

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LENILSON ANDRADE BARBOSA

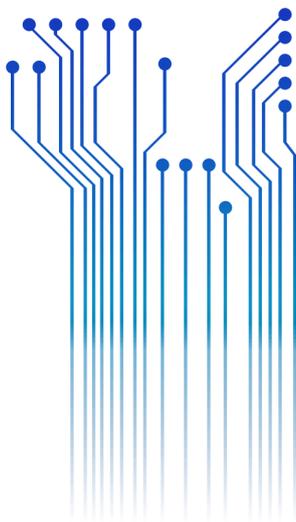


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
WATTÍMETRO MICROPROCESSADO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2016

LENILSON ANDRADE BARBOSA

WATTÍMETRO MICROPROCESSADO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande
2016

LENILSON ANDRADE BARBOSA

WATTÍMETRO MICROPROCESSADO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe, mulher valorosa, corajosa e trabalhadora que sempre me incentivou a estudar e a sonhar com dias melhores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela conservação da vida e pela oportunidade de realizar mais um sonho.

Agradeço à minha mãe, Leni, entre outras coisas, pelo incentivo nos momentos de desmotivação.

Agradeço à minha esposa, Luciene e ao meu filho, Ângelo, pelo amor e por entenderem a minha ausência em alguns momentos.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Tarso, por todo o aprendizado e pelas oportunidades de crescimento tanto profissional quanto pessoal.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, contribuíram para essa conquista.

*“Conhece-te,
Aceita-te,
Supera-te.”*

Agostinho.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o protótipo de um wattímetro digital monofásico para utilização no Laboratório da disciplina de Equipamentos Elétricos, em ensaios de transformadores de distribuição. O protótipo é baseado em uma plataforma microcontrolada, a qual foi confeccionada utilizando componentes e sensores de custo reduzido. O protótipo desenvolvido permitiu a aquisição e o processamento dos dados relativos aos sinais de tensão e corrente, e o consequente cálculo das potências ativa e aparente. De forma geral, os erros percentuais, verificados quando da comparação entre os resultados obtidos por meio do protótipo e de sinais registrados com osciloscópio, mostraram-se baixos.

Palavras-chave: Protótipo, Wattímetro, Microcontrolador, Ensino, Ensaio, Transformadores, Calibração, ATmega328, Medição.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um wattímetro eletrodinâmico	17
Figura 2 – Imagem de um wattímetro comercial digital.....	18
Figura 3 – Diagrama de montagem – ensaio de curto circuito.	21
Figura 4 – Diagrama de montagem – ensaio de circuito aberto.	21
Figura 5 – Representação do microcontrolador Atmega328.	22
Figura 6 – Esquema do circuito de condicionamento de tensão.	24
Figura 7 – Fotografia – Módulo ACS712.....	26
Figura 8 - <i>Layout</i> desenvolvido para a PCI.	27
Figura 9 – Face superior da PCB do protótipo.	27
Figura 10 – Protótipo montado em um gabinete.	28
Figura 11 – Diagrama de blocos que representa a metodologia empregada.	29
Figura 12 – Setup para ensaio de curto circuito.	30
Figura 13 – Setup para ensaio de circuito aberto.....	31
Figura 14 – Formas de onda dos sinais de tensão e corrente – ensaio de curto circuito.	32
Figura 15 – Medição apresentada no <i>display</i> do wattímetro para o ensaio de curto circuito.	32
Figura 16 – Formas de onda dos sinais de tensão e corrente – ensaio de circuito aberto.	34
Figura 17 – Medição apresentada no <i>display</i> do wattímetro para o ensaio de circuito aberto.....	34
Figura 18 – Fotografia do experimento realizado para a parametrização das equações das sub-faixas de tensão.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 60 % da corrente nominal.	33
Tabela 2 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 80 % da corrente nominal.	33
Tabela 3 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 60 % da tensão nominal.	34
Tabela 4 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 80 % da tensão nominal.	34
Tabela 5 – Comparativo dos resultados obtidos pelo protótipo e pelo multímetro de precisão.....	36

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Motivação.....	15
1.3	Estrutura do trabalho.....	16
2	Fundamentação Teórica.....	17
2.1	Wattímetro.....	17
2.2	Cálculo de potência.....	19
2.3	Ensaio de curto circuito e de circuito aberto em transformadores.....	20
2.3.1	Ensaio de curto circuito.....	20
2.3.2	Ensaio de circuito aberto.....	21
2.4	Atmega 328.....	22
3	Material e Métodos.....	23
3.1	Microcontrador Atmega328.....	23
3.2	Condicionamento de sinais.....	23
3.2.1	Sensor de tensão.....	24
3.2.2	Sensor de corrente.....	25
3.3	Fonte de alimentação.....	26
3.4	Placa de circuito impresso.....	26
3.5	Gabinete.....	28
3.6	Testes e validação do protótipo.....	29
3.6.1	Ensaio de curto circuito.....	30
3.6.2	Ensaio de circuito aberto.....	31
4	Resultados.....	32
4.1	Ensaio de curto circuito.....	32
4.2	Ensaio de circuito aberto.....	33
4.3	Parametrização das equações relacionadas à leitura de tensão.....	35
4.4	Manual de instruções do wattímetro.....	37
5	Conclusão.....	38
	Bibliografia.....	39
	APÊNDICE A – Manual de instruções do wattímetro.....	40
1	Introdução.....	40
2	Regras de segurança.....	40
3	Especificações.....	41
3.1	Gerais.....	41
3.2	Elétricas.....	41
4	Descrição geral.....	41
5	Procedimentos de medição.....	42

5.1	Corrente	42
5.2	Tensão.....	43
5.3	Potência em circuitos monofásicos	43
5.4	Potência em circuitos Trifásicos (método dos dois wattímetros)	44
Apêndice A: esquema do circuito do watímetro.....		45

1 INTRODUÇÃO

O atual contexto da educação em Engenharia demanda o emprego de metodologias de ensino que superem as tradicionais aulas teóricas. Neste sentido, é cada vez mais comum o aparecimento de disciplinas de laboratório. Estas visam permitir que os conceitos aprendidos em sala de aula possam ser verificados na prática.

