adc_i \cdot \frac{4^2 \cdot 10 \cdot 5}{1023}} = \sqrt{adc_i \cdot 0,782013} \quad (42)$$

Para efeito de demonstração da técnica utilizada, a equação (42) pode ser expandida, obtendo-se a equação (43):

$$I_{rms} = \sqrt{0,782013 \cdot \frac{1023}{5} \frac{1}{4^2 \cdot 10} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt} \quad (43)$$

A implementação da equação (42) no Arduino pode ser visualizada na Figura 21.



```

RESULTADOS | Arduino 1.8.12
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

RESULTADOS
ADMUX  <= ~{1 << MUX1};

println("*****");

I_rms = sqrt(0.782013685239492 * adc_i);
println("Corrente = ");
println(adc_i);
println(" = ");
println(I_rms);
println(" A\r\n");

Vrms = sqrt(59.872922776148584 * adc_v);
println("Tensao = ");
println(adc_v);
println(" = ");
println(Vrms);
println(" V\r\n");

```

Figura 21 - Código para Processamento do Valor Eficaz de Corrente no Arduino

3.4 Medição de potência

O cálculo final do projeto consiste na medição de potência. O procedimento de cálculo dessa grandeza está representado no diagrama de blocos mostrado na Figura 22. Esse cálculo será feito através dos sinais de tensão e corrente já condicionados, onde K_v e K_i são suas constante de transdução e condicionamento, respectivamente.

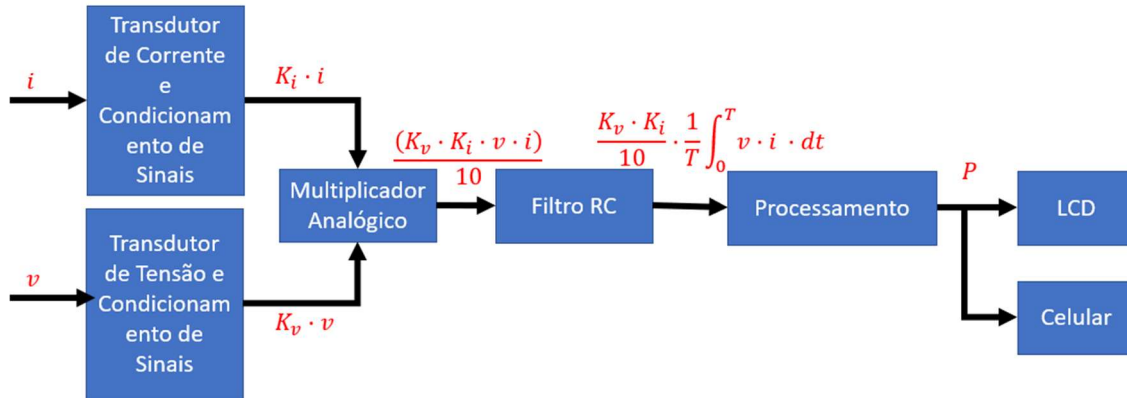


Figura 22 - Fluxograma para cálculo da potência ativa.

No diagrama da Figura 22 pode-se observar os sinais de tensão e corrente i e v , respectivamente, entrando no transdutor e passando pelo condicionamento de sinais. Depois da transdução, os sinais $k_v \cdot v$, e $k_i \cdot i$ entrarão em dois terminais do multiplicador analógico. Este componente, além de multiplicar os sinais, divide o resultado por 10. Logo, o sinal de saída será igual a $\frac{k_v \cdot v \cdot k_i \cdot i}{10}$, que passará por 3 filtros RC's em série, todos com a mesma frequência de corte. Após os filtros, o sinal entregue ao microcontrolador será igual ao valor médio do sinal de potência, calculado através da equação (44).

$$p_c = \frac{k_v \cdot k_i}{10} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (44)$$

Dentro do microcontrolador existe um conversor analógico digital, que ajudará na leitura do valor médio da corrente e que entregará um valor final de potência ativa. É importante ressaltar que os sinais que entrarão no multiplicador analógico e também no filtro RC são sinais analógicos. O Arduino receberá o sinal que chega no microcontrolador, na faixa entre 0 a 5 V, e converterá em um número entre 0 e 1023. Finalmente, a equação (44) será multiplicada por $\frac{1023}{5}$, resultando na equação (45). Este

resultado é armazenado na variável adc_p do microcontrolador. Considerando $K_i = \frac{1}{4}$ e $K_v = \frac{1}{35}$, tem-se:

$$adc_p = \frac{1023}{5} \frac{1}{35 \cdot 4 \cdot 10} \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (45)$$

Para calcular o valor da potência ativa, P , será necessário multiplicar o valor da equação (45) por $\frac{35 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 5}{1023}$. O resultado é a equação (46):

$$P = adc_p \cdot \frac{35 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 5}{1023} = adc_v \cdot 6,84 \quad (46)$$

Expandindo-se a equação (46), se obtém o valor da Potência Ativa ou Potência Média através da equação (50):

$$P = 6,84 \cdot \frac{1023}{5} \frac{1}{4 \cdot 35 \cdot 10} \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (47)$$

A Potência Aparente, S , será calculada através da equação que multiplica os valores Eficazes de corrente e de tensão:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (48)$$

Esses valores foram calculados através de um código gravado no Arduino como mostrado na Figura 23:



```

RESULTADOS | Arduino 1.8.12
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

RESULTADOS

printString("Tensao = ");
printWord(adc_v);
printString(" = ");
printTensao(Vrms);
printString(" V\\r\\n");

S = Vrms * Irms;
printString("Potencia Aparente = ");
printPotencia(S);
printString(" VA\\r\\n");

P = (6.842619745845552 * adc_p);
printString("Potencia Ativa = ");
printWord(adc_p);
printString(" = ");
printPotencia(P);
printString(" W\\r\\n");

Q = sqrt((S * S - P * P));

```

Figura 23 – Trecho do Código para Cálculo da Potência Ativa no Arduino

A Potencia Não Ativa(U), engloba a potência reativa (Q) e a potência de distorção harmônica (D). Esta grandeza pode ser calculada de acordo com a equação(53).

$$U = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (49)$$

O Fator de Potencia pode ser calculado através da equação (50) .

$$fp = \frac{P}{S} \quad (50)$$

3.5 Construção do protótipo

O circuito do projeto foi montado através de uma placa de protoboard (Figura 24) mais vulnerável à ruídos e distorções – fator que pode influenciar os resultados medidos. Mesmo assim, conforme será apresentado posteriormente, os resultados alcançados mostraram o potencial da solução proposta.

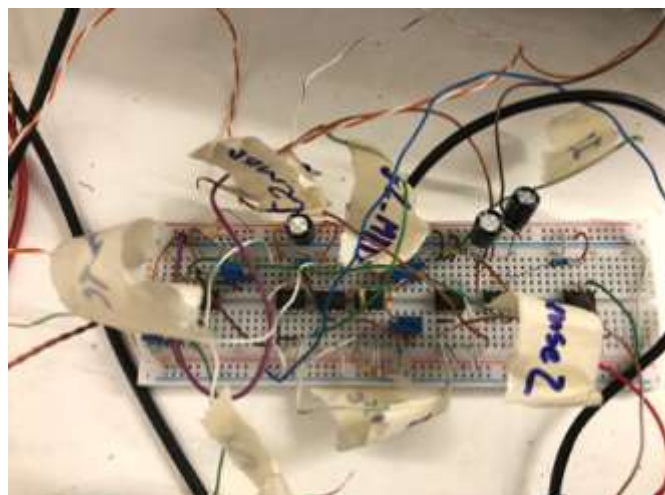


Figura 24 – Circuito construído no *protoboard*

3.5.1 Procedimentos de calibração

Os procedimentos de calibração utilizados para os circuitos de tensão e de corrente são similares. Foram utilizados os trimpots para ajustar o *offset* e o ganho dos sinais de corrente e tensão. Primeiramente, sem aplicar tensão ou corrente, os trimpots de *offset* ajustaram os valores médios dos sinais condicionados ($v_{v_{sense}}$ no circuito de tensão e $i_{i_{sense}}$ no circuito de corrente) para 0 V. Este valor médio foi calculado pelo osciloscópio, Yokogawa DL850 (Figura 25).

Em seguida, foram aplicados no medidor de tensão do equipamento proposto 350 V AC (valor de pico em 60 HZ) através da fonte programável AC, AFX Fonte 3120AFX (Figura 26). O trimpot de ganho ajustou o valor máximo do sinal de tensão transduzido e condicionado ($v_{v_{sense}}$) para 10 V. De maneira análoga, a tensão na fonte AFX Fonte 3120AFX foi ajustada para aplicar uma corrente de 40 A AC (valor de pico em 60 HZ) em uma carga resistiva. Esta corrente foi medida pelo equipamento proposto e o trimpot de ganho ajustou o valor máximo do sinal de corrente transduzido e condicionado ($i_{i_{sense}}$) para 10 V.

3.5.2 Equipamentos utilizados nos ensaios experimentais

Os principais equipamentos eletrônicos utilizados nos circuitos montados para realização dos ensaios em bancada foram:

- Osciloscópio YOKOGAWA DL850 DIGITAL

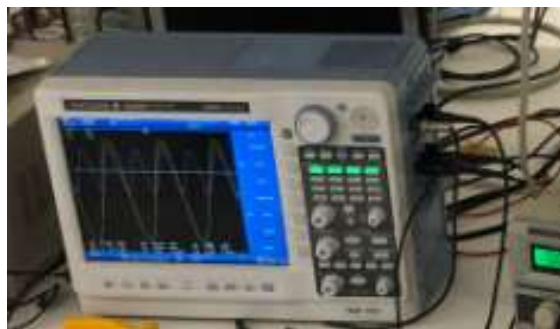


Figura 25 – Osciloscópio YOKOGAWA DL850 DIGITAL

- Fonte programada PACIFIC AFX 3120AFX



Figura 26 – Fonte programável PACIFIC AFX 3120AFX

- Barramentos de cobre e resistores (1700 W / 220 V cada) para construir um banco de carga

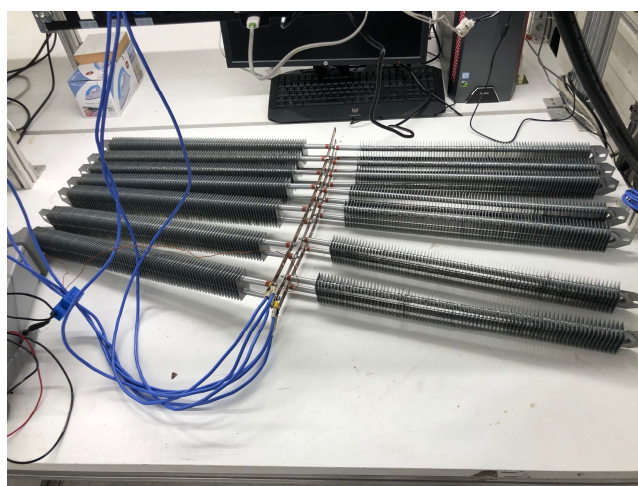


Figura 27 – Resistores de carga

- Diodo SKKH570/18E para avaliação de desempenho com carga não linear.



Figura 28 - Diodo SKKH570/18E

- Multímetro Agilent 34401A



Figura 29 – Multímetro Agilent 34401A

- Ponteira de Corrente Tektronix a622



Figura 30 – Ponteira de corrente Tektronix a622

Os procedimentos, cálculos e materiais apresentados neste capítulo compõem o protótipo de wattímetro analógico. O equipamento, porém, precisa ser analisado e testado para que seja possível identificar sua aplicabilidade e a confiabilidade dos resultados gerados. A realização de testes experimentais de desempenho, como pontuado desde o princípio, busca demonstrar a capacidade e o potencial da solução proposta neste trabalho. Tais experimentos e simulações, bem como seus resultados, serão apresentados e discutidos no próximo capítulo.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

Este capítulo tem dois objetivos: apresentar os resultados obtidos nos ensaios do equipamento proposto em bancada e; comparar esses resultados com aqueles alcançados utilizando equipamentos comerciais. Além disso, serão investigadas e discutidas possíveis causas para as falhas identificadas e apontadas soluções para melhorar o desempenho do equipamento proposto.

4.1 Medição do valor eficaz de tensão

Esta seção mostra o resultado do ensaio do circuito de medição do valor eficaz de tensão realizado em bancada.

4.1.1 Descrição do ensaio

A Figura 31 apresenta um esquemático dos ensaios realizados para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição do valor eficaz de tensão. Um multímetro foi conectado para medir a tensão gerada pela fonte programável PACIFIC AFX 3120AFX. Essa fonte foi programada para produzir a forma de onda de tensão alternada em 60 Hz, sendo possível variar a amplitude dela. Após a execução dos procedimentos de calibração do equipamento, foram aplicadas tensões alternadas de diferentes magnitudes. Os resultados foram comparados com os valores obtidos nas simulações e nos instrumentos comerciais.

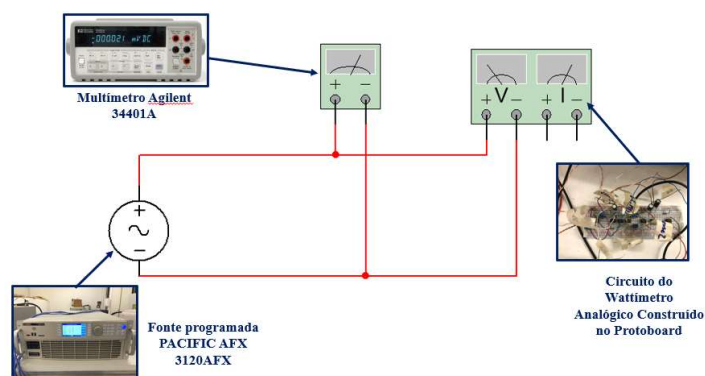


Figura 31 – Esquema dos ensaios para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição do valor eficaz de tensão.

4.1.2 Resultados dos primeiros ensaios de tensão medida

Os valores significativos para uma análise completa do primeiro ensaio de medição estão resumidos na Tabela 1. Na coluna A estão os valores eficazes desejados, sendo esses, os valores de tensão aplicados pela fonte na simulação. Na coluna B, constam os valores de tensão eficazes, fornecidos pelo medidor analógico na simulação. Observa-se que para os valores mais baixos de tensão constam erros que não podem ser desprezados. À medida que a tensão vai aumentando, consequentemente, o erro vai diminuindo. De fato, como acontece em equipamentos comerciais, o wattímetro analógico proposto deveria contar com um seletor de escalas para medição das grandezas com maior precisão. Por exemplo, ao aplicar uma tensão de $20 V_{rms}$, o sinal transduzido e condicionado (v_{sense}) terá uma amplitude de $\sqrt{2} \cdot 20 \cdot K_v \cong 808,1 \text{ mV}$.

Tabela 1 – Análise de desempenho do circuito medidor de tensão.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Valor Eficaz Desejado (V)	Tensão Eficaz Fornecida pelo Medidor Analógico na Simulação (V)	Erro 1 (A-B)	Tensão Eficaz Medida com Agilent 34401A (V)	Valor de adc_v obtido experimentalmente (0 a 1023)	Cálculo da Tensão Eficaz Realizado pelo Medidor Analógico sem Correção (V)	Erro 2 (D-F)	Cálculo da Tensão Eficaz Realizado pelo Medidor Analógico com Correção (V)	Erro 3 (D-H)
	20,00	18,95	1,05	19,98	2	10,94	9,04	-	-
	40,00	39,45	0,55	39,98	18	32,83	7,15	-	-
	60,00	59,94	0,06	59,98	43	50,74	9,24	-	-
	80,00	79,67	0,33	80,01	81	69,64	10,37	-	-
FAIXA SELECIONADA	100,00	99,69	0,31	100,02	128	87,54	12,48	100,57	-0,55
	120,00	119,87	0,13	120,01	189	106,38	13,63	120,19	-0,18
	140,00	139,92	0,08	140,01	260	124,77	15,24	139,35	0,66
	160,00	159,89	0,11	160,01	346	143,93	16,08	159,32	0,69
	180,00	180,14	-0,14	180,01	448	163,78	16,23	180,00	0,01
	200,00	200,14	-0,14	200,01	563	183,60	16,41	200,65	-0,64
	220,00	219,95	0,05	219,99	785	216,80	3,19	-	-
	240,00	240,24	-0,24	239,98	951	238,62	1,36	-	-
	247,49	247,49	0,00	247,48	1019	247,00	0,48	-	-

Quando o sinal v_{sense} for conectado ao AD633 ele será elevado ao quadrado e dividido por dez, resultando em uma tensão que varia de 0 a aproximadamente 65,3 mV. Com a magnitude tão pequena, o sinal sofrerá maior influência de ruídos, da atenuação do filtro RC e da precisão do conversor AD do microcontrolador.

Complementando esta análise, a Figura 32 apresenta um gráfico que compara o sinal de tensão com os valores correspondentes à conversão analógica digital no microcontrolador, mais precisamente, ao valor da variável que armazena o valor da conversão AD (adc_v). Foi possível observar que a sensibilidade do equipamento não é linear. Assim, se os valores de tensão forem muito baixos a curva será bem inclinada. Essa inclinação mostra que qualquer variação pequena no conversor analógico digital corresponderá a uma variação grande de tensão. O conversor AD, por sua vez, possuindo 10 bits e tensão de referência de 5 V, apresenta uma resolução de aproximadamente 5 mV. Isso significa, no pior cenário, que se $v_{v_{sense}} = 0$ V, o medidor registrará que o valor eficaz da tensão é nulo. Porém, se $v_{v_{sense}} = 5$ mV, o medidor entenderá que o valor eficaz da tensão é de aproximadamente 7,7 V.