No ensino de Engenharia Elétrica não é diferente. Logo, é comum a realização de experimentos didáticos para o desenvolvimento de competências no que diz respeito ao funcionamento e a operação de determinados equipamentos.

No contexto da disciplina Laboratório de Equipamentos Elétricos, são realizados ensaios em diversos equipamentos utilizados na transmissão e distribuição de energia elétrica. Dentre eles, desacatam-se os experimentos com transformadores de potência. Tais experimentos visam à caracterização dos transformadores quanto a diversos fatores como, por exemplo, operação a vazio e em curto circuito.

Especificamente nos ensaios de transformadores de distribuição que visam o levantamento das características de circuito aberto e de curto-circuito e, portanto, cálculo de perdas em tais equipamentos, necessita-se de um dispositivo de medição de potência.

O wattímetro é o equipamento desenvolvido para medição da potência consumida por um elemento ou circuito. Neste sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um wattímetro para a medição de grandezas elétricas e consequente cálculo de potência em transformadores de distribuição. No entanto, a aplicação do protótipo desenvolvido é mais ampla, na medida em que ele pode ser utilizado para a medição de potência em outras situações, desde que respeitados os seus limites máximos de tensão e de corrente suportáveis.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um wattímetro digital monofásico para auxílio em ensaios de transformadores de distribuição. O

equipamento deve registrar amostras de tensão e corrente, fazer o tratamento matemático e exibir os resultados em um display.

Ainda foram buscados os seguintes objetivos:

- i. Projeto e construção de uma placa de circuito impresso para o wattímetro;
- ii. Construção de um gabinete;
- iii. Teste e validação do protótipo;
- iv. Produção de um manual simplificado de funcionamento e uso a fim de ser anexado ao guia de experimentos do laboratório da disciplina Equipamentos Elétrico.

1.2 MOTIVAÇÃO

Este projeto visa contemplar o princípio da unidade entre teoria e prática, permitindo o desenvolvimento de competências nas áreas de eletrônica analógica, aquisição e processamento de dados, microcontroladores e afins, além do desenvolvimento e teste de placa de circuito impresso.

Neste sentido, o espírito crítico, a problematização da realidade e a criatividade deverão contribuir na concepção do projeto, além de ampliar e sedimentar os conhecimentos alcançados no decorrer da graduação.

Outro objetivo é reduzir o número de instrumentos necessários para a realização de medições em ensaios de transformadores de potência. Além disso, o desenvolvimento de tecnologia própria gera flexibilidade e independência, na medida em que podem ser feitas alterações no projeto para atendimento de necessidades específicas relacionadas a determinadas medições.

Este projeto também visa o suprimento do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), uma vez que o protótipo desenvolvido poderá ser utilizado no em pesquisas ou ensaios, inclusive servindo ao Laboratório da Disciplina de Equipamentos Elétricos do Departamento de Engenharia Elétrica, no qual são estudados os transformadores de potência.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo destina-se à parte introdutória. No segundo capítulo é apresentada uma breve fundamentação teórica a respeito do funcionamento básico de um wattímetro, do cálculo de potência, dos ensaios de curto circuito e circuito aberto em transformadores e do microcontrolador Atmega328. No capítulo 3 são apresentados o material e os procedimentos empregados no desenvolvimento do protótipo, assim como os testes realizados em laboratório. No capítulo 4 os resultados dos ensaios são apresentados e é realizada uma análise comparativa entre eles e os valores obtidos por meio de um osciloscópio e do *software* Matlab®. Finalizando o trabalho são apresentadas no capítulo 5 as conclusões e as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será realizada uma apresentação geral a respeito do funcionamento de um wattímetro e dos ensaios de curto circuito e circuito aberto realizados em transformadores. Além disso, serão apresentadas informações sobre o microcontrolador utilizado para processamentos dos dados obtidos a partir das medições de tensão e de corrente.

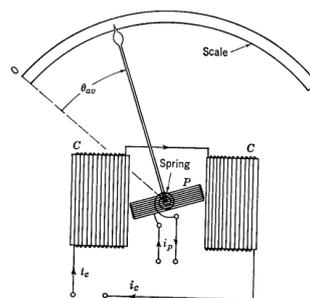
2.1 WATTÍMETRO

O wattímetro é um instrumento desenvolvido para medição de potência elétrica fornecida ou dissipada. Ele é constituído, basicamente, por elementos que medem simultaneamente os valores de tensão e corrente e multiplica-os para obter a potência em watts. Sua conexão é feita de forma que dois dos seus terminais estejam em paralelo com o elemento, efetuando a medição da tensão, e os dois terminais restantes fiquem interpostos no caminho da corrente.

Idealmente, o wattímetro deve medir a tensão sem desvio de qualquer fluxo de corrente, e a corrente sem introduzir qualquer queda de tensão aos seus terminais (SOUZA, 2013).

Existem dois tipos básicos de wattímetros: eletrodinâmicos e eletrônicos. Os wattímetros eletrodinâmicos são constituídos por um par de bobinas (bobina de tensão e bobina de corrente) e por um galvanômetro de bobina móvel, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de um wattímetro eletrodinâmico

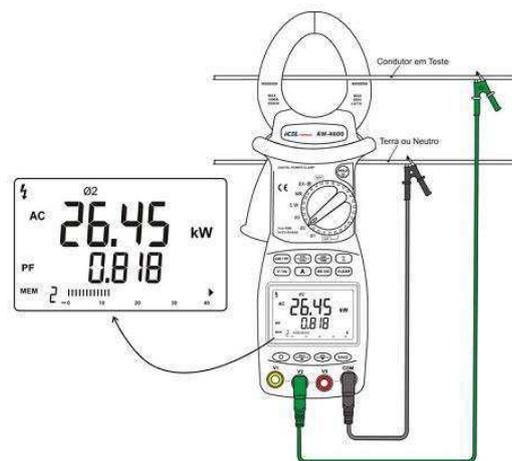


Fonte: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo-7_medidas-eletricas_fabiobleao.pdf>, 2016.

Seu princípio de funcionamento baseia-se no torque que surge da interação entre as forças magnéticas produzidas pelas correntes nas bobinas. Este torque provoca a deflexão do ponteiro sobre uma escala graduada a partir da qual lê-se o valor de potência medido.

Os wattímetros eletrônicos, por sua vez, são dispositivos digitais que utilizam transdutores, circuitos de condicionamento e microcontroladores/microprocessadores, para a aquisição e o processamento dos sinais de tensão e corrente necessários ao cálculo da potência. Estes dispositivos podem ainda fornecer informações a respeito do consumo de reativos e do fator de potência de determinado circuito. Na Figura 2 tem-se apresentada a imagem de um wattímetro digital comercial e a conexão utilizada para medição.

Figura 2 – Imagem de um wattímetro comercial digital



Fonte: <<http://icel-manaus.com.br/imagens/produtos/aw4600.pdf>>, 2016.

Os wattímetros eletrônicos têm gradualmente substituído os eletrodinâmicos em virtude da flexibilidade apresentada, permitindo também a medição de potência reativa e fator de potência (além de tensão e de corrente) e por não sofrerem com o desgaste de partes móveis como o que ocorre com os eletrodinâmicos. Eles permitem ainda que a leitura dos resultados seja feita de forma direta, enquanto que os wattímetros eletrodinâmicos estão sujeitos a erros de leitura pelo fato de utilizarem escalas graduadas e ponteiros. No entanto, os wattímetros eletrodinâmicos por apresentarem menor custo que os eletrônicos, continuam a ser largamente utilizados em aplicações

menos sofisticadas, como por exemplo, na medição de consumo de equipamentos instalados em ambiente industrial.

2.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA

A partir da aquisição dos sinais de tensão e de corrente em um determinado elemento operando em corrente alternada, torna-se possível a determinação das potências aparente, ativa e reativa e do fator de potência a ele associados. Neste sentido, a potência aparente S pode ser calculada diretamente pela equação (1), na qual V e I correspondem aos valores *RMS* dos sinais de tensão e de corrente.

$$S = V \cdot I. \quad (1)$$

No entanto, embora clássica, a equação (1) não pode ser implementada em dispositivos digitais, por se tratar de uma operação com sinais contínuos no tempo. Para que seja possível a realização do cálculo da potência aparente no domínio de tempo discreto, portanto, utiliza-se a equação (2), a qual realiza a multiplicação de n amostras dos sinais de tensão v e de corrente i .

$$S = \frac{v[n]}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i[n]}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

A potência ativa P é definida no domínio discreto como sendo o somatório do produto da corrente pela tensão amostrada, em que N é o número de pontos utilizados na amostragem, conforme indica a equação (3).

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \cdot i[n]. \quad (3)$$

A partir do cálculo da potência aparente e da potência ativa, independentemente das formas de onda que a tensão e a corrente apresentem, é possível a determinação direta do fator de potência (FP) por meio da equação (4).

$$FP = \frac{P}{S}. \quad (4)$$

Entretanto, considerando os sistemas lineares, isto é, com formas de ondas senoidais, a equação (5) torna-se igual a

$$\cos \phi = \frac{P}{S}, \quad (5)$$

em que ϕ é a defasagem entre os sinais de tensão e de corrente considerados.

2.3 ENSAIOS DE CURTO CIRCUITO E DE CIRCUITO ABERTO EM TRANSFORMADORES

Os ensaios descritos a seguir são ensaios básicos de rotina utilizados para a caracterização de transformadores conforme estabelece a norma NBR 5380, a qual deve ser consultada para maiores detalhes.

2.3.1 ENSAIO DE CURTO CIRCUITO

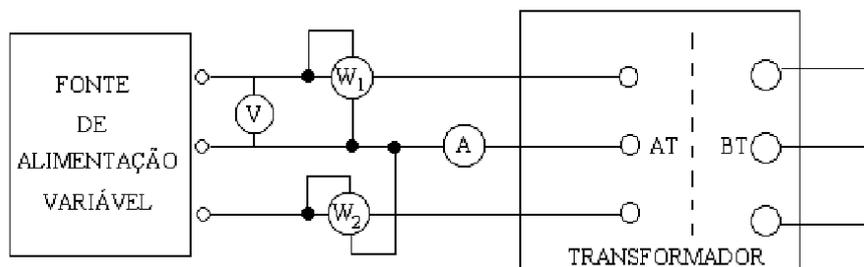
O ensaio de curto-circuito possibilita a determinação das perdas no cobre (P_j), da queda de tensão interna e dos valores de impedância, resistência e reatância.

As perdas no cobre são causadas pelo efeito Joule nos enrolamentos do transformador, quando da circulação das correntes nos circuitos primário e secundário. Estas perdas dependem, portanto, do nível de carregamento do transformador. Em geral, o ensaio é feito considerando-se a operação em carga nominal.

Para a realização do ensaio, os terminais secundários são curto-circuitados e aplica-se ao circuito primário determinado nível de tensão (aproximadamente 10% da tensão nominal), de modo que a corrente não ultrapasse seu valor nominal. Como a impedância de magnetização possui um valor muito superior aos valores das duas impedâncias em série, a corrente de excitação é muito pequena, podendo ser desprezada.