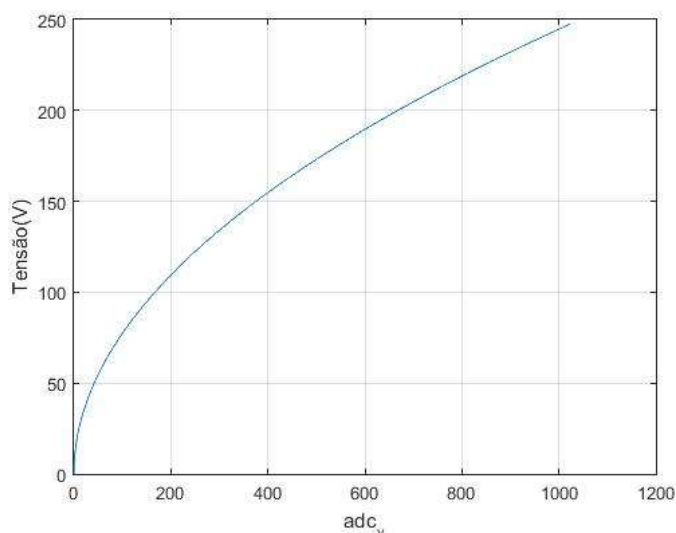


Figura 32 – Tensão calculada pelo equipamento proposto em função do valor de adc_v .

Em resumo, a simulação computacional mostrou uma limitação do equipamento proposto. Portanto, seu desempenho deve ser analisado considerando uma faixa de operação. Este valor mínimo de tensão de operação será especificado a seguir.

A coluna C da Tabela 1 mostra a diferença entre os resultados do valor de tensão eficaz desejada (coluna A) e o valor da tensão na simulação (coluna B). Essa diferença foi classificada como “Erro 1”. A coluna D apresenta o valor medido com o multímetro comercial, Agilent 34401A, quando a fonte foi ligada com as tensões programadas. A coluna E indica os valores correspondentes à conversão analógica digital no

microcontrolador. Esta é a variável que armazena o valor da conversão AD do sinal de tensão, adc_v , mencionada no Capítulo 3.

A coluna F mostra valores resultantes do cálculo de tensão eficaz realizada pelo medidor analógico (correspondente à equação (34)). Nesse caso, o valor apresentado na coluna F foi calculado através do valor obtido experimentalmente e sintetizado na coluna E. A coluna G (Erro 2) indica o erro correspondente à diferença entre o valor medido pelo multímetro comercial (coluna D), Agilent 34401A, e o valor medido pelo equipamento proposto neste trabalho (coluna F).

A Tabela 1 mostra que o circuito montado no *protoboard* apresentou um comportamento diferente do esperado, atingindo na coluna G (Erro 2) erros absolutos da ordem de 10 V em relação ao valor de tensão medida com um multímetro de bancada. A não-linearidade deste erro consta na Figura 33 que apresenta uma correlação linear de 99,51 % entre as tensões medidas com o multímetro de bancada e com o equipamento proposto neste trabalho. Vale destacar que este valor de correlação pode ser considerado baixo para um instrumento de medida. Esta diferença pode ser atribuída a um fenômeno físico que foi desconsiderado nos cálculos analíticos e nas simulações. Esta questão será investigada e discutida ainda neste capítulo.

A próxima etapa consistiu na definição de uma nova região de funcionamento do wattímetro analógico fixada na faixa entre $100\text{ V} \leq V_{rms} \leq 200\text{ V}$. Nessa faixa o circuito apresenta valores de medição mais estáveis e um comportamento mais linear, como apresentado na Figura 33, onde a correlação chega a 99,98 %. A equação de reta y_2 apresentada na Figura 33 foi incorporada na equação (34), resultando na equação (51). Em suma, a equação (51) corresponde à equação (34) corrigida. A coluna H na Tabela 1 apresenta os valores dos cálculos de tensão eficaz realizados pelo medidor analógico com a aplicação da correção proposta na equação (51).

$$V_{rms} = 1,0419 \cdot \sqrt{(59,872922776148584 \cdot adc_v)} + 9,3568 \quad (51)$$

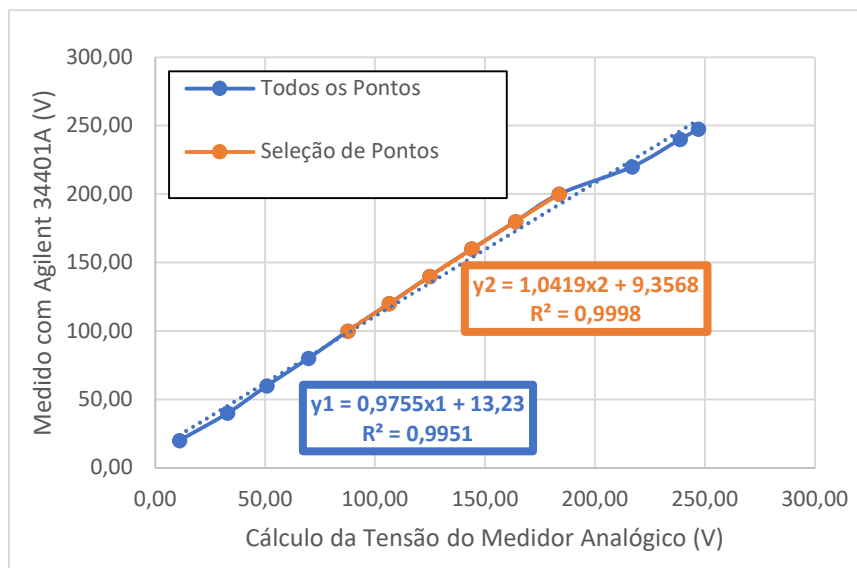


Figura 33 – Tensão medida (valores eficazes) com Wattímetro Analógico x Multímetro de Bancada

A coluna I da Tabela 1 (Erro 3) representa o erro correspondente a diferença entre valor medido pelo multímetro comercial (coluna D), Agilent 34401A, e o valor medido no equipamento proposto no trabalho após a correção dos cálculos (coluna H). Ao comparar os valores de “Erro 2” e “Erro 3”, nota-se que o uso da equação (51) e o estreitamento da região de operação do wattímetro analógico foram soluções provisórias que permitiram a continuidade das práticas experimentais do trabalho. As seções posteriores mostrarão uma análise mais detalhada do comportamento do equipamento projetado, buscando esclarecer os fenômenos responsáveis pelas não-linearidades apresentadas.

4.1.3 Resultado do segundo ensaio de medições de tensão

Considerando a dificuldade para realizar ensaios experimentais durante o período de isolamento social, em função da COVID-19, optou-se por dar prosseguimento aos ensaios para posterior investigação dos fatores que poderiam influenciar o comportamento do wattímetro analógico desenvolvido. Em um primeiro momento, para lidar com o comportamento não-linear da tensão, foi aplicado um fator de correção nos cálculos efetuados pelo microcontrolador e uma nova faixa de funcionamento do wattímetro analógico foi definida.

Após as alterações, uma nova bateria de ensaios foi realizada e novos resultados surgiram através de tensões aplicadas pela fonte, com valor eficaz variando entre 100 e

200 volts, em passos de 10 volts. As formas de onda da tensão na saída do divisor de tensão, do sinal condicionado antes e depois do multiplicador analógico e após o filtro RC foram armazenadas no osciloscópio e se encontram no Apêndice A deste trabalho.

A Tabela 2 apresenta os valores medidos após a aplicação do fator de correção. Novamente foram comparados os resultados obtidos com o equipamento proposto com a tensão fornecida pelo equipamento comercial. Os resultados da Tabela 2 foram considerados satisfatórios para os propósitos deste trabalho, pelo fato do circuito montado no *protoboard* estar sujeito a ruídos que podem prejudicar a qualidade do resultado.

Tabela 2 – Tensão medida com correção

Aplicada (Valor Eficaz)	Medido com Agilent 34401A (V)	Medida da Tensão com o Medidor Analógico com Correção(V)	ERRO RELATIVO (%)	ERRO ABSOLUTO (V)
100,00	100,02	100,57	-0,55%	-0,55
110,00	110,03	110,05	-0,02%	-0,02
120,00	120,01	119,80	0,17%	0,21
130,00	130,02	129,48	0,42%	0,54
140,00	140,01	139,35	0,47%	0,66
150,00	150,03	149,23	0,53%	0,80
160,00	160,02	159,53	0,31%	0,49
170,00	170,01	169,38	0,37%	0,63
180,00	180,01	179,62	0,22%	0,39
190,00	190,02	190,17	-0,08%	-0,15
200,00	200,01	200,31	-0,15%	-0,30

4.1.4 Investigação do comportamento não-linear apresentado pelo equipamento proposto

Os erros relativos e absolutos indicados nas duas últimas colunas da **Tabela 2** foram considerados satisfatórios para o protótipo construído neste trabalho. Para obter um melhor resultado, o ideal seria montar o circuito em uma placa de circuito impresso e não em uma placa de *protoboard*, uma vez que placas de prototipagem são muito sensíveis a ruídos que geram instabilidades nas medições (como explicado no item 4.1.2). Ao mesmo tempo, a placa deve ser construída na versão final do circuito, pois existem fatores que comprometem a qualidade dos resultados.

Para o protótipo chegar a um nível próximo de um equipamento comercial, os fatores causadores de erros precisam ser investigados. O fator de correção foi implementado na última etapa do processamento do valor eficaz de tensão. Ou seja, o mal

condicionamento do sinal v_{sense} , também utilizado no cálculo de potência ativa, afeta a aferição desta grandeza.

Sobre o sinal de tensão condicionado (v_{sense}) é importante mencionar que, durante a execução dos ensaios, foi observada uma demora inesperada na estabilização ao se trocar os valores de tensão da fonte. Ao mudar a tensão da fonte de 100 V para 110 V, era esperado que a amplitude do sinal v_{sense} apresentasse uma mudança de valor praticamente instantânea. Na prática, a amplitude do sinal v_{sense} demorou alguns segundos para estabilizar. Durante a execução da experiência, esta demora foi atribuída a um possível mal dimensionamento do filtro, que teria uma constante de tempo elevada. Desta forma, os valores de tensão eficazes medidos durante os ensaios experimentais foram obtidos após 30s contados a partir do momento da aplicação da tensão.

Após a análise das formas de onda (Apêndice A) foi possível concluir que o problema não era o filtro. A análise indicou que o *trimpot* utilizado para ajuste do divisor de tensão estava aquecendo e fazendo com que a saída do divisor de tensão apresentasse um comportamento não-linear. Portanto, a demora na estabilização do sinal v_{sense} foi atribuída ao tempo necessário para que os resistores do divisor de tensão entrassem em equilíbrio térmico.

Comprovando o procedimento que evidenciou o aquecimento dos resistores do divisor de tensão, a Figura 34 apresenta uma comparação entre os valores medidos e calculados da tensão no divisor quando 200 Vrms são aplicados pela fonte. Como é esperado que o divisor de tensão apresente um comportamento linear, e considerando que ele havia sido calibrado imediatamente antes da execução dos ensaios, as diferenças entre as curvas apresentadas na Figura 34 foram um primeiro indicativo do aquecimento dos componentes utilizados.

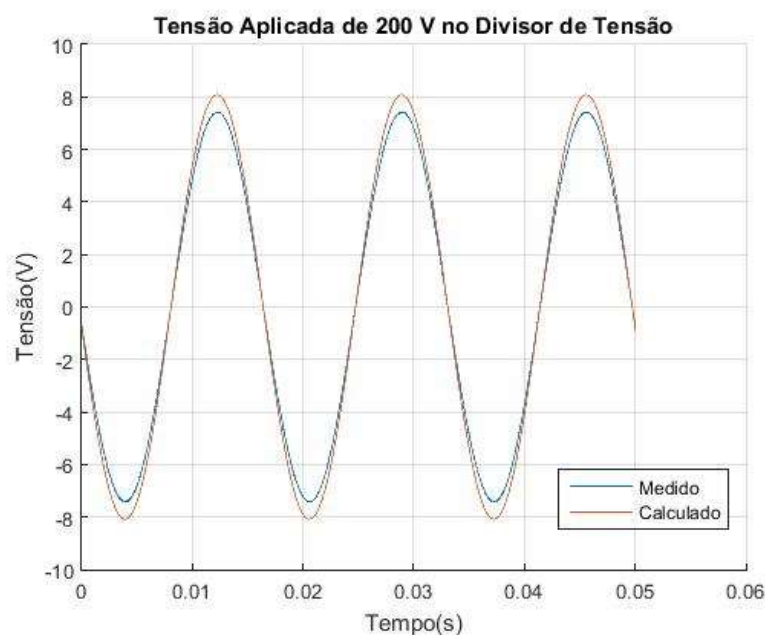


Figura 34 – Comparação do gráfico da tensão medida com o gráfico da tensão esperada no divisor de tensão

Para uma análise mais completa, foi definida uma razão (k) entre os valores de pico medido e calculado da tensão no divisor, para cada valor de tensão aplicado pela fonte. O resultado desta análise é apresentado na Figura 35, onde observa-se que o ganho do divisor de tensões não apresentou um comportamento linear.

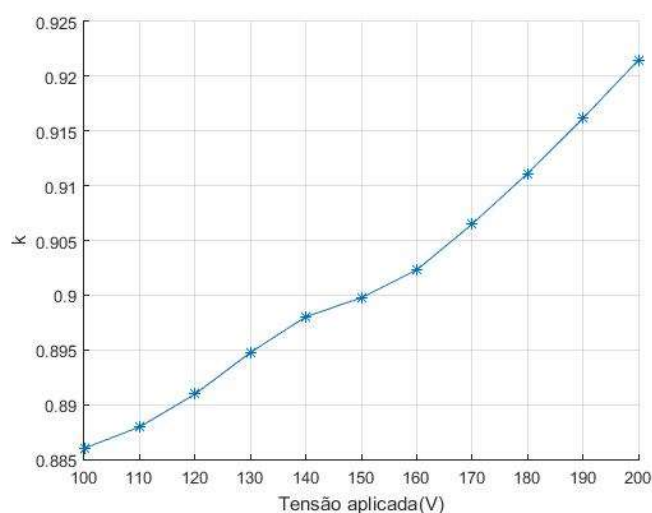


Figura 35 – Valor de k (razão entre os valores de pico medido e calculado) em função da tensão aplicada pela fonte.

O aquecimento dos componentes utilizados no projeto não é levado em consideração nas simulações computacionais realizadas. Por este motivo, os resultados

obtidos computacionalmente complementarão a análise dos resultados apresentados neste trabalho quando for pertinente. Uma proposta de melhoria consiste no redimensionamento do divisor de tensão, com aumento dos valores das resistências e remoção do *trimpot*. O ajuste de ganho deverá ser feito após o *buffer*, de forma semelhante ao circuito de condicionamento de sinais de corrente.

4.2 Medição do valor eficaz de corrente

Nesta etapa foi realizado em bancada o ensaio do circuito de medição do valor eficaz de corrente.

4.2.1 Descrição do ensaio

O esquemático dos ensaios realizados para avaliação do desempenho do circuito que afere o valor eficaz de corrente é representado na Figura 36. A diferença em relação ao ensaio anterior é que este foi realizado com carga, sendo adicionados ao circuito 7 resistores de aproximadamente $28\ \Omega$ ($220\ \text{V} / 1700\ \text{W}$) em paralelo (Figura 27). Após a calibração do equipamento, a tensão foi ajustada para aplicar correntes desejadas de diferentes magnitudes. Cabe ressaltar que o equipamento foi projetado para ler correntes de até $40\ \text{A}_{\text{pico}} (\cong 28,28\ \text{A}_{\text{rms}})$. No ensaio foram aplicadas correntes de valores eficazes de 2,5 A à 27,5 A, variando com passos de 2,5 A. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles das simulações e dos instrumentos comerciais.

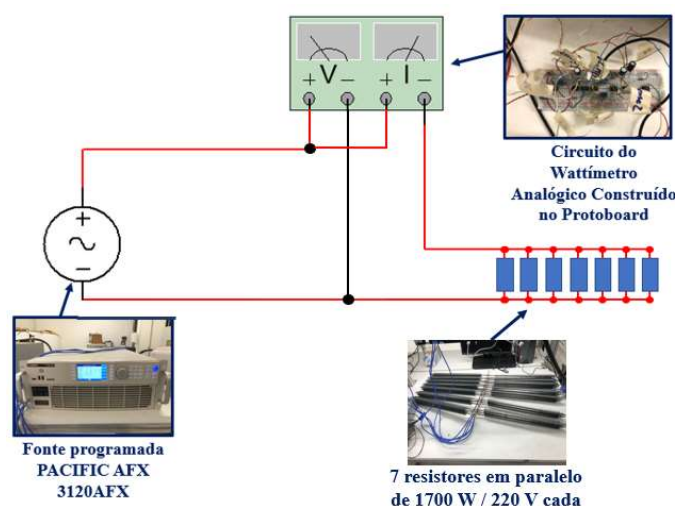


Figura 36 - Esquema dos ensaios para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição do valor eficaz de corrente.