No arranjo montado no laboratório de Equipamentos Elétricos são utilizados dois wattímetros dispostos em uma configuração característica para medição da potência em circuitos trifásicos (método dos dois wattímetros). Também são utilizados um amperímetro, para medição da corrente de excitação na da fase de referência, e um voltímetro, conforme o diagrama de montagem apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de montagem – ensaio de curto circuito.



Fonte: (FERNANDES; FERREIRA; COSTA, 2008).

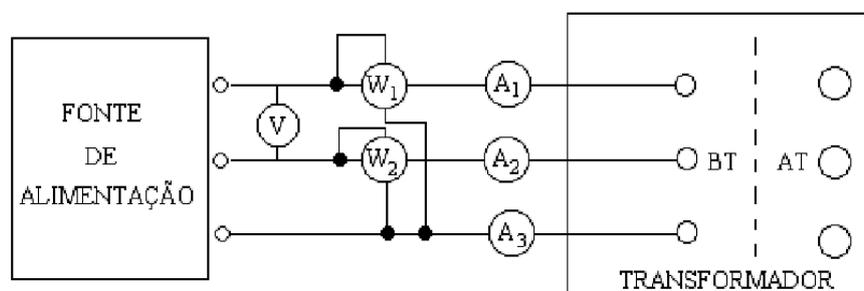
2.3.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

De forma geral, o ensaio de circuito aberto visa definir qual a potência elétrica consumida pelo transformador quando opera em vazio. Neste sentido, estima-se a energia necessária para a magnetização do seu circuito magnético, considerando as perdas relacionadas à histerese e às correntes de Foucault. O ensaio a vazio permite ainda a estimação da corrente a vazio, a qual indica o nível de saturação do núcleo magnético.

O ensaio de circuito aberto é realizado, portanto, aplicando tensão nominal senoidal no enrolamento de baixa tensão enquanto o enrolamento de alta tensão fica em aberto.

No arranjo montado no laboratório de Equipamentos Elétricos são utilizados, além de dois wattímetros para medição das potências, três amperímetros para medição das correntes de excitação em cada uma das fases, e um voltímetro, conforme diagrama de montagem apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de montagem – ensaio de circuito aberto.



Fonte: (FERNANDES; FERREIRA; COSTA, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados o material necessário e os métodos empregados para o projeto e a construção do protótipo do wattímetro digital. Neste sentido, são destacados alguns componentes utilizados, circuitos e placa de circuito impresso desenvolvidos e os experimentos realizados para a validação do protótipo, entre outros.

3.1 MICROCONTRADOR ATMEGA328

Para aquisição e processamento dos sinais de tensão e de corrente, além de exibição do resultado em um display, foi utilizado um microcontrolador Atmega328 configurado para operar a 16 MHz.

Como o Atmega328 possui várias entradas analógicas, mas apenas um conversor A/D, a amostragem dos sinais foi feita de forma alternada, isto é, se converte uma amostra do sinal de tensão e em seguida uma amostra do sinal de corrente. Neste sentido, os sinais amostrados possuem um atraso verificado de aproximadamente 111,11 μ s, o que por sua vez, acarreta um erro teórico calculado de 2,4 graus no cálculo do fator de potência. Para a realização dos cálculos das grandezas desejadas são armazenadas e posteriormente processadas 150 amostras (2 períodos em 60 Hz) de cada sinal.

3.2 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

A fim de que o microcontrolador consiga fazer a aquisição de sinais analógicos é necessário que estes tenham amplitudes máxima e mínima suportáveis pelo conversor A/D. O microcontrolador Atmega328 realiza a conversão de um sinal analógico que varia de 0 a 5 V em um valor binário de 10 bits. Neste sentido, em virtude de a tensão a ser medida pelo circuito do wattímetro estar fora da faixa de tensão do conversor A/D, torna-se necessário o emprego de um circuito de condicionamento de sinais.

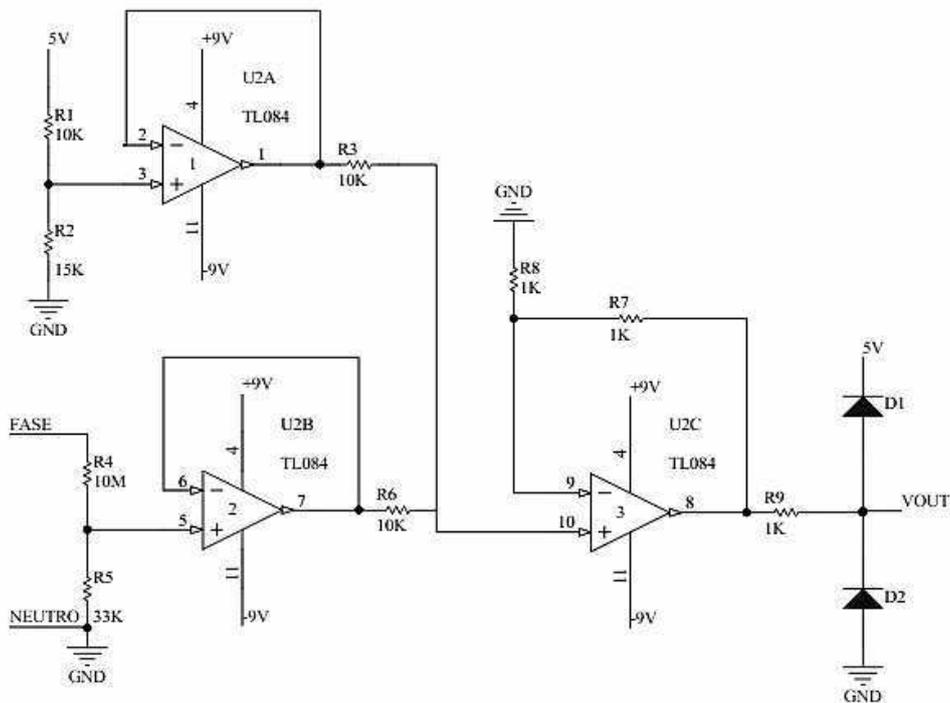
Em relação à medição da corrente, é necessário o uso de um circuito que converta determinada corrente de entrada em uma tensão de saída linearmente

proporcional. Neste caso, normalmente utiliza-se um sensor de corrente com tais características.