4.2.2 Resultado dos primeiros ensaios de corrente medida

Na Tabela 3 são apresentados valores para uma análise completa dos resultados do primeiro ensaio de medição de corrente. Na coluna A constam os valores eficazes de corrente aplicados pela fonte durante a simulação. A coluna B mostra os valores de corrente eficazes, fornecidos pelo medidor analógico durante a simulação. Pode-se perceber que os valores de corrente obtidos na simulação são bem similares aos valores desejados (aplicados pela fonte). Ou seja, não apresentam um “Erro 1” (coluna C) elevado sendo este a diferença entre os resultados do valor de corrente eficaz desejada (coluna A) e o valor da corrente na simulação (coluna B).

Tabela 3 – Análise de desempenho do circuito medidor de corrente

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Valor Eficaz Desejado (A)	Valor Eficaz da Corrente obtida com o Medidor Analógico na Simulação (A)	Erro 1 (A-B)	Corrente Eficaz Medida com a fonte PACIFIC 3120AFX (A)	Valor de i_{adc} obtido experimentalmente (0 a 1023)	Cálculo da Corrente Eficaz Realizado pelo Medidor Analógico sem Correção (A)	Erro 2 (D-F)	Cálculo da Corrente Eficaz Realizado pelo Medidor Analógico com Correção (A)	Erro 3 (D-H)
0,00	0,00	0,00	0,16	0	0,00	0,16	0,31	-0,15
2,50	2,34	0,16	2,56	5	1,98	0,58	2,26	0,30
5,00	4,92	0,08	5,10	30	4,84	0,26	5,08	0,02
7,50	7,50	0,00	7,43	67	7,24	0,19	7,44	-0,01
10,00	9,97	0,03	9,97	125	9,89	0,08	10,05	-0,08
12,50	12,51	-0,01	12,52	199	12,47	0,05	12,60	-0,08
15,00	15,01	-0,01	15,07	289	15,03	0,04	15,12	-0,05
17,50	17,49	0,01	17,64	398	17,64	0,00	17,69	-0,05
20,00	20,01	-0,01	19,72	498	19,73	-0,01	19,75	-0,03
22,50	22,51	-0,01	22,46	648	22,51	-0,05	22,48	-0,02
25,00	25,01	-0,01	24,56	773	24,59	-0,03	24,53	0,03
27,50	27,53	-0,03	27,76	986	27,77	-0,01	27,66	0,10

Mesmo para 2,5 A, o pior caso, o erro foi de apenas 0,16 A. Isso ocorre pois, assim como mencionado para o circuito medidor de tensão, o wattímetro analógico proposto deveria ter um seletor de escalas para medição de correntes de menores magnitudes com maior precisão. Por exemplo, quando se aplica uma corrente de 2,5 A_{rms}, o sinal transduzido e condicionado (i_{sense}) terá uma amplitude de $\sqrt{2} \cdot 2,5 \cdot K_i \cong 883,9$ mV. Após o sinal i_{sense} ser conectado ao multiplicador, AD633, ele será elevado ao quadrado

e dividido por dez, resultando em uma tensão cuja magnitude varia de 0 a aproximadamente 78,1 mV. Em função de sua magnitude este sinal sofrerá maior influência de ruídos, da atenuação do filtro RC e da precisão do conversor AD do microcontrolador.

A Figura 37 mostra a corrente calculada com os valores correspondentes à da conversão analógica digital no microcontrolador, mais precisamente, ao valor da variável que armazena o valor da conversão AD (adc_i). Verifica-se que, assim como nos ensaios de tensão, a sensibilidade do equipamento não é linear. Ou seja, se os valores de corrente forem muito baixos a curva será bem inclinada. Essa inclinação mostra que qualquer variação pequena no conversor analógico digital corresponde a uma variação grande de corrente. No entanto, ao comparar a sensibilidade do circuito de corrente (Figura 37) com o de tensão (Figura 33), pode-se observar que a sensibilidade no circuito de corrente é menor, sendo esse o principal argumento que justifica o erro relativamente menor comparado ao circuito de tensão durante a simulação.

Considerando que cada 5 mV no sinal de corrente após o filtro corresponde a uma unidade de medida no eixo horizontal da Figura 37, na situação de $i_{sense} = 0$ V, o medidor entenderá que o valor eficaz da tensão é nulo. Porém, se $i_{sense} = 5$ mV, o medidor entenderá que o valor eficaz da corrente é de aproximadamente 0,88 A. Em suma, como feito para o circuito medidor de tensão, o circuito medidor de corrente também precisa de um valor mínimo de operação, que neste trabalho foi de 4 A_{rms}.

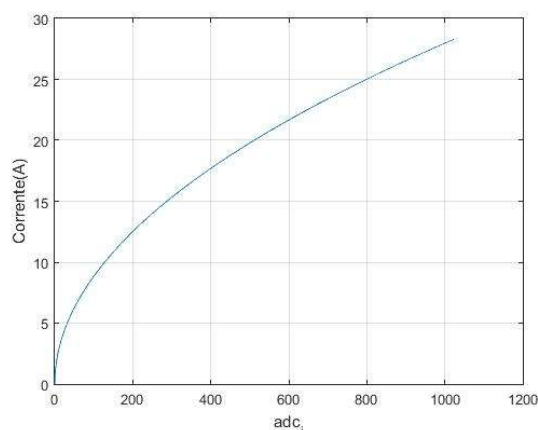


Figura 37 – Curva Corrente X adc_i

A coluna D da tabela 3, consiste no valor que foi medido com a fonte Pacific 3120AFX após aplicação das tensões programadas. A coluna E apresenta os valores

correspondentes à conversão analógica digital no microcontrolador - variável que armazena o valor da conversão AD do sinal de corrente, adc_i , mencionada no Capítulo 3. A coluna F mostra valores resultantes do cálculo de corrente eficaz realizada pelo medidor analógico utilizando a equação (42). A coluna F foi calculada através do valor obtido experimentalmente na coluna E. A coluna G (Erro 2) representa o erro correspondente a diferença do valor medido pela fonte (coluna D) e o valor medido no equipamento proposto no trabalho (coluna F). Os resultados sintetizados na Tabela 3 mostram que o circuito montado no *protoboard* apresentou um comportamento diferente do esperado, porém com um erro muito mais aceitável quando comparado com os obtidos nos ensaios de tensão.

A Figura 38 apresenta uma correlação linear de 99,98 % entre as correntes medidas com o equipamento comercial de bancada e com a solução proposta neste trabalho (coluna F). Os resultados apontam que não é necessário fazer nenhuma correção na equação (42). Porém, seguindo o mesmo procedimento feito no ensaio de tensão, a equação de reta y , apresentada na Figura 38, foi incorporada na equação (42), resultando na equação (52). Em resumo, a equação (52) corresponde à equação (42) corrigida. A coluna H na Tabela 3, apresenta os valores do cálculo de corrente eficaz realizado pelo medidor analógico com a aplicação da correção proposta na equação (52).

$$V_{rms} = 0,9849 \cdot \sqrt{(0,782013 \cdot adc_i)} + 0,3104 \quad (52)$$

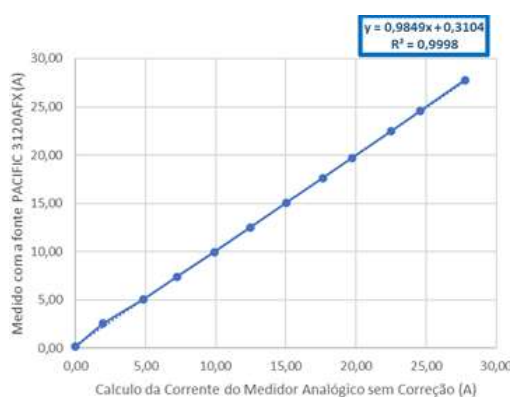


Figura 38- Corrente medida com Wattímetro Analógico x Fonte Programada

A coluna I da Tabela 3 representa o erro (“Erro 3”) que foi calculado pela diferença entre o valor medido pelo equipamento comercial (coluna D) e o valor medido no equipamento proposto após a correção dos cálculos (coluna H). Ao se comparar os

valores “Erro 2” e “Erro 3” nota-se que o uso da equação (52) foi uma solução que não obteve ganho significativo.

Os resultados de corrente foram melhores que os obtidos nos ensaios de tensão. Por essa razão não foi necessária a realização de uma segunda bateria de ensaios. Mesmo os resultados apresentados na faixa de corrente eficaz de 0 a 7,5 A (Tabela 3), que apresentaram erros maiores, estão dentro do esperado. Segundo o manual do TC utilizado, o modelo SCT-013 de 100 A pode apresentar uma não linearidade de 3% para valores de corrente abaixo de 10% do seu valor nominal.

Para mostrar que o circuito de corrente se comportou conforme o previsto, a Figura 61 apresenta uma comparação entre os valores medidos e calculados da corrente, na saída do condicionamento de sinais quando 15 A_{rms} são aplicados pela fonte. As formas de onda da corrente na saída do TC, do sinal condicionado antes e depois do multiplicador analógico e após o filtro RC foram armazenadas no osciloscópio e estão disponíveis no Apêndice B deste trabalho.

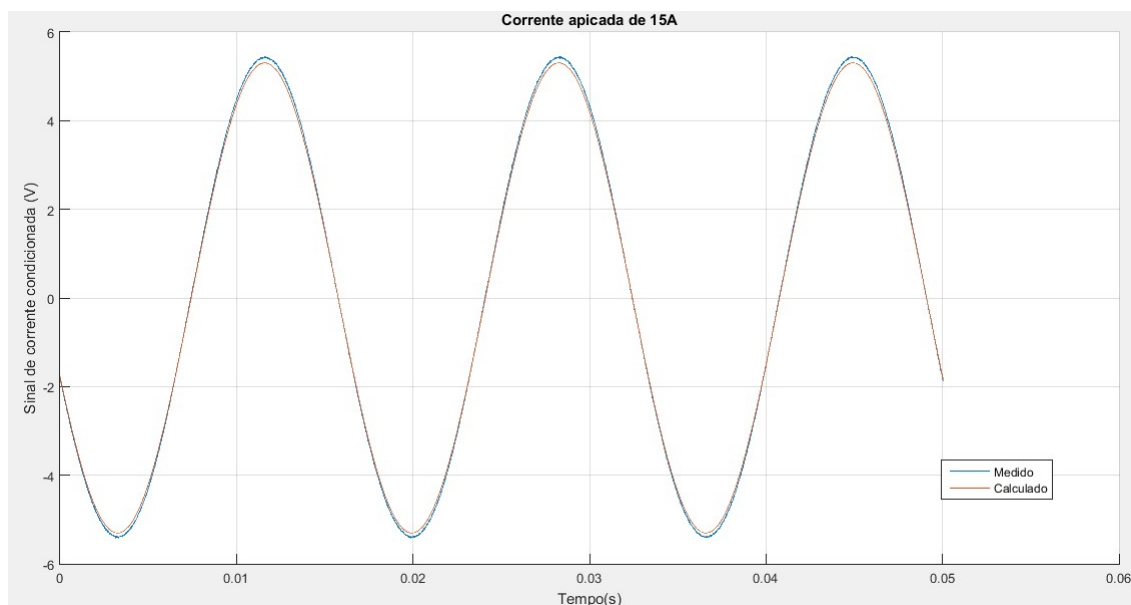


Figura 39 - Comparação do gráfico da corrente medida com o gráfico da corrente calculada na saída do condicionamento de sinais no caso de 15 Arms.

4.3 Medição de Potência Ativa

Nessa fase foi realizado em bancada o ensaio do circuito de medição da Potência Ativa.

4.3.1 Descrição do ensaio

O esquemático dos ensaios realizados para avaliação do desempenho do circuito que afere a potência ativa é similar ao esquema observado na Figura 36. A montagem do ensaio na bancada do laboratório está representada na Figura 40. O ensaio foi realizado com resistores de aproximadamente $28\ \Omega$ ($220\text{ V} / 1700\text{ W}$) conectados em diferentes configurações com ajustes na tensão da fonte para que a potência resultante esteja próxima da desejada. Os resultados obtidos foram comparados com os valores de potência das simulações e dos instrumentos comerciais.

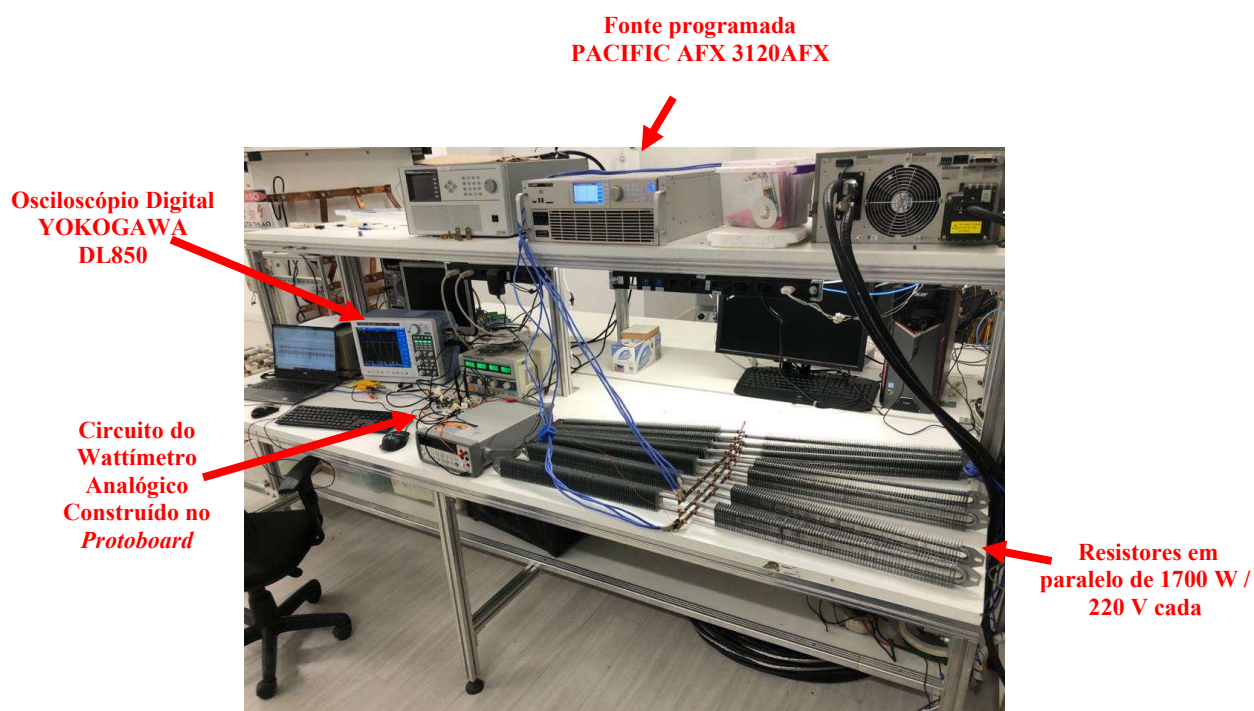


Figura 40 – Foto do ensaio montado em bancada

Foram usadas quatro configurações de conexões dos resistores verificadas a seguir (Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44):

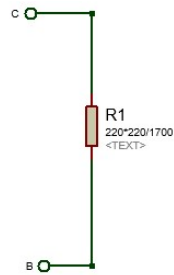


Figura 41 – 1 resistor em paralelo

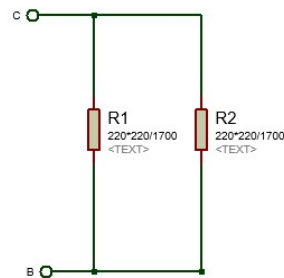


Figura 42 – 2 resistores em paralelo

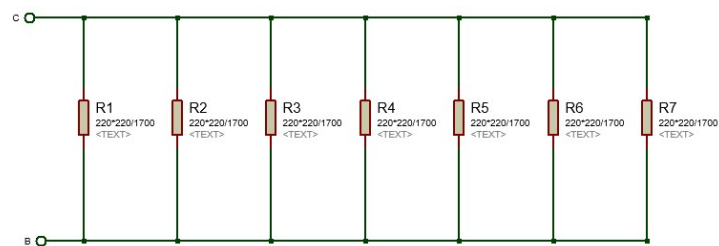


Figura 43 – 7 resistores em paralelo

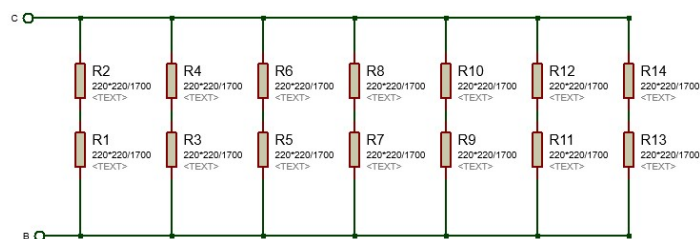


Figura 44 – 7 ramos em paralelo, com 2 resistores em série por ramo

4.3.2 Análise dos resultados

Na Tabela 4 estão os resultados da simulação de medição de potência. A coluna A apresenta as configurações de resistores que foram usadas para obter cada resistência equivalente. Na coluna B constam os valores de tensão estimados para se aplicar a potência desejada (coluna H). A coluna C indica os valores de tensão obtidos nas

simulações fornecidos pelo medidor analógico na simulação. A coluna D representa o “Erro 1” que é a diferença entre os resultados do valor de tensão estimada (coluna B) e o valor da tensão obtida na simulação (coluna C). A coluna E aponta os valores de corrente estimados. A coluna F consiste nos valores de corrente fornecidos pelo medidor analógico na simulação. A coluna G representa o “Erro 2”, que é a diferença entre os resultados do valor de corrente estimada (coluna E) e o valor da corrente obtida na simulação (coluna F).