3.2.1 SENSOR DE TENSÃO

O circuito de condicionamento de tensão é composto pela combinação dos seguintes circuitos: divisor de tensão, *buffer*, amplificador somador não inversor e diodos de proteção. O circuito elétrico representativo do circuito de condicionamento de tensão está apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema do circuito de condicionamento de tensão.



Fonte: Próprio autor.

O divisor efetua a atenuação do sinal de entrada para um nível de tensão suportável pelo microcontrolador. No entanto, como o sinal atenuado ainda possui um valor mínimo inferior a zero, faz-se necessário adicionar a ele um nível DC positivo. Este deslocamento de sinal é realizado por meio de um amplificador operacional configurado como somador.

3.2.2 SENSOR DE CORRENTE

Para condicionar o sinal de corrente a níveis aceitáveis pelo microcontrolador foi utilizado o sensor de corrente ACS712, o qual é um sensor de corrente baseado no efeito *Hall*.

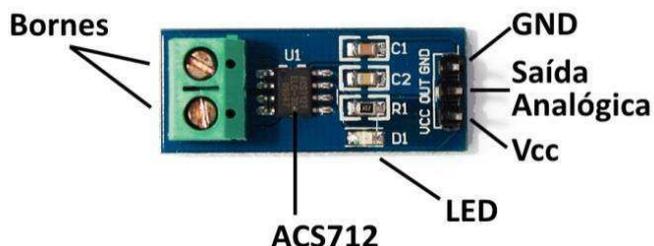
O sensor ACS712 da fabricante Allegro® é utilizado para medir corrente elétrica contínua ou alternada em circuitos industriais, comerciais e de sistemas de comunicação. A resistência interna do sensor é típica de 1,2 mΩ, resultando em uma baixa perda de potência. Como os terminais de condução de corrente são isolados, o ACS712 pode ser usado em aplicações que necessitam de isolamento elétrico sem o uso de optoacopladores ou outras técnicas de isolamento.

Algumas características e benefícios do dispositivo:

- Sinal de saída com baixo nível de ruído;
- 5 μs de tempo de resposta da saída;
- Largura de banda máxima de 80 kHz;
- Erro total de saída de 1,5 % (a 25C);
- Resistência interna de 1,2 mΩ;
- 2,1 kV_{RMS} de isolamento mínima dos pino 1-4 para 5-8;
- Tensão de operação de 5,0 V
- 66 a 185 mV/A de sensibilidade na saída;
- Tensão de saída proporcional para operação em DC ou AC;
- Histerese magnética quase nula na saída.

A fim de facilitar o desenvolvimento de protótipos, dispõem-se comercialmente de um módulo que integra o ACS712 a uma placa de circuito impresso contendo os componentes básicos para o funcionamento do sensor. Este módulo dispõe de bornes para a conexão do condutor no qual se realizará a medição de corrente e de pinos para a sua alimentação e leitura do sinal de saída analógico. Na Figura 7 tem-se a fotografia de um módulo típico de um sensor ACS712.

Figura 7 – Fotografia – Módulo ACS712.



Fonte: < <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>>, 2016.

No protótipo de wattímetro desenvolvido, a interface entre o sinal de saída do sensor de corrente e o Atmega328 é realizada por meio de um *buffer*. Este foi utilizado para isolar o sinal de saída do sensor em relação ao microcontrolador.

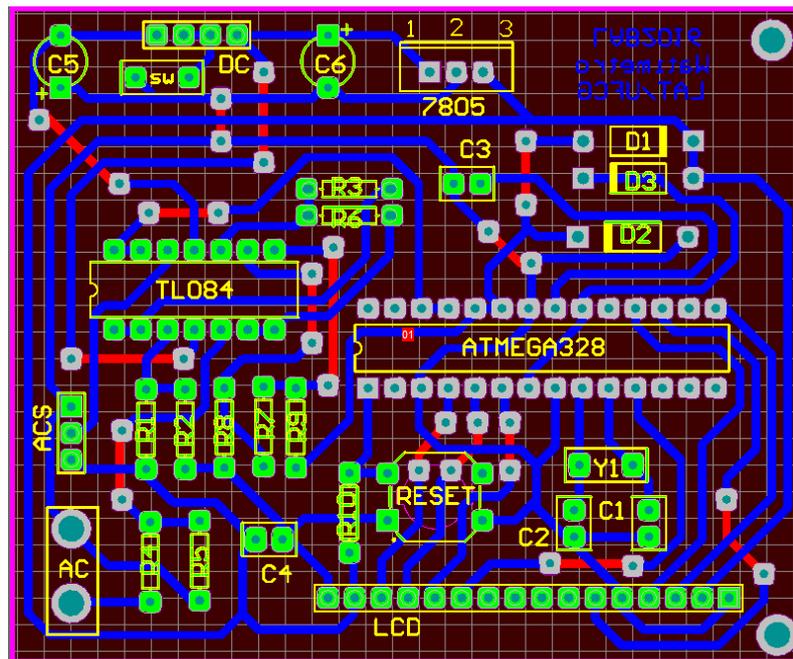
3.3 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Em virtude de o sinal a ser conformado não passar por nenhum estágio de retificação, torna-se necessário que os amplificadores operacionais utilizados (CI TL084) consigam manipular tanto valores positivos quanto negativos de tensão. Neste sentido, a alimentação dos circuitos que compõem o protótipo é realizada por meio de baterias 9 V, as quais são associadas em série na PCI. Tal configuração equivale à implementação de uma fonte simétrica de +9 V e -9 V. Para a alimentação do microcontrolador e do display de LCD 16x2 utilizado para a visualização dos resultados da medição utiliza-se um regulador de tensão LM 7805 associado à fonte positiva.