Observa-se que os Erros 1 e 2 apresentam valores muito baixos. No caso da potência estimada de 3500 W, a corrente estimada é 29,33 A. Esse valor é maior do que a capacidade máxima projetada para o equipamento (de 28,28 A rms). Por isso a corrente irá saturar em 28,28 A rms, no caso de um valor maior que esse. Por essa razão, o ponto de 3500 W foi excluído nos ensaios experimentais.

Tabela 4 - Análise de desempenho do medidor de potência ativa na simulação

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Configuração dos Resistores	Tensão Estimada (V)	Tensão Medida na Simulação (V)	ERRO 1 (B-C)	Corrente Estimada (A)	Corrente Medida na Simulação (A)	ERRO 2 (E-F)	Potência Desejada (W)	Potência Medida na Simulação (W)	ERRO 3 (H-I)
1 resistor	119,31	119,37	-0,06	4,19	4,15	0,04	500	499,51	0,49
	168,73	168,64	0,09	5,93	5,93	0,00	1000	999,02	0,98
2 resistores em paralelo	146,13	146,20	-0,07	10,27	10,24	0,03	1500	1498,53	1,47
	168,73	168,82	-0,09	11,85	11,83	0,02	2000	1998,05	1,95
7 resistores em paralelo	100,84	100,59	0,25	24,79	24,78	0,01	2500	2497,56	2,44
	110,46	110,52	-0,06	27,16	27,18	-0,02	3000	3003,91	-3,91
	119,31	119,37	-0,06	29,33	28,28	1,05	3500	3504,42	-4,42
7 ramos em paralelo, cada ramo com 2 resistores em série	180,38	180,47	-0,09	22,18	22,16	0,02	4000	3996,09	3,91
	191,32	191,11	0,21	23,52	23,46	0,06	4500	4488,76	11,24
	201,67	201,78	-0,11	24,79	24,78	0,01	5000	5001,96	-1,96

A coluna H da Tabela 4 indica os valores de potência desejados em cada ensaio. A coluna I consiste nos valores de potência obtidos nas simulações. Constan os valores de potência fornecidos pelo medidor analógico na simulação. A coluna J representa o “Erro 3” medido pela diferença entre os resultados do valor de potência estimada (coluna H) e o valor da potência obtida na simulação (coluna J).

Eram esperados erros menores na aferição da potência ativa na simulação. Por este motivo, os dados da simulação com potência desejada de 4500 W foram analisados de forma detalhada, visto que este caso foi o que apresentou maior valor na coluna J da Tabela 4 (ERRO 3). Antecipando o resultado da análise, o circuito do medidor de potência

baseado em eletrônica analógica proposto é muito sensível às variações de comportamento das formas de onda dos sinais condicionados, inclusive aquelas variações decorrentes de erros numéricos do simulador em função do passo de integração utilizado.

A Figura 45 apresenta uma comparação dos sinais de corrente, tensão e potência simulados com os valores analíticos. É possível perceber que todos estes sinais apresentaram o comportamento esperado na simulação. Vale lembrar que p_c é o valor médio do sinal de potência instantânea.

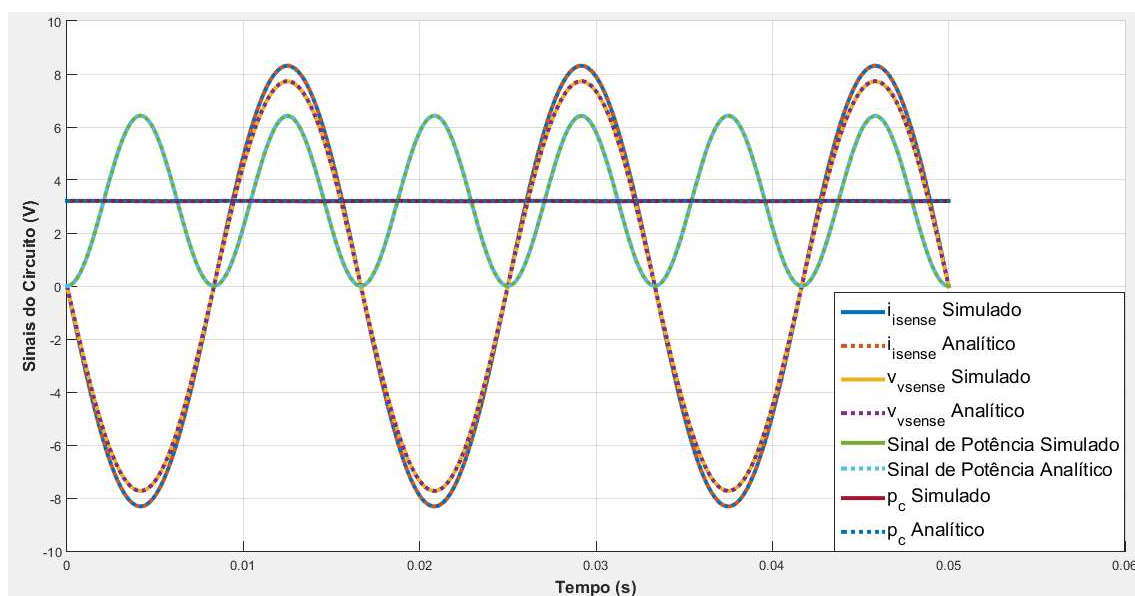


Figura 45 – Comparação das formas de onda obtidas na simulação com as obtidas analiticamente para a potência desejada de 4500 W.

Uma análise das curvas do sinal de potência instantânea, com uma janela para melhor visualização e comparação das formas de onda obtidas (Figura 46), permitiu ver diferenças provenientes do passo de integração do simulador.

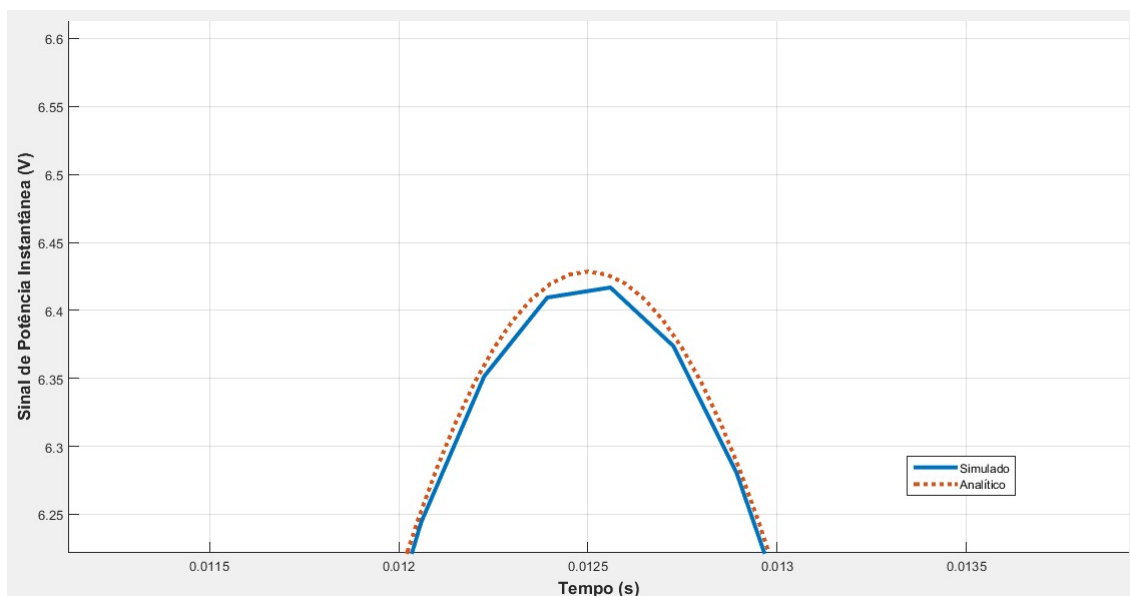


Figura 46 – Janela selecionada para comparação dos sinais de potência instantânea obtidos na simulação e analiticamente para a potência desejada de 4500 W.

A Figura 47 apresenta os sinais de potência após o filtro, obtidos na simulação e analiticamente para a potência desejada de 4500 W. Além do comportamento segmentado, característico de um passo de integração grande, é possível observar uma diminuição do valor médio do sinal, que pode ser atribuída ao filtro. Essa queda de tensão e os componentes harmônicos que não foram eliminados podem criar oscilações e variações nos resultados medidos pelo conversor analógico digital no microcontrolador. Na Figura 48 é possível verificar essas variações, onde a potência ativa calculada pelo microcontrolador variou de 4488,76 à 4502,44 W.

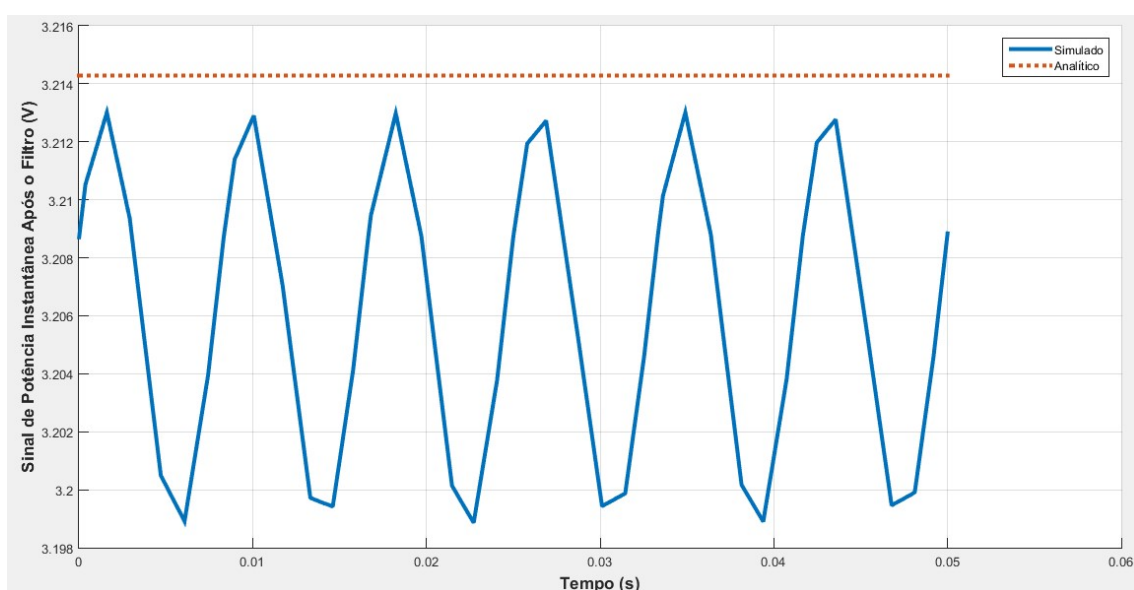


Figura 47 – Comparação dos sinais de potência instantânea após o filtro (p_c) obtidos na simulação e analiticamente para a potência desejada de 4500 W.

```

Corrente = 00704 = 23.46 A
Tensao = 00610 = 191.11 V
Potencia Aparente = 4484.08 VA
Potencia Ativa = 00656 = 4488.76 W
Potencia Reativa = 0000.00 VA
Fator de Potencia = 0100.10 % VA
*****
Corrente = 00707 = 23.51 A
Tensao = 00612 = 191.42 V
Potencia Aparente = 4500.99 VA
Potencia Ativa = 00658 = 4502.44 W
Potencia Reativa = 0000.00 VA
Fator de Potencia = 0100.03 % VA
*****
Corrente = 00706 = 23.4: A
Tensao = 00612 = 191.42 V
Potencia Aparente = 4497.80 VA
Potencia Ativa = 00658 = 4502.44 W
Potencia Reativa = 0000.00 VA
Fator de Potencia = 0100.10 % VA
*****
Corrente = 00704 = 23.46 A
Tensao = 00610 = 191.11 V
Potencia Aparente = 4484.08 VA
Potencia Ativa = 00656 = 4488.76 W
Potencia Reativa = 0000.00 VA
Fator de Potencia = 0100.10 % VA
*****
Corrente = 00704 = 23.46 A
Tensao = 00610 = 191.11 V
Potencia Aparente = 4484.08 VA
Potencia Ativa = 00656 = 4488.76 W
Potencia Reativa = 0000.00 VA
Fator de Potencia = 0100.10 % VA
*****
Corrente = 00707 = 23.51 A
Tensao = 00612 = 191.42 V
Potencia Aparente = 4500.99 VA
Potencia Ativa = 00658 = 4502.44 W
Potencia Reativa = 0000.00 VA
Fator de Potencia = 0100.03 % VA

```

Figura 48 – Resultados apresentados no terminal serial da simulação para a potência desejada de 4500 W.

Resumindo, os erros ocasionados pelo passo de integração utilizado não são preocupantes, visto que estes só existem nas simulações. Por outro lado, as oscilações na forma de onda de p_c em função dos componentes harmônicos de alta frequência que não foram eliminadas pelo filtro podem afetar o desempenho do circuito na bancada experimental. Uma sugestão de melhoria para trabalhos futuros é realizar o cálculo da média de um número de medidas. Outra possibilidade é adicionar um novo circuito amplificador após o filtro para compensar a queda de tensão neste estágio do processamento de sinais.

A Tabela 6 mostra os resultados experimentais dos ensaios de medição de potência. Na coluna A, as configurações de resistores que foram usadas para obter cada resistência equivalente. Na coluna B, os valores de potência que foram medidos com a fonte Pacific 3120AFX, com a tensão da fonte ajustada para que a potência obtida fosse similar a desejada. Na coluna C, os valores correspondentes à conversão analógica digital no microcontrolador. Esta é a variável que armazena o valor da conversão AD do sinal

de potência, adc_p , mencionada no Capítulo 3. A coluna D, consiste nos valores resultantes do cálculo de potência Ativa realizada pelo medidor analógico utilizando a equação (46). Dessa forma, a coluna D foi calculada através do valor obtido experimentalmente na coluna C.

Tabela 5 - Análise de desempenho do medidor de potência no ensaio experimental

A	B	C	D	E	F	G
Configuração dos Resistores	Potência Medida com a fonte PACIFIC 3120AFX (W)	Medida com Medidor Analógico (0 a 1023)	Calculo da Potência do Medidor Analógico sem Correção (W)	ERRO 1 (B-D)	Calculo da Potência do Medidor Analógico com Correção (W)	ERRO 2 (B-F)
1 resistor	503	64	437,93	65,07	540,23	-37,23
	1039	139	951,12	87,88	1088,73	-49,73
2 resistores em paralelo	1503	198	1354,84	148,16	1520,22	-17,22
	2000	267	1826,98	173,02	2024,85	-24,85
7 resistores em paralelo	2502	324	2217,01	284,99	2441,71	60,29
	3007	390	2668,62	338,38	2924,39	82,61
7 ramos em paralelo, cada ramo com 2 resistores em série	4019	544	3722,39	296,61	4050,66	-31,66
	4501	612	4187,68	313,32	4547,97	-46,97
	4970	679	4646,14	323,86	5037,96	-67,96

A Figura 49, apresenta um gráfico que faz uma comparação do sinal de potência calculada com os valores correspondentes à da conversão analógica digital no microcontrolador, mais precisamente, ao valor da variável que armazena o valor da conversão AD (adc_p). É possível verificar que, como esperado, esta curva apresenta um comportamento linear.

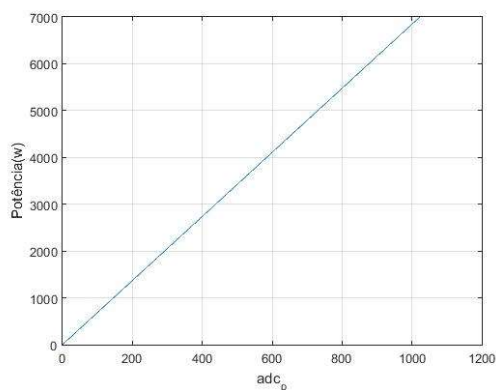


Figura 49 - Potência X adc_p

A coluna E da Tabela 5 representa o “Erro 1” que corresponde a diferença do valor de potência medido pela fonte (coluna B) e o valor medido no equipamento proposto no trabalho (coluna D). Esses erros são considerados altos, porém já esperados, pois apesar da medição de corrente ter apresentado um comportamento satisfatório, a tensão apresentou resultados que refletem negativamente nos resultados da potência. O mal condicionamento do sinal v_{sense} , já explicado no cálculo da tensão, também vai afetar a aferição da potência ativa.