3.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Para acomodar os circuitos projetados e garantir a conexão dos sinais de interesse de forma efetiva, além de possibilitar o uso do microcontrolador Atmega328 sem a necessidade de uma plataforma comercial, foi projetada uma placa de circuito impresso (PCI) utilizando o *software* Altium Designer Summer®. Na Figura 8 apresenta-se o *layout* desenvolvido.

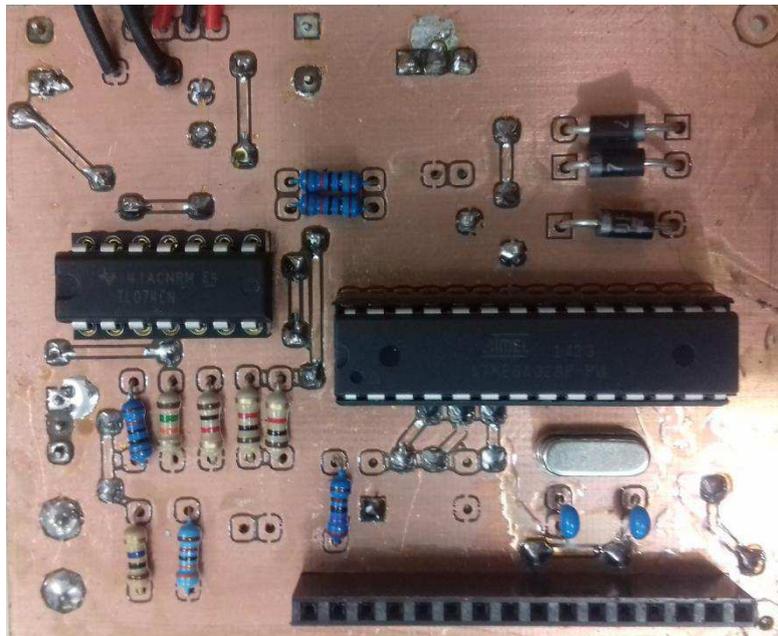
Figura 8 - *Layout* desenvolvido para a PCI.



Fonte: o próprio autor.

Após o desenvolvimento do *layout*, foram realizadas a confecção da placa e a montagem dos seus componentes. Na Figura 9 é apresentada a face superior da PCB do protótipo desenvolvido.

Figura 9 – Face superior da PCB do protótipo.



Fonte: o próprio autor.

Por questões de praticidade, foram utilizados componentes discretos para a montagem da placa. Também foram utilizados resistores de alta precisão (1% de tolerância) para minimizar possíveis erros na aquisição dos dados, sobretudo, na medição de tensão.

3.5 GABINETE

Para garantir a segurança dos usuários em relação ao contato com partes energizadas e facilitar o seu manuseio, realizou-se a montagem do protótipo em um gabinete, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Protótipo montado em um gabinete.



Fonte: o próprio autor.

Além do LCD e de uma chave *on/off* (não apresentada na Figura 8), o gabinete dispõe de 4 bornes para a realização das conexões elétricas. Os bornes superiores, destinados à medição de tensão, foram identificados como V^+ e V_{ref} (potencial de referência para o cálculo da tensão V^+). Já os terminais inferiores, identificados como I_i e I_o , devem ser utilizados, respectivamente, para a entrada e a saída da corrente a ser medida. Em caso de o usuário não respeitar o sentido indicado para a medição de corrente, o wattímetro indicará todas as medições como sendo iguais à zero.

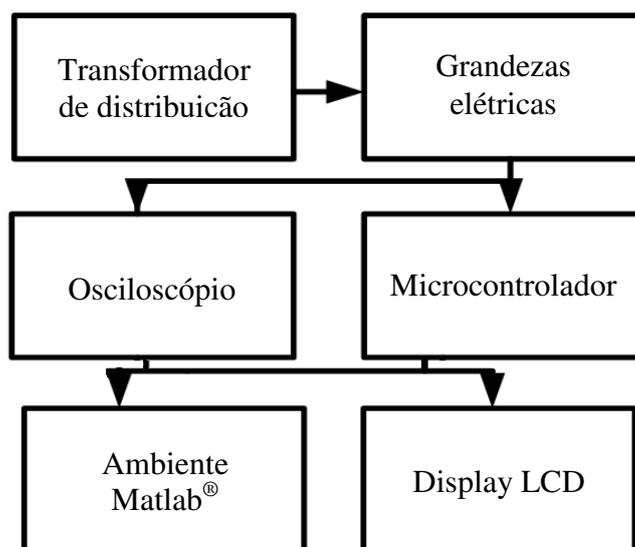
3.6 TESTES E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

A fim de verificar o desempenho em laboratório do protótipo construído, foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG ensaios de curto circuito e de circuito aberto em um transformador trifásico de 75 kVA. Vale salientar, no entanto, que em virtude do uso de um único wattímetro, as perdas calculadas representam apenas uma parcela das perdas totais. As perdas globais seriam computadas como sendo a soma das potências medidas por dois wattímetros (método dos dois wattímetros).

Em paralelo com a medição do wattímetro, utilizou-se um osciloscópio digital de quatro canais (taxa de amostragem de 1 GS/s) para o registro dos sinais de tensão e corrente. Para tanto, a tensão foi medida utilizando uma ponta de prova de alta tensão (com relação de transformação de 1000:1), enquanto que para a medição da corrente se utilizou uma pinça amperimétrica (relação de transformação 100 mV/A). Os dados adquiridos pelo osciloscópio foram então importados para o ambiente Matlab, no qual uma rotina foi desenvolvida para realizar os cálculos de potência. A escolha do Matlab se deu pela familiaridade do aluno com o ambiente.