A Figura 50 apresenta uma correlação linear de 99,9 % entre as potências medidas com o equipamento comercial de bancada e com a solução proposta neste trabalho. A equação de reta y apresentada na Figura 50, foi incorporada na equação (46), resultando na equação (53). Em suma, a equação (53) corresponde à equação (46) corrigida. A coluna F na Tabela 6, apresenta os valores do cálculo de potência ativa realizado pelo medidor analógico com a aplicação da correção proposta na equação (53):

$$P = 1,064(6,8426 \cdot adc_p) + 69,186 \quad (53)$$

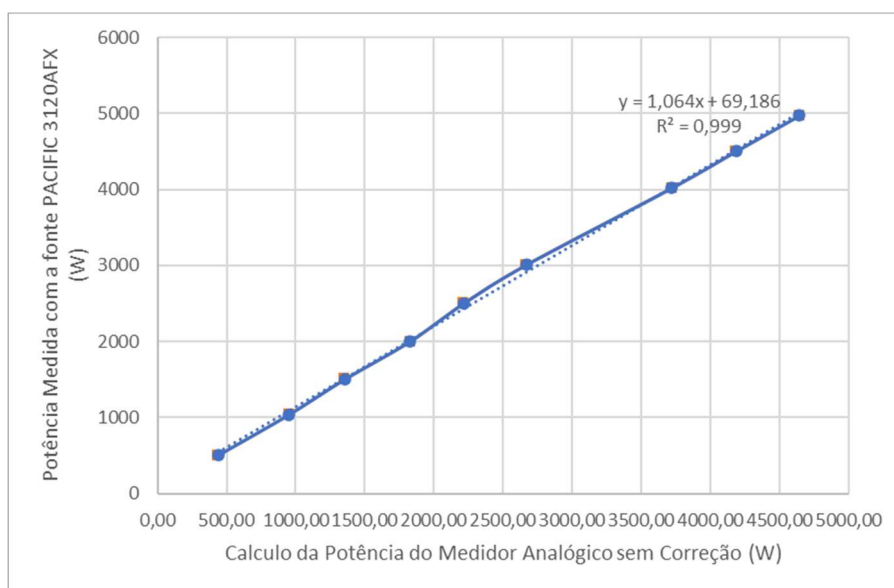


Figura 50 - Potência medida com Fonte Programada x Wattímetro Analógico

Visando um funcionamento próximo ao de um equipamento comercial, foram investigados os fatores causadores dos erros apresentados. As formas de onda do ensaio de potência estão no Apêndice C. Usando como exemplo uma potência desejada de 2500 W (Figura 51), a curva laranja que corresponde ao sinal de corrente condicionada, a curva

amarela que corresponde à tensão condicionada, a curva azul que representa o produto das duas (laranja/amarela) dividido por 10 e a curva roxa correspondente ao valor médio da potência.

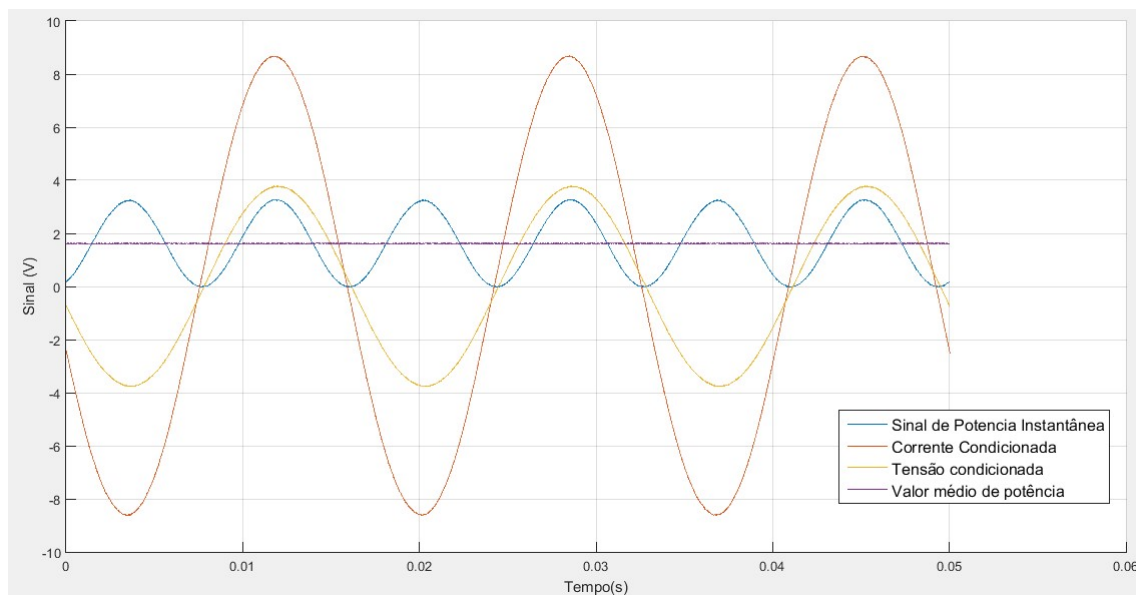


Figura 51 – Comportamento das formas de onda obtidas nos ensaios experimentais para a potência deseja de 2500 W.

A Figura 52 mostra o comportamento do wattímetro no ensaio experimental na bancada. É possível observar que as curvas de tensão condicionada e corrente condicionada não estão em fase, apesar da carga ser resistiva. As curvas deveriam cruzar o eixo horizontal juntas no mesmo instante de tempo. Essa defasagem é proveniente do TC utilizado. Uma proposta de melhoria é a troca deste dispositivo por outro de maior precisão ou mesmo o estudo de algum mecanismo de compensação de fase na forma de onda gerada por este dispositivo. Outra possibilidade é a utilização de um sensor de corrente de efeito *hall*, como será discutido adiante. O uso de um resistor *shunt* não foi considerado porque não pode ser conectado de forma não-invasiva.

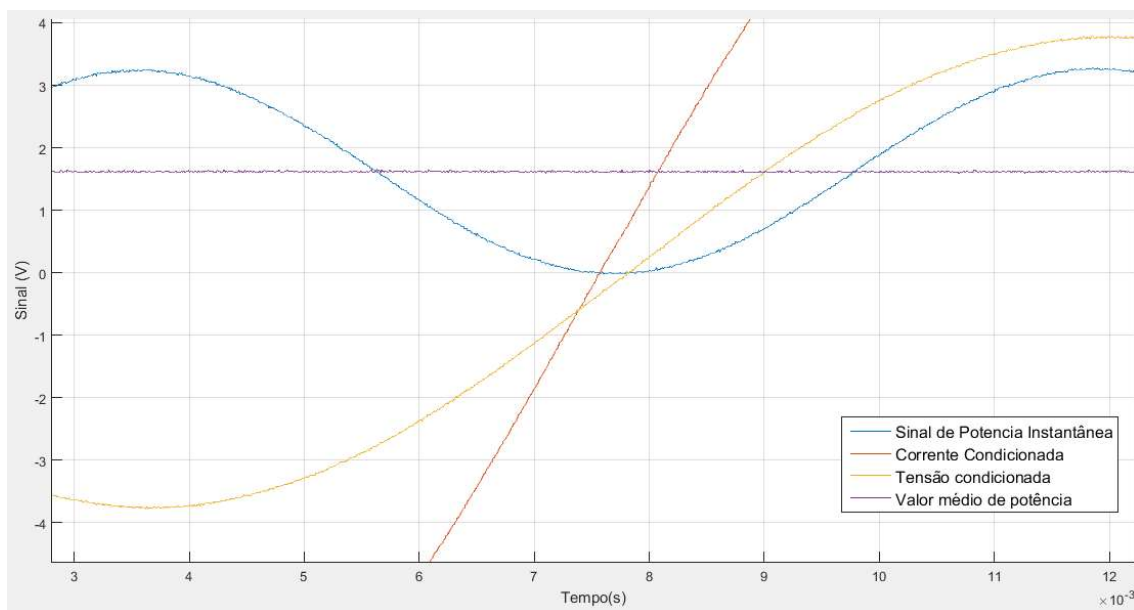


Figura 52 – Janela selecionada mostrando a defasagem das curvas de tensão e corrente condicionadas

4.4 Teste com carga resistiva

Esta etapa consiste na realização de um ensaio em bancada completo do equipamento proposto utilizando uma carga puramente resistiva.

4.4.1 Descrição do ensaio

O esquemático do ensaio realizado para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição da potência ativa com carga resistiva é similar ao observado na Figura 36. Porém, neste ensaio, a carga é composta por 7 resistências em paralelo como observado na Figura 43. O resultado obtido foi uma carga resistiva de aproximadamente $4,31 \, \Omega$. O comportamento do protótipo foi avaliado pelas curvas geradas com a nova configuração de circuito, onde foi possível comparar os resultados medidos com os resultados calculados, simulados e do equipamento comercial. A Tabela 6 indica os parâmetros fixos da carga resistiva que foi adicionada ao circuito. Também foi aplicada uma tensão na fonte de 100 V.

Tabela 6 – Parâmetros fixos do ensaio

Tensão da Fonte	Chaves Fechadas	Impedância		Impedância	
		R (Ohms)	X (Ohms)	Módulo (Ohms)	Ângulo (Graus)
100	TODAS	4,31	0,00	4,31	0,00

4.4.2 Análise de resultados

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio. Pode-se observar os valores de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência, obtidos através dos seguintes registros: valor analítico (coluna A); valor medido com fonte Pacific 3120AFX (coluna B); valor medido com o medidor analógico (coluna C) e valor referente à simulação (coluna D). A diferença entre os valores medidos pelo equipamento proposto (medidor analógico) e aqueles obtidos através da fonte Pacific 3120AFX correspondem na Tabela 7 ao “Erro 1” (coluna E). Já a diferença entre os valores simulados e os valores obtidos com a fonte Pacific 3120AFX foi classificada como “Erro 2” (coluna F).

Tabela 7 – Análise de desempenho do circuito medidor de potência com carga resistiva

	A	B	C	D	E	F
	Analítico	Medido com fonte PACIFIC 3120AFX	Medido com o Medidor Analógico	Simulação	ERRO 1 (C-B)	ERRO 2 (D-B)
Tensão Eficaz (V)	100,00	100,00	100,92	99,99	0,92	-0,01
Corrente Eficaz (A)	23,18	23,18	23,40	23,20	0,22	0,02
Potência Ativa (W)	2317,98	2318,00	2273,50	2319,65	-44,50	1,65
Potência Reativa (var)	0,00	0,00	640,23	0,00	640,23	0,00
Potência Aparente (VA)	2317,98	2318,00	2361,53	2319,30	43,53	1,30
Fator de Potência(FP)	1,00	1,00	0,96	1,00	-0,04	0,00

Na Tabela 7, a tensão e a corrente apresentam erros compatíveis com as análises já realizadas neste capítulo. O mal condicionamento do sinal de tensão, explicado anteriormente, comprometeu toda a análise de potência e as correções aplicadas no cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente podem gerar ainda mais inconsistências nos resultados. Isso ocorre porque a potência aparente foi calculada com os valores de tensão e corrente corrigidos, enquanto a potência ativa passou por um processo de correção independente. Os cálculos da potência reativa, e do fator de potência dependem dos valores de S e P e, portanto, estão sujeitos a muitas propagações de erros.

A Figura 53 e a Figura 54 mostram as comparações entre as curvas do sinal medido e do sinal analítico de tensão e corrente, respectivamente. Observa-se que as curvas do sinal de corrente estão bem próximas, enquanto as curvas do sinal de tensão apresentam um comportamento diferente. O “Erro” 1 de potência é considerado alto o que indica problemas no condicionamento do circuito de tensão que geram consequências nos resultados de potência ativa. Os valores de “Erro” 2 mostram que na simulação o equipamento proposto se comportou da forma esperada.

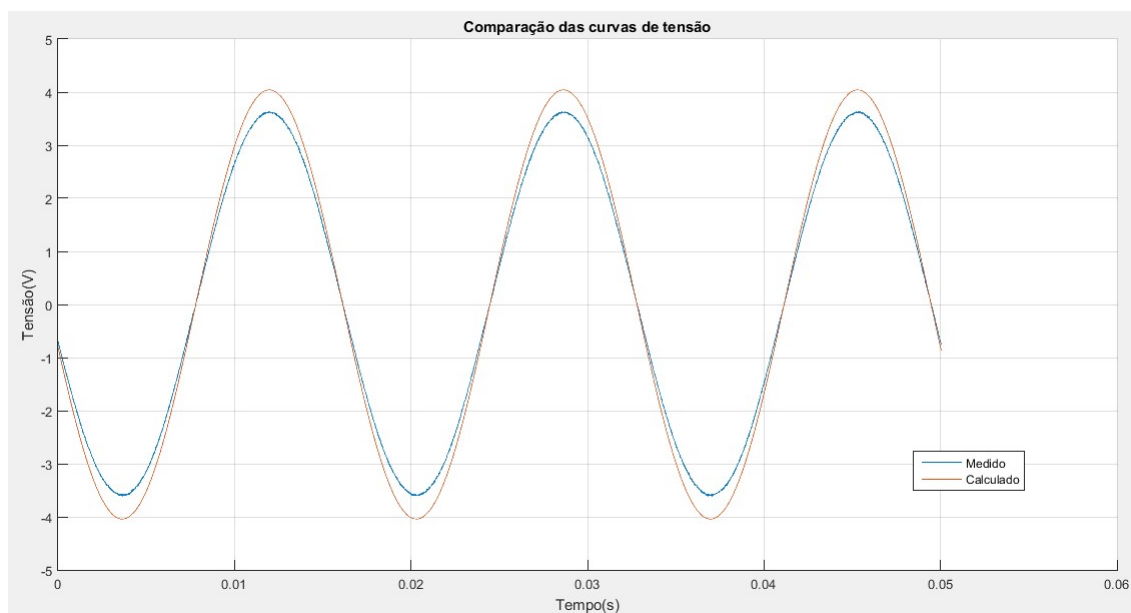


Figura 53 – Comparação dos sinais de tensão medido e calculado.

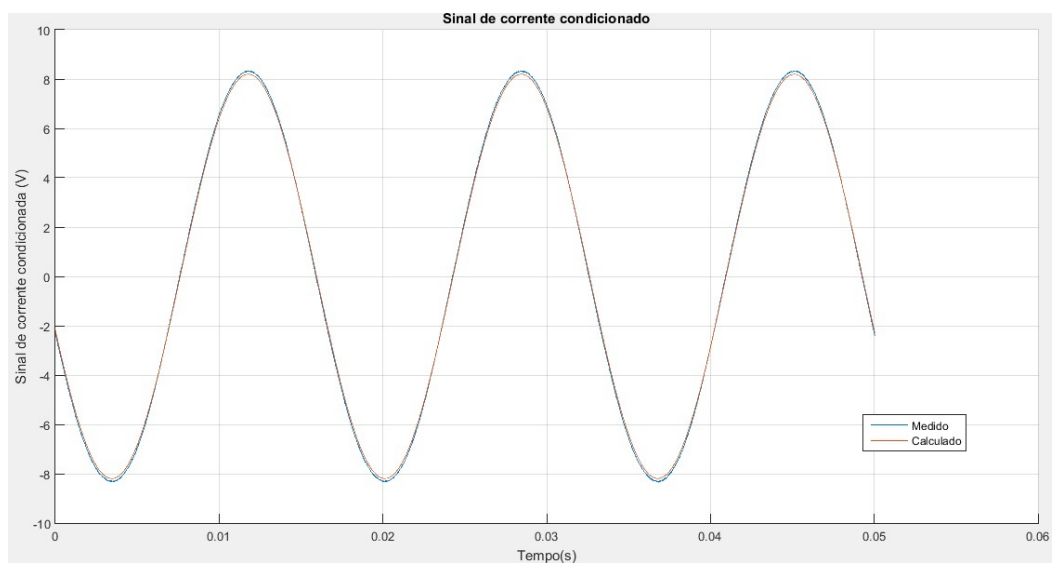


Figura 54 - Comparação dos sinais de corrente medido e calculado.

Na Figura 55, pode-se observar o funcionamento do wattímetro com a adição de uma carga resistiva no circuito. As curvas dos valores experimentais medidos, resultantes dos sinais de corrente (laranja) e tensão (amarelo) condicionados e a curva do sinal de potência medido (azul), que corresponde a resultante do produto dos sinais de corrente e tensão divididos por 10, são apresentadas na Figura 55. Através do ensaio, foi observado que elas apresentaram o comportamento esperado. As curvas dos sinais de tensão, corrente e potência obtidas através dos ensaios experimentais apresentam um comportamento que caracteriza um bom funcionamento do protótipo. As curvas de tensão e corrente também apresentam uma defasagem como apontado anteriormente. A Figura 56 mostra a janela selecionada que indica a defasagem das curvas de tensão e corrente condicionadas.

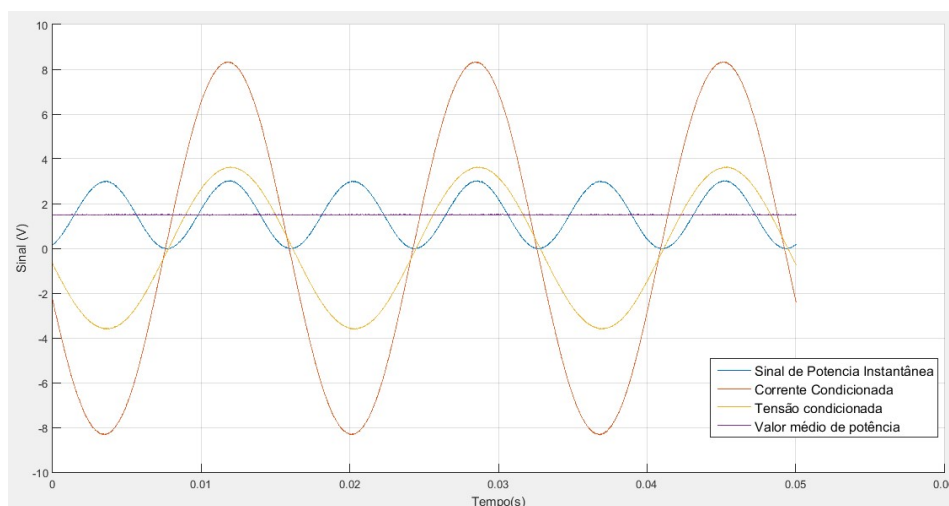


Figura 55 - Comportamento das formas de onda obtidas nos ensaios experimentais com adição de carga resistiva no circuito

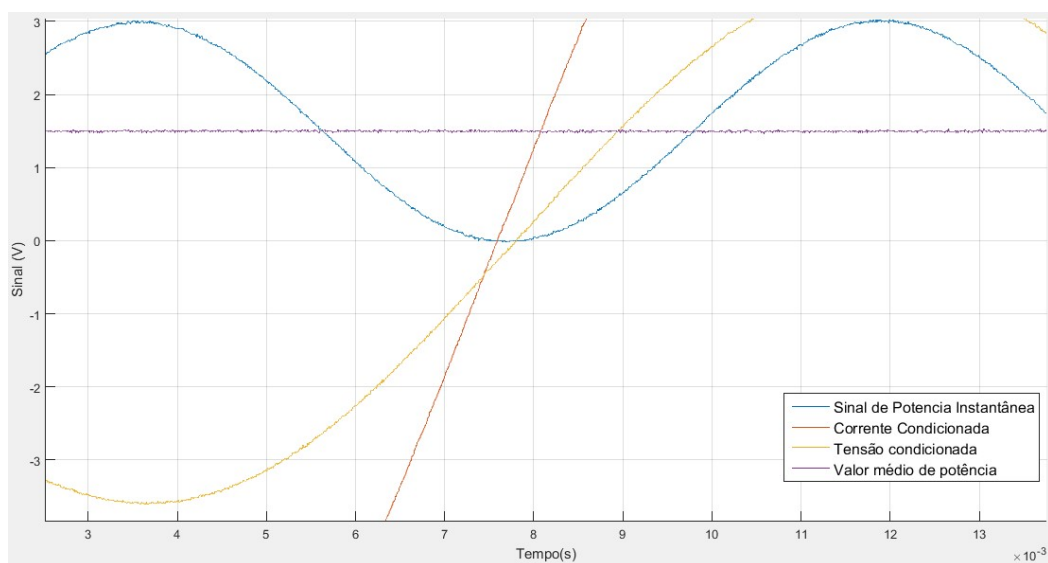


Figura 56 - Janela selecionada mostrando a defasagem das curvas de tensão e corrente condicionadas

4.5 Teste com carga resistiva com diodo

Nessa seção, constam os resultados experimentais do ensaio completo do equipamento proposto utilizando uma carga resistiva em série com um diodo.

4.5.1 Descrição do ensaio

O esquemático do ensaio realizado para avaliação de desempenho do circuito responsável pela aferição da medição de potência com um diodo ligado em série com a resistência de carga pode ser observado na Figura 57. A ideia do ensaio foi inserir um diodo SKKH570/18E (Figura 28) no circuito, para observar a situação, na qual a forma de onda da corrente não apresentaria um comportamento senoidal. A presença do diodo no circuito faz com que só se tenha corrente em um sentido, gerando uma forma de onda que, se decomposta pela série de Fourier, apresentará componente CC e harmônicas em frequência múltiplas da frequência da rede. Dessa forma foram comparados os resultados e as formas de onda medidas com instrumentos comerciais e os valores simulados.

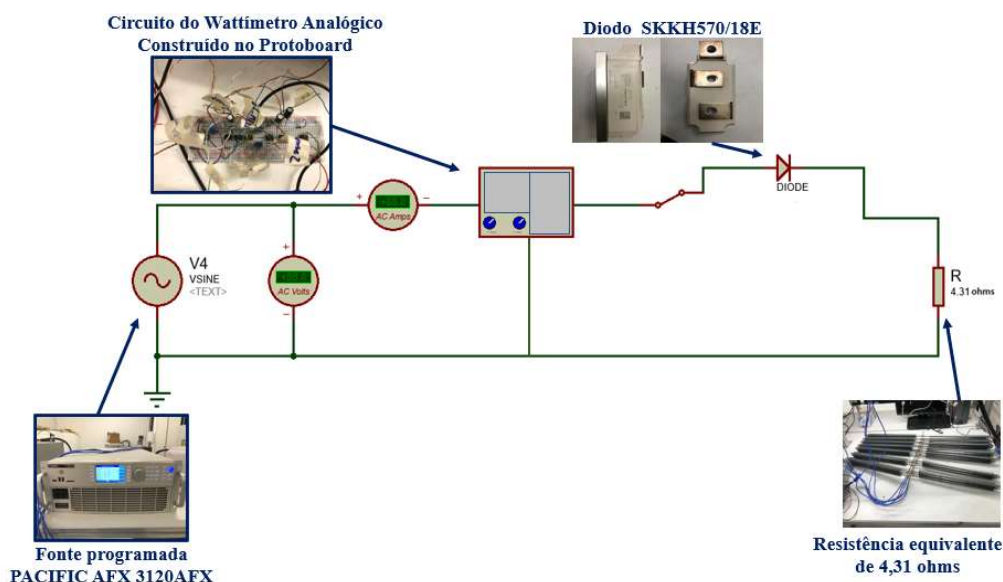


Figura 57 - Esquema dos ensaios para avaliação de desempenho do circuito com diodo em série com a carga

4.5.2 Análise de resultados

A Tabela 8 mostra os valores de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência para o circuito proposto com a

adição de um diodo. Na coluna A, os valores foram obtidos através de cálculos analíticos (os cálculos integram o Apêndice D). Já a coluna B mostra os mesmos valores medidos com a fonte Pacific 3120AFX, enquanto a coluna C indica os mesmos registros alcançados com o medidor analógico. Por fim, a coluna D indica os valores obtidos na simulação.

Apesar de ter sido utilizada a nomenclatura “potência reativa” na Tabela 8, sabe-se que ela não é de fato reativa uma vez que a potência reativa está associada à indutores e capacitores, elementos passivos, que fazem parte do circuito. A potência não ativa está associada ao uso de componentes semicondutores, que quando chaveados deixam o circuito com características não senoidais.

A diferença entre os valores medidos pelo equipamento proposto (medidor analógico) e aqueles obtidos pela fonte Pacific 3120AFX correspondem ao “Erro 1” (coluna E) na Tabela 8. Por outro lado, a diferença entre os valores simulados e os valores medidos obtidos na fonte Pacific 3120AFX correspondem ao “Erro 2” (coluna F).

Na tabela 8, os valores de “Erro 1” são maiores do que era esperado, ficando claro que a inserção do diodo prejudicou os resultados do equipamento. Portanto, é necessária uma investigação das possíveis causas que geraram essa distorção. As diferenças entre as colunas A, B e D podem ser atribuídas ao modelo do diodo utilizado em cada situação. No cálculo analítico, por exemplo, o diodo foi considerado ideal.

Tabela 8 – Análise do circuito medidor de potência com carga resistiva

	A	B	C	D	E	F
	Analítico	Medido com fonte PACIFIC 3120AFX	Medido com o Medidor Analógico	Simulação	ERRO 1 (C-B)	ERRO 1 (D-B)
Tensão Eficaz (V)	100,00	100,00	100,92	99,69	0,92	0,31
Corrente Eficaz (A)	16,40	16,34	10,50	16,45	-5,84	-0,11
Potência Ativa (W)	1160,09	1149,00	854,70	1176,93	-294,30	-27,93
Potência Reativa (var)	1160,09	1161,79	639,73	1141,96	-522,06	19,83
Potência Aparente (VA)	1640,62	1634,00	1067,60	1639,89	-566,40	-5,89
Fator de Potência(FP)	0,71	0,70	0,72	1,020	0,02	-0,32

Na Figura 58, observa-se o funcionamento do wattímetro com a adição do diodo no circuito. Estão representadas na imagem as curvas dos valores experimentais dos sinais de tensão (amarelo) e corrente (laranja) condicionadas, a curva do sinal de potência medido (azul) e do valor de potência média (roxo). Nota-se que o medidor não está funcionando com o diodo no circuito. A curva de corrente condicionada apresenta um comportamento fora do esperado, demonstrando claramente distorção no valor de i_{isense} medido no circuito.

O TC utilizado no experimento não funciona para a situação proposta, pois os TCs são componentes que só funcionam em correntes alternadas. No circuito com diodo, a componente CC deforma a forma de onda obtida. Para remediar essa situação, uma possível solução seria a substituição do TC por um sensor de efeito Hall, uma vez que o princípio de funcionamento destes equipamentos é adequado para medições em CC. Além disso, existem modelos de sensores de corrente de efeito Hall que podem ser instalados de forma não invasiva ao contrário dos resistores *shunts*. Essa substituição proporcionaria uma melhor precisão e um aumento na confiabilidade dos resultados.

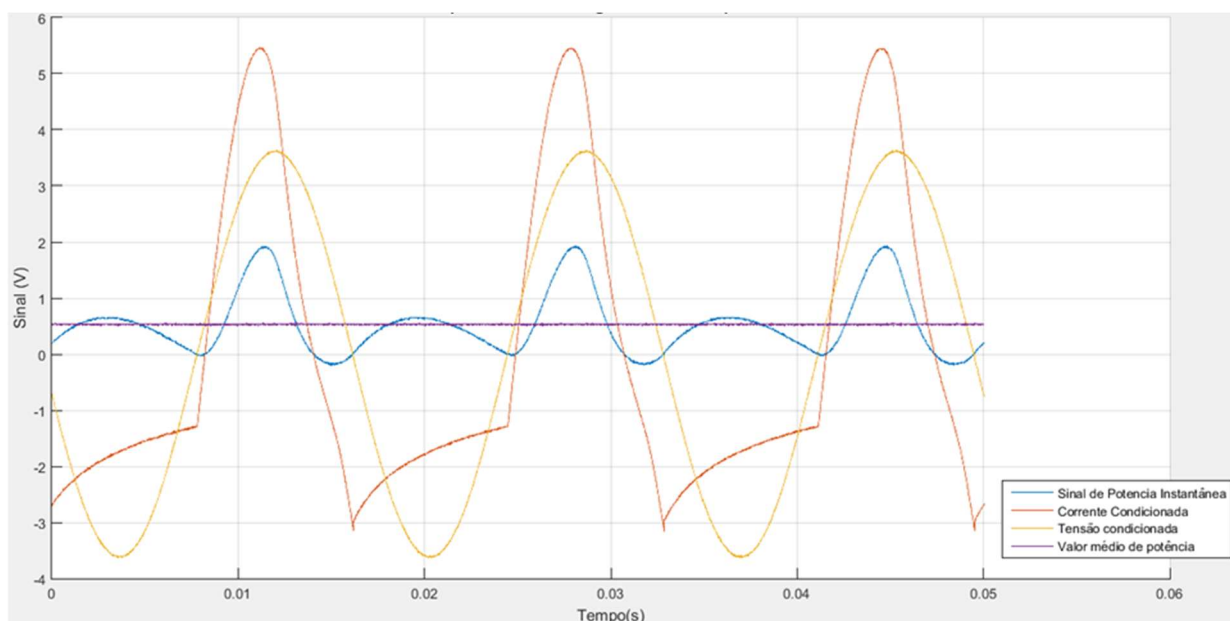


Figura 58 - Comportamento das formas de onda obtidas no ensaio experimental do circuito com diodo

A Figura 59 apresenta a forma de onda da corrente obtida com o sensor de efeito Hall. É possível comparar o sinal de corrente medido pelo TC na Figura 58 e concluir que a forma de onda da corrente obtida não corresponde ao comportamento real da corrente.

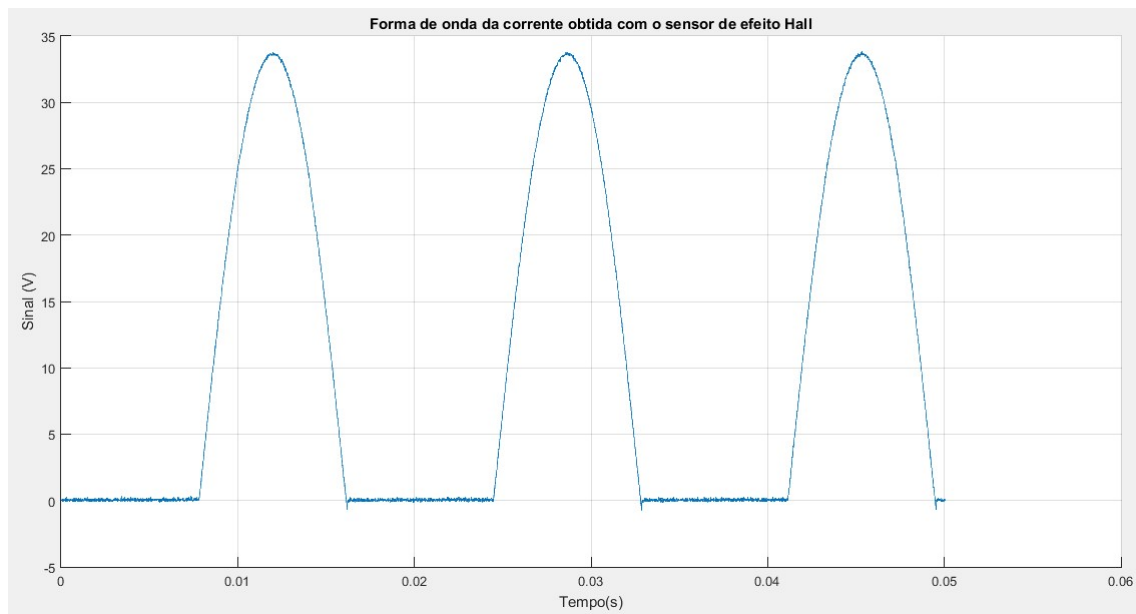


Figura 59 - Forma de onda da corrente obtida com o sensor de efeito Hall.

Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros

O desenvolvimento de medidores de energia e wattímetros utilizando microcontroladores de baixo custo cresceu significativamente nos últimos anos. No entanto, uma das grandes dificuldades encontradas neste tipo de projeto é o fato de os microcontroladores utilizados não possuírem a capacidade para realizar o processamento com a precisão e a rapidez necessárias.

Este trabalho apresentou um protótipo de wattímetro baseado em eletrônica analógica de baixo custo. Este processo requer menor poder de processamento por parte dos microcontroladores, deixando-os livres para executarem funções secundárias, como conexão com a internet e gerenciamento de resultados através de banco de dados. O equipamento proposto utiliza um multiplicador analógico de quatro quadrantes cuja função é realizar operações matemáticas em tempo real. Com isso, são gerados resultados confiáveis de medição de potência para diferentes cargas, considerando a presença de harmônicos na rede.

O presente trabalho foi simulado com auxílio de ferramentas computacionais que geraram resultados que confirmaram um funcionamento adequado e um bom potencial do equipamento proposto para a medição de potência. Os resultados experimentais, por outro lado, mostraram elementos que precisam ser revisados e melhorados para que o medidor proposto apresente um correto funcionamento em bancada. Dentre eles estão:

- A implementação de um seletor de escala de tensão e corrente para medição das grandezas com maior precisão. Durante os experimentos, constatou-se que quando pequenos valores de tensão e corrente são medidos os cálculos mostraram-se muito sensíveis a pequenas variações obtidas nas conversões ADs.
- A montagem do circuito em uma placa de circuito impresso. O circuito montado em uma placa de *protoboard* está sujeito a ruídos que geram instabilidades nas medições. Uma das características observadas experimentalmente é a alta sensibilidade do equipamento proposto à pequenas variações no comportamento dos sinais condicionados, ruídos e quedas de tensão dos filtros.

- A melhoria do condicionamento de sinais de tensão através de três ações: redimensionamento do divisor de tensão, aumento dos valores das resistências e remoção do trimpot da composição. O trimpot utilizado para o ajuste do divisor de tensão apresentou aquecimento, fazendo com que a saída do divisor de tensão apresentasse um comportamento não linear. Também é necessário o ajuste de ganho após o *buffer*, de forma semelhante ao que foi feito no circuito de condicionamento de sinais de corrente.
- Correção do circuito de transdução e condicionamento de sinais para que não apresentem defasagens entre as formas de onda de tensão e corrente. Identificou-se que as curvas de tensão condicionada e corrente condicionada não estão em fase. Essa defasagem é proveniente do TC utilizado. A melhoria proposta consiste em trocar o TC utilizado por outro equipamento de maior precisão ou algum mecanismo de compensação de fase na forma de onda gerada por este dispositivo. Uma possibilidade seria a utilização de um sensor de corrente de efeito hall.

Depois da realização da primeira bateria de ensaios em laboratório, os problemas que foram apontados na montagem do protótipo na bancada geraram resultados que permitiram uma rica análise de dados, de onde surgiram diversas propostas de melhorias para o equipamento projetado. Em função disso, o grande mérito deste trabalho está na análise de desempenho das soluções propostas, seja por meio de simulações ou pela análise dos resultados experimentais. Os resultados encontrados foram considerados positivos, cumprindo o objetivo de não sobrecarregar o processamento realizado pelo microcontrolador, deixando-o livre para executar outras funções.