Finalmente, foi realizada a comparação e cálculo de erros entre os sinais amostrados no osciloscópio e no protótipo do wattímetro. O diagrama de blocos que representa a metodologia empregada está ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de blocos que representa a metodologia empregada.

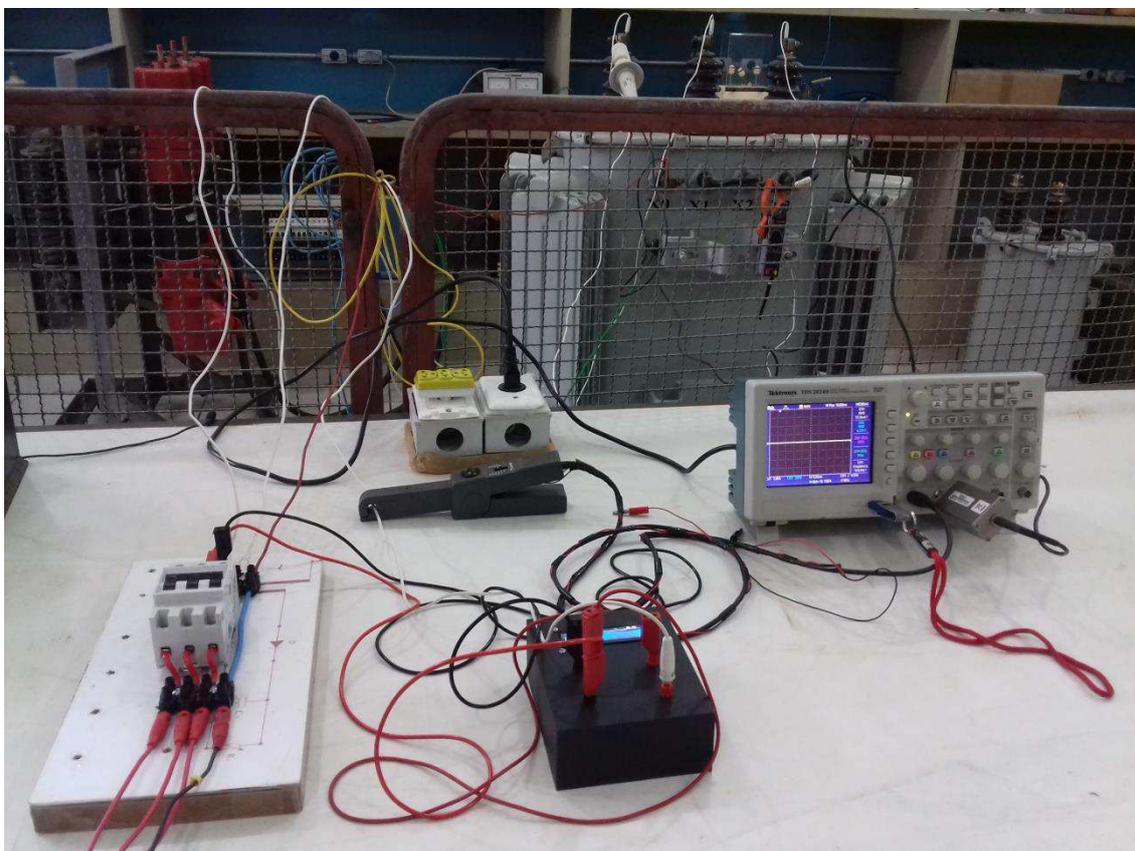


Fonte: Próprio autor.

3.6.1 ENSAIO DE CURTO CIRCUITO

Após a montagem do *setup* para a realização do experimento, realizou-se a excitação do arranjo por meio de uma fonte de tensão variável. Na Figura 12 apresenta-se uma fotografia do *setup* utilizado no ensaio. Ao fundo da imagem vê-se o transformador de distribuição sendo alimentado pelos terminais de alta tensão, enquanto os seus terminais de baixa tensão estão curto circuitados. Para o estabelecimento dos níveis de curto circuito desejados, monitorou-se a corrente na baixa tensão por meio de um alicate amperímetro.

Figura 12 – Setup para ensaio de curto circuito.



Fonte: Próprio autor.

Após o início das medições, em virtude da diferença entre os valores calculados pelo protótipo e pelo osciloscópio, foi verificada a necessidade de uma nova parametrização das equações utilizadas pelo microcontrolador para o cálculo da tensão e da corrente. Realizada a nova parametrização, procederam-se as medições.