5.1. Trabalhos futuros

No futuro, espera-se transformar o wattímetro analógico aqui proposto em um medidor analógico inteligente de energia. Para isso serão feitas melhorias, incluindo acabamentos para tornar o equipamento com uma aparência de um produto comercial, podendo-se destacar o desenvolvimento de uma interface (LCD e bluetooth) para o envio de dados para o celular. A solução proposta neste trabalho também se destaca por poder ser embarcada em outros dispositivos, podendo por ser exemplo ser utilizada para monitorar o consumo de energia elétrica em diferentes pontos de uma instalação, ou

mesmo em projetos de automação residencial, podendo assim realizar uma análise da qualidade de energia.

Bibliografia

- [1] P. Correia, A. Culchesk e E. Rego, "Is the energy tariff expensive for captive customers in Brazil?," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, pp. 4506-4511, Novembro 2016.
- [2] A. M. Salunkhe e R. Jagtap, "PIC BASED WATT-METER USING AN ANALOG MULTIPLIER," *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 5, 2016.
- [3] G. Bucci, E. Fiorucci, F. Ciancetta, D. Gallo, C. Landi e M. Luiso, "Embedded Power and Energy Measurement System Based on an Analog Multiplier," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, pp. 2248-2257, Agosto 2013.
- [4] F. L. R. Mussoi, "POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA," *CEFET/SC*.
- [5] C. K. Alexander e M. N. Sadiku, Fundamentos de Circuitos Elétricos, 5ª ed., AMGH, 2013.
- [6] J. Mamede Filho, Instalações elétricas industriais, LTC, 2007.
- [7] Universidade de São Paulo [USP], "Circuitos com formas de ondas periódicas não senoidais," 2005.
- [8] M. R. Suhett, "Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrônicos," *[Dissertação de Mestrado] Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)*, 2008.
- [9] C. Budeanu, "Reactive and fictitious powers," *Rumanian National Institute*, vol. 2, pp. 127-138, 1927.
- [10] E. J. Lima, "Reflexões sobre as teorias de potência elétrica em regime não senoidal," *[Dissertação de Mestrado] Universidade Federal de Uberlândia*, 2014.
- [11] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, Fundamentos de Física 3, 7ª ed., vol. III, São Paulo: LTC, 2009.
- [12] Geração Smart Grid, "Medidores eletromecânico: um marco histórico do setor energético," 7 Julho 2017. [Online]. Available: <http://geracaosmartgrid.com.br/medidores-eletromecanicos-um-marco-historico-do-setor->

energetico/#:~:text=Eletromec%C3%A2nicos%20fizeram%20hist%C3%B3ria,B
rasil%2C%20Am%C3%A9rica%20Latina%20e%20%C3%81frica..

- [13] P. B. A. d. Oliveira, “Punaro Bley Engenheiro elétrico Medidor de kWh/Medidores Estáticos,” [Online].
- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL], “Resolução Normativa N.482,” 17 Abril 2012. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- [15] Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL], “Nota Técnica 0129/2012-SRD/ANEEL,” 2012.
- [16] W. F. Correia, “Inclusão de métodos estatísticos como apoio ao faturamento de energia realizado por medidores inteligentes,” *[Tese de Doutorado] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)*, 2018.
- [17] C. Cassiolato, “Condicionamento de Sinais Analógicos e Sensores,” Smar Technology Company, 2011. [Online].
- [18] A. J. Wahlbrinck, “Monitoramento da rede elétrica por meio de aplicação WEB e IOT,” *[Trabalho de Conclusão de Curso] Universidade do Vale do Taquari*, 2018.
- [19] Analog Devices, “Data Sheet Analog Multiplier,” 2015. [Online]. Available: www.analog.com.
- [20] F. R. Pavan, F. F. B., M. T. Silva e F. A. Cipparrone, “Conceitos sobre resposta em frequência,” *Universidade de São Paulo*, p. 21, 2017.
- [21] S. Pandey e B. Singh, “Analog Multiplier Based Single Phase Power Measurement,” *J Electr Electron Syst*, vol. 5, 2016.
- [22] W. A. Souza, “Estudos de técnicas de análise e tecnologias para o desenvolvimento de medidores inteligentes de energia residenciais,” *[Tese de Doutorado] Universidade Estadual de Campinas*, p. 206, 2016.
- [23] V. B. Huback, “Medidas ao Combate a Perdas Elétricas Não Técnicas em Áreas com Severas Restrições à Operação de Sistemas de,” *[Dissertação de Mestrado] Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ)*, p. 167, 2018.
- [24] J. Z. Moro, “Medidor de consumo de energia elétrica descentralizado e com interface WEB,” *[Dissertação de Mestrado] Universidade Estadual de Campinas*, 2013.
- [25] G. B. Wolaniuk, “Medidor de Energia em Média Tensão,” *[Dissertação de Mestrado] LAC-TEC/IEP*, 2011.

- [26] A. Mínguez, “Medidores de energia ativa:Funcionamento, práticas usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns,” *[Trabalho de Conclusão de Curso]* Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

Apêndice A - Formas de onda obtidas nos ensaios de tensão

Este apêndice apresenta as formas de onda obtidas pelo Osciloscópio YOKOGAWA DL850 DIGITAL durante os ensaios de avaliação do circuito medidor de tensão do wattímetro baseado em eletrônica analógica proposto neste trabalho. Nos ensaios, a nomenclatura utilizada pelo equipamento difere da apresentada neste trabalho. Segue abaixo a descrição do significado das variáveis presentes na tela do osciloscópio:

- Vsense: Tensão na saída do divisor de tensão.
- Vsense2: Tensão após o condicionamento de sinais, antes do AD633.
- V2: Saída do AD633.
- V2_med: Saída do filtro RC.

As referidas formas de onda são apresentadas da Figura 60 à Figura 70.

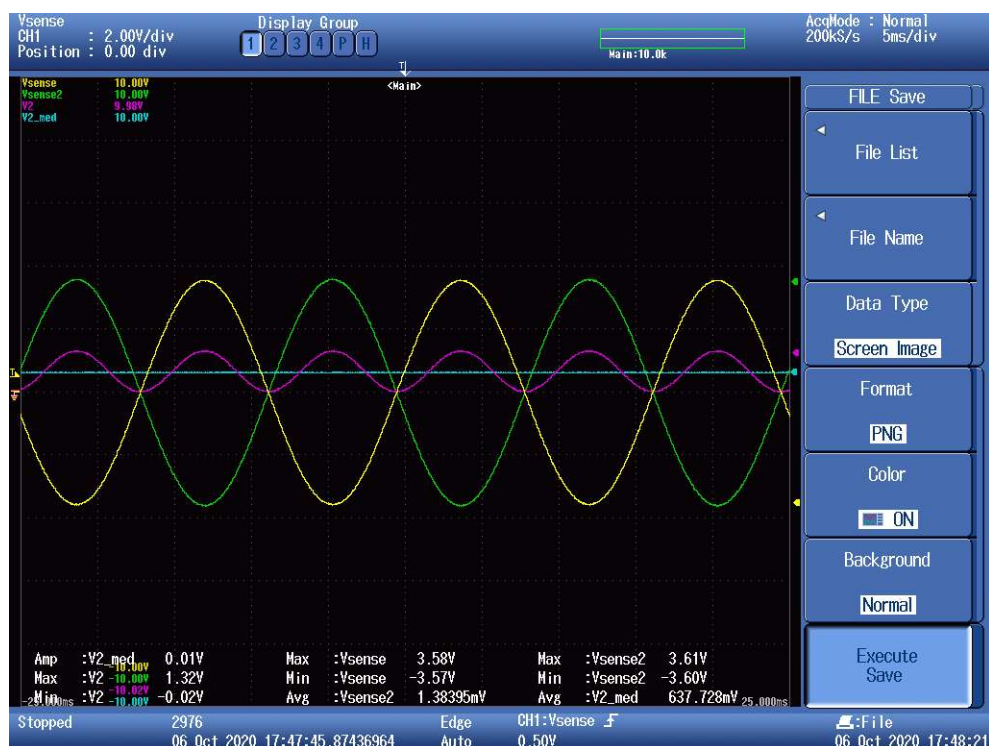


Figura 60 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 100 V

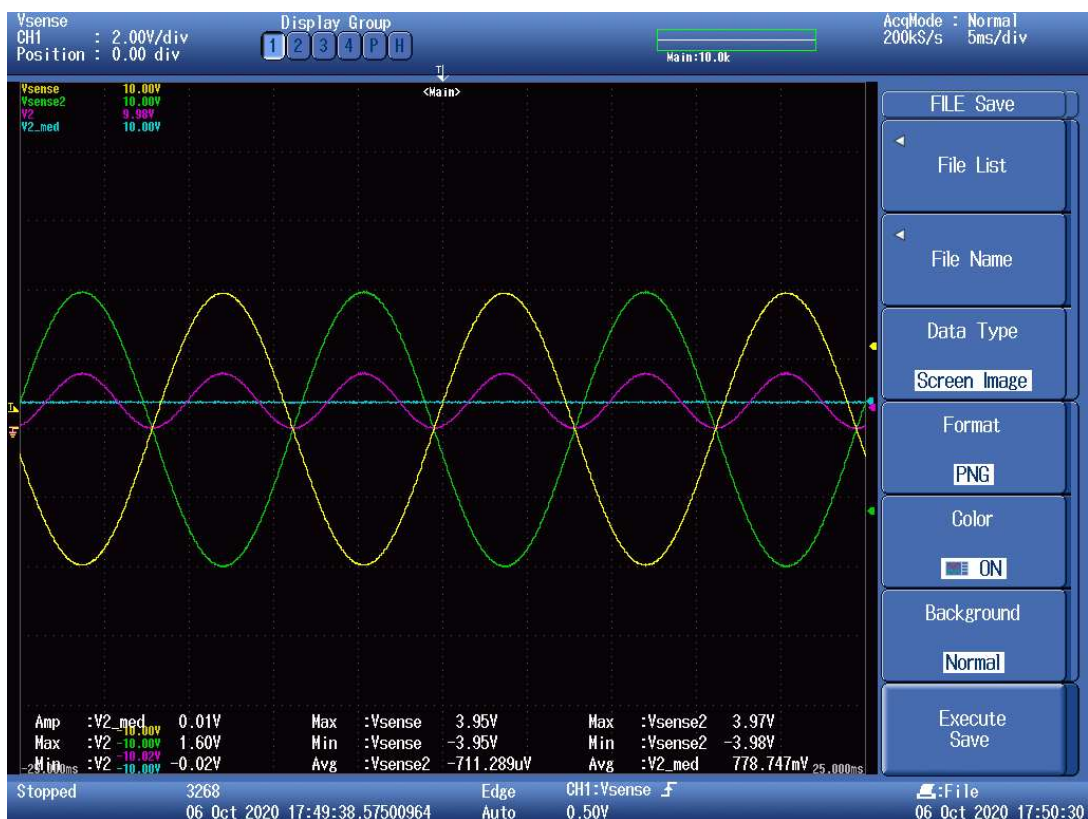


Figura 61 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 110 V

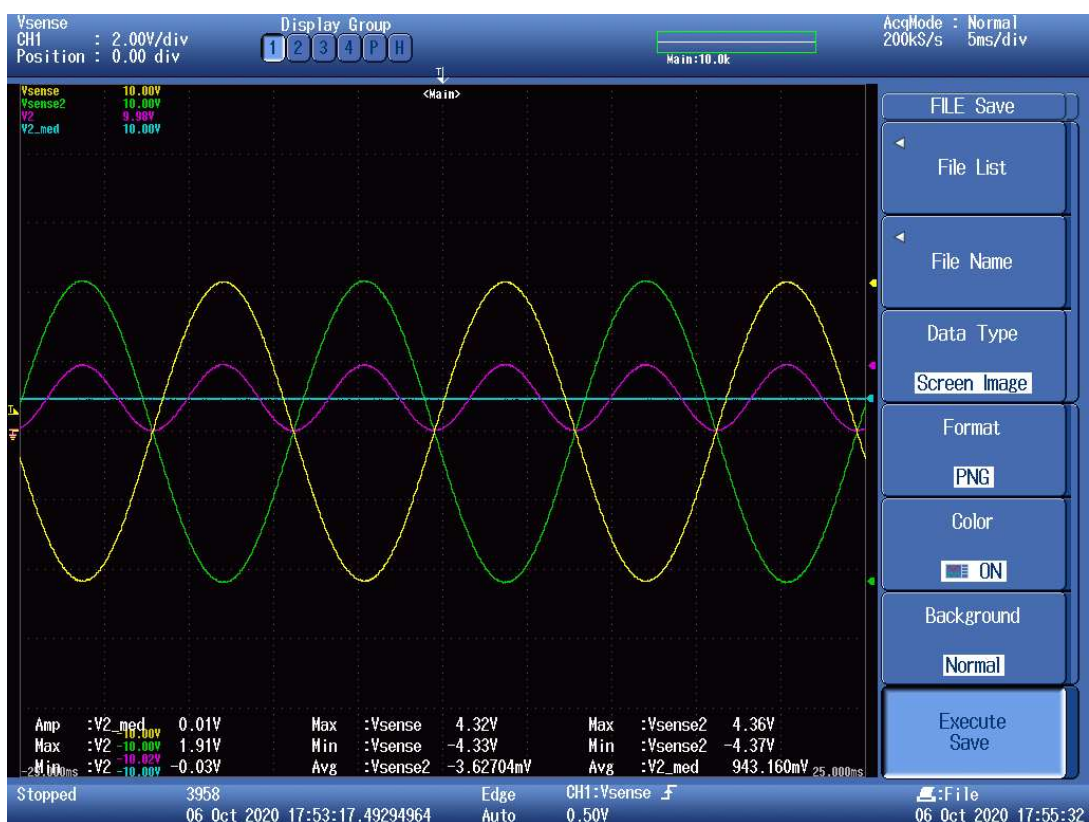


Figura 62 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 120 V

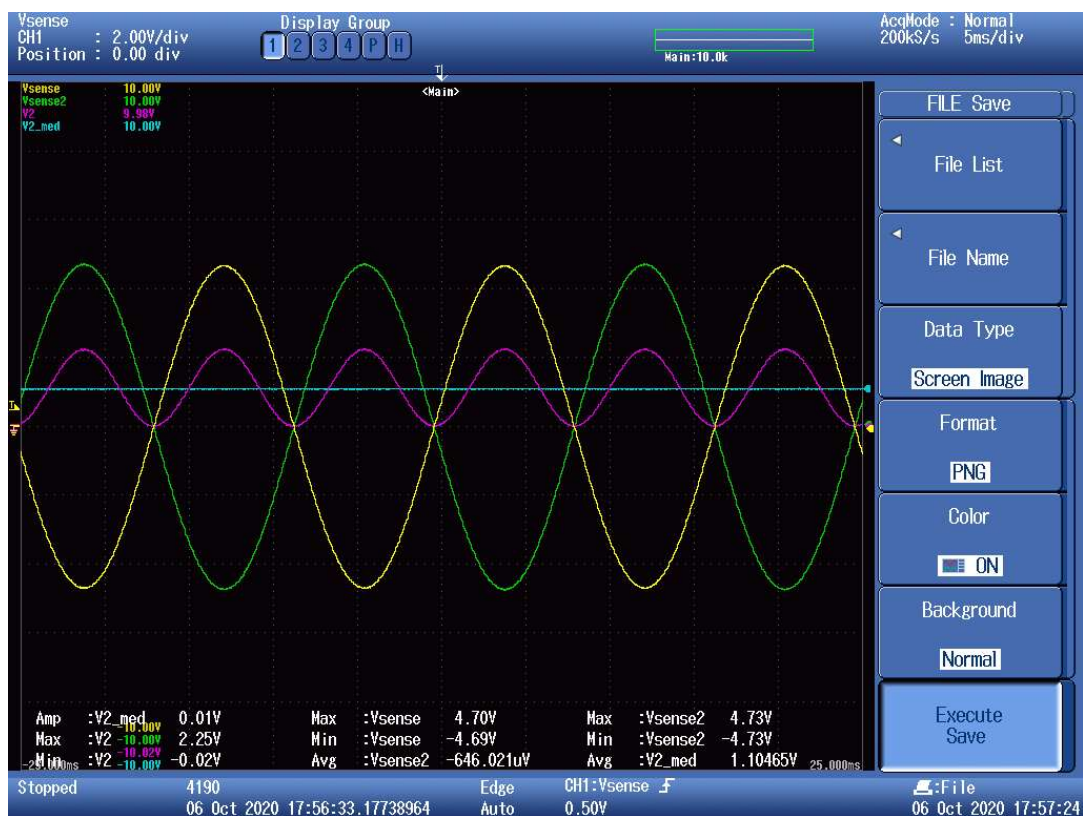


Figura 63 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 130 V

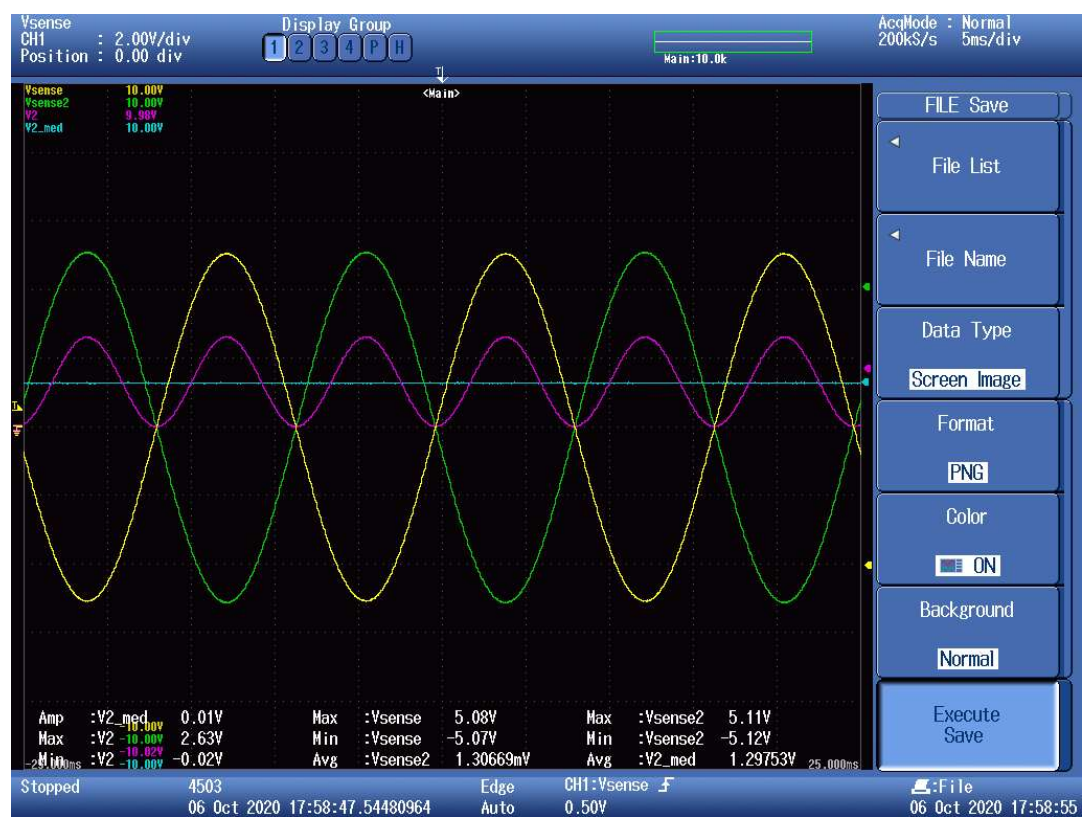


Figura 64 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 140 V

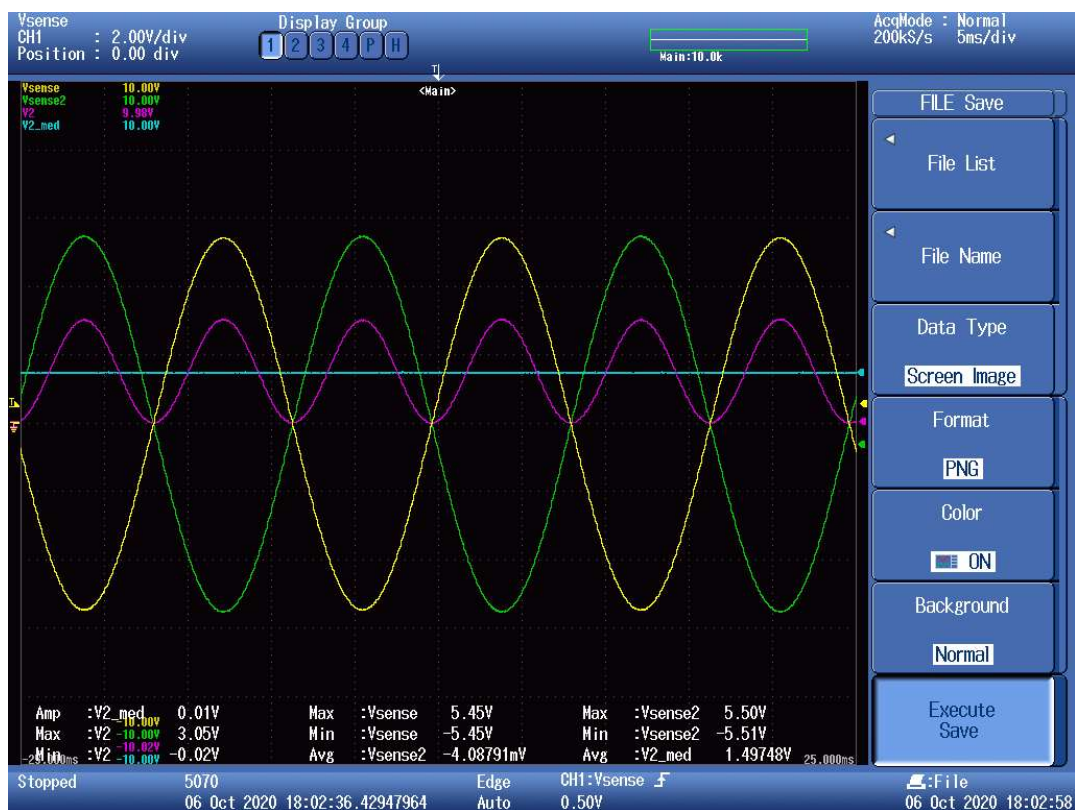


Figura 65 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 150 V



Figura 66 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 160 V



Figura 67 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 170 V



Figura 68 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 180 V



Figura 69 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 190 V



Figura 70 – Formas de onda obtidas no ensaio de tensão de 200 V

Apêndice B - Formas de onda obtidas nos ensaios de corrente

Este apêndice apresenta as formas de onda obtidas pelo Osciloscópio YOKOGAWA DL850 DIGITAL durante os ensaios de avaliação do circuito medidor de corrente do wattímetro baseado em eletrônica analógica proposto neste trabalho. No momento dos ensaios, a nomenclatura utilizada pelo equipamento difere da apresentada neste trabalho. Sendo assim, será apresentada uma descrição do significado das variáveis presentes na tela do osciloscópio:

- I_TC: Tensão nos terminais do TC.
- Isense: Tensão após o condicionamento de sinais, antes do AD633.
- I2: Saída do AD633.
- I2_med: Saída do filtro RC.

As referidas formas de onda estão representadas no intervalo entre a Figura 71 e a Figura 73



Figura 71 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 5 A

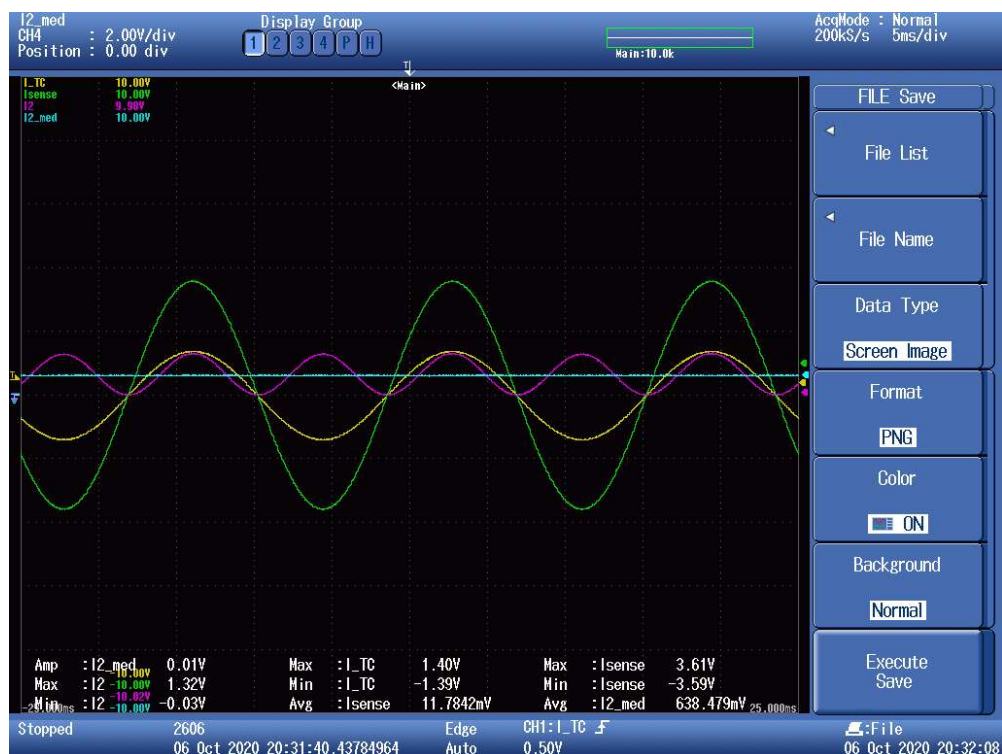


Figura 72 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 10 A



Figura 73 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 15 A

Apêndice C - Formas de onda obtidas nos ensaios de potência

Este apêndice apresenta as formas de onda obtidas pelo Osciloscópio YOKOGAWA DL850 DIGITAL durante os ensaios de avaliação do circuito medidor de potência do wattímetro baseado em eletrônica analógica proposto neste trabalho. No momento dos ensaios, a nomenclatura utilizada pelo equipamento difere da apresentada neste trabalho. Abaixo a descrição do significado das variáveis presentes na tela do osciloscópio:

- V_sense2: Sinal de tensão após o condicionamento de sinais, antes do AD633.
- Isense: Sinal de corrente após o condicionamento de sinais, antes do AD633.
- p: Potência instantânea, saída do AD633.
- p2_med: Saída do filtro RC.

As referidas formas de onda são apresentadas da Figura 74 a Figura 83.

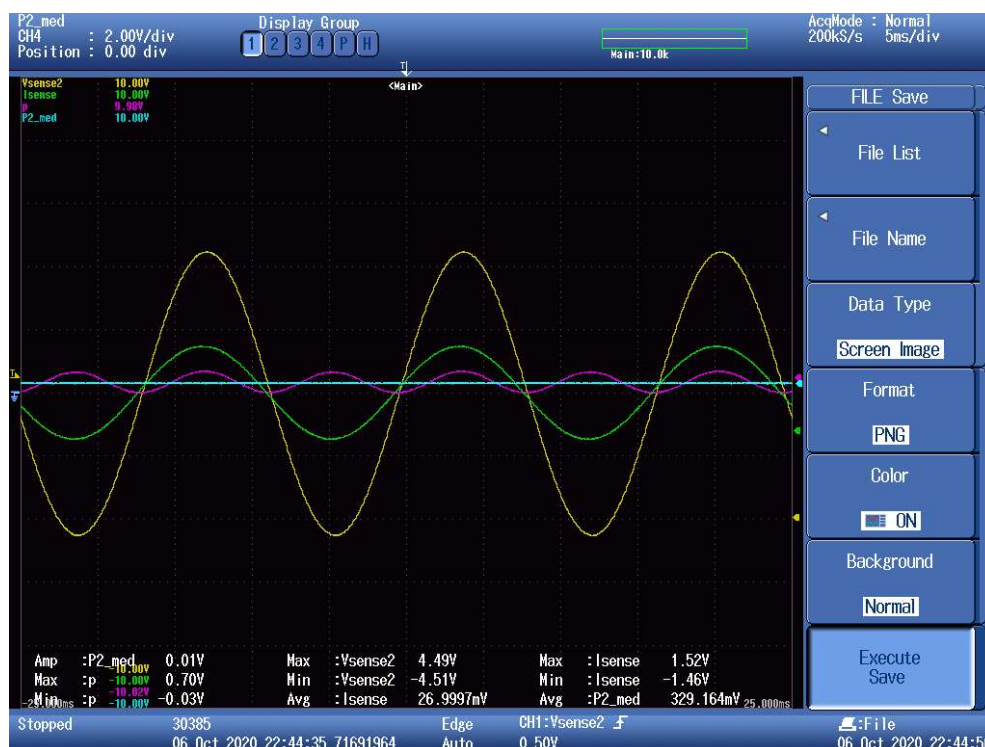


Figura 74 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 500 w

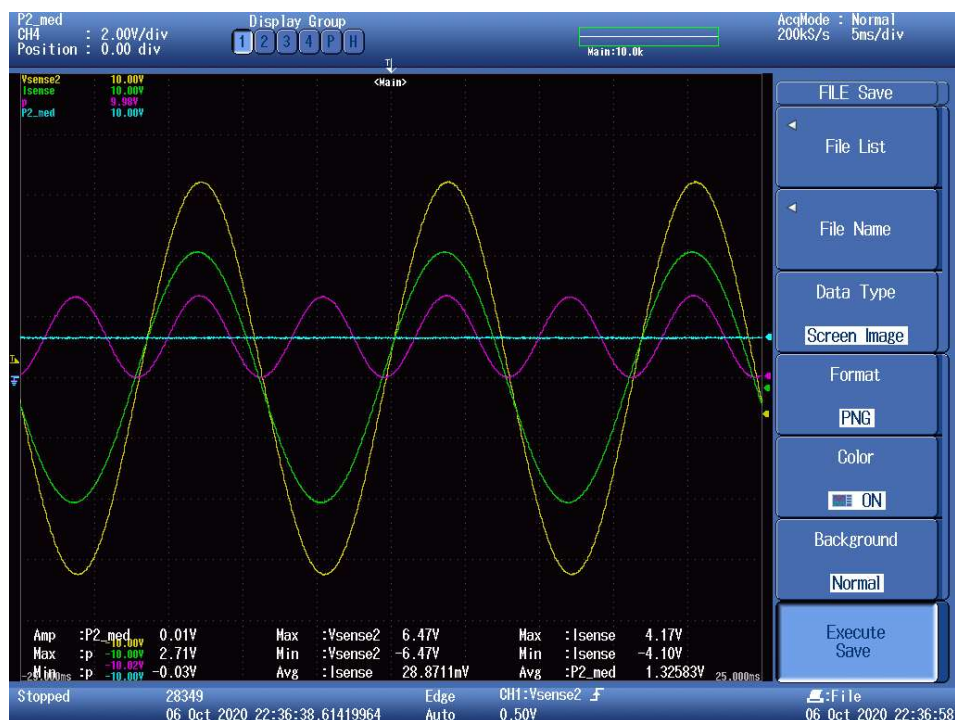


Figura 75 – Formas de onda obtidas no ensaio de corrente de 1000 w



Figura 76 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 1500 w



Figura 77 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 2000 w



Figura 78 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 2500 w



Figura 79 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 3000 w



Figura 80 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 3500 w



Figura 81 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 4000 w



Figura 82 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 4500 w



Figura 83 – Formas de onda obtidas no ensaio de potência de 5000 w

Apêndice D - Cálculos dos valores analíticos no circuito com adição do diodo

Este apêndice apresenta as fórmulas utilizadas para calcular os valores analíticos de tensão eficaz, corrente eficaz e potência ativa no circuito responsável pela aferição da medição de potência com um diodo ligado em série. Na Figura 84, é apresentado um circuito modelo geral com uma fonte de tensão senoidal num circuito também composto por um diodo e uma resistência. São apresentadas as formas de onda de tensão do circuito, para explicar o comportamento do circuito com diodo.

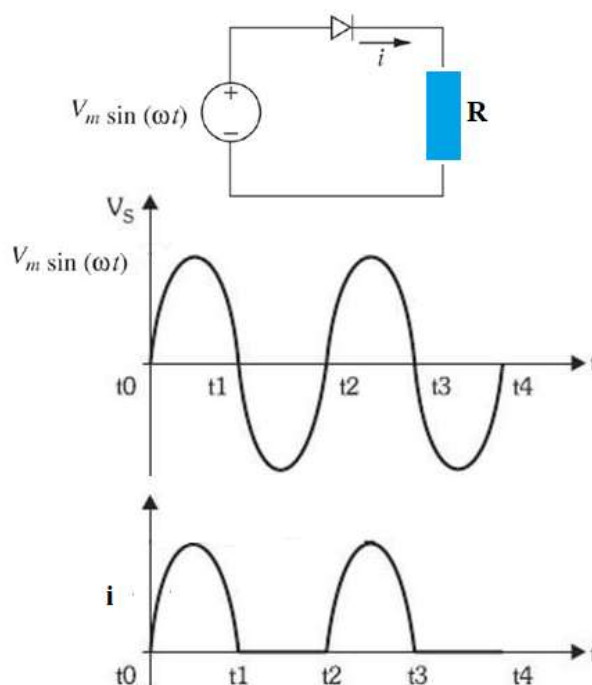


Figura 84 – Formas de onda de um modelo de circuito com diodo em série com uma carga resistiva

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(t) d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{V_m}{R} \sin(\omega t)\right)^2 d\omega t} = \frac{\left(\frac{V_m}{R}\right)}{\sqrt{2}\sqrt{2}}$$

$$I_{rms} = \frac{(V_{rms})}{\sqrt{2}R} = \frac{V_m/\sqrt{2}}{\sqrt{2}R}$$

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(t)i(t)d\omega t$$

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_m \sin(\omega t)) \left(\frac{V_m}{R} \sin(\omega t) \right) d\omega t$$

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{V_m^2}{R} \sin^2(\omega t) d\omega t$$

$$p(t) = \frac{V_m^2}{2\pi R} \int_0^\pi \sin^2(\omega t) d\omega t$$

$$p(t) = \frac{V_m^2}{2\pi R} \int_0^\pi \frac{1}{2} (1 - \cos(2\omega t)) d\omega t$$

$$p(t) = \frac{V_m^2}{4\pi R} \int_0^\pi (1 - \cos(2\omega t)) d\omega t$$

$$p(t) = \frac{V_m^2}{4\pi R} \left[\omega t - \frac{\sin(2\omega t)}{2} \right]_0^\pi$$

$$p(t) = \frac{V_m^2}{4\pi R} [\pi] = \frac{V_m^2}{4R} = \frac{100^2}{4 \cdot 4,31} = 1160,1 \text{ W}$$