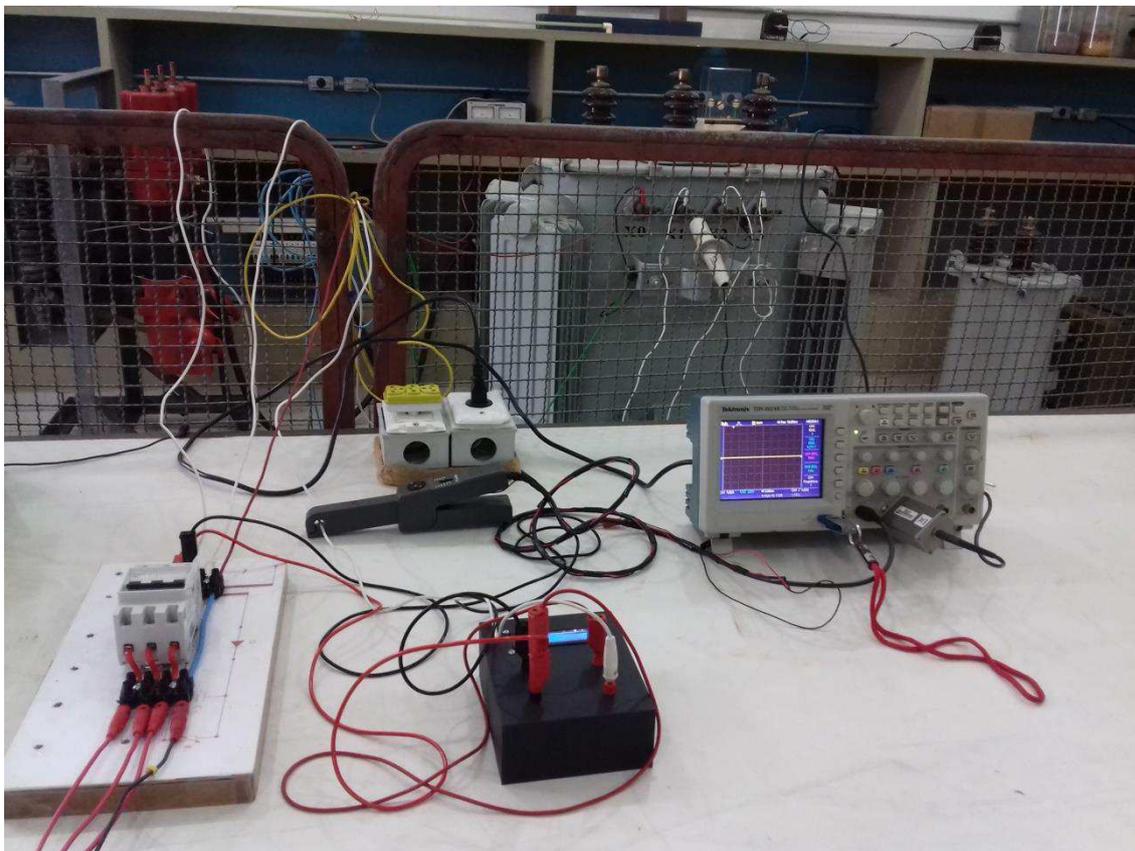
A fim de permitir a análise dos resultados para diferentes condições de excitação e, conseqüentemente, de perdas, foram realizadas medições referentes à potência

dissipada pelos enrolamentos do transformador quando operando a 60 % e 80 % de sua corrente nominal.

3.6.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

Após a montagem do *setup* e energização do arranjo por meio de uma fonte de tensão variável, foram realizadas as medições referentes às perdas do transformador quando operando a vazio. Na Figura 13 apresenta-se a montagem utilizada no ensaio de circuito aberto. Ao fundo da imagem vê-se o transformador de distribuição sendo alimentado pelos terminais de baixa tensão, enquanto os seus terminais de alta tensão estão em aberto.

Figura 13 – Setup para ensaio de circuito aberto.



Fonte: Próprio autor.

Para a análise dos resultados considerando diferentes condições de excitação, foram realizadas medições das perdas em vazio do transformador quando submetido a 60 % e 80 % de sua tensão nominal.

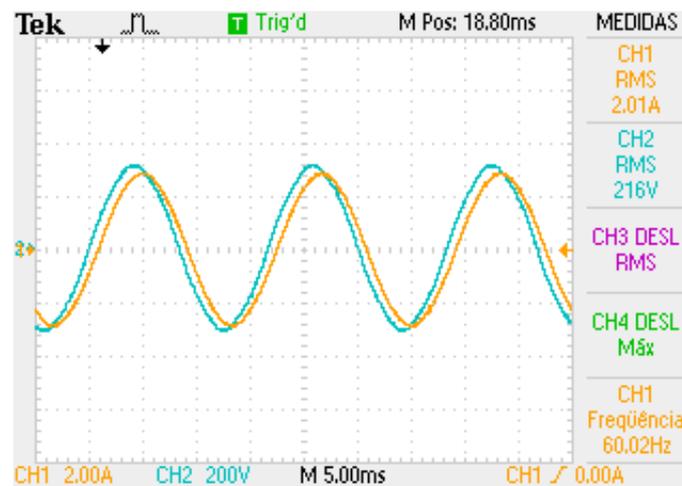
4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios de curto circuito e circuito aberto, utilizando o wattímetro construído. Além disso, é apresentada a validação do protótipo mediante a comparação com os testes realizados utilizando o osciloscópio.

4.1 ENSAIO DE CURTO CIRCUITO

Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas, respectivamente, as formas de onda dos sinais de tensão e de corrente registradas pelo osciloscópio e uma fotografia dos resultados da medição realizada pelo protótipo. Ambas, referem-se ao ensaio a 60 % da corrente nominal.

Figura 14 – Formas de onda dos sinais de tensão e corrente – ensaio de curto circuito.



Fonte: o próprio autor.

Figura 15 – Medição apresentada no *display* do wattímetro para o ensaio de curto circuito.



Fonte: o próprio autor.

Para permitir a avaliação dos erros obtidos nas medições, nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os erros percentuais das medições realizadas pelo protótipo em relação às obtidas por meio do osciloscópio e do Matlab.

Tabela 1 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 60 % da corrente nominal.

	Protótipo Wattímetro	Matlab	Erro percentual
Tensão RMS (V)	215,00	216,21	0,56
Corrente RMS (A)	2,03	2,00	1,50
Potência Aparente (VA)	437,79	434,25	0,82
Potência Ativa (W)	403,37	414,27	2,63

Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 80 % da corrente nominal.

	Protótipo Wattímetro	Matlab	Erro percentual
Tensão RMS (V)	287,00	286,33	0,23
Corrente RMS (A)	2,67	2,65	0,75
Potência Aparente (VA)	767,25	758,00	1,22
Potência Ativa (W)	711,69	724,48	1,77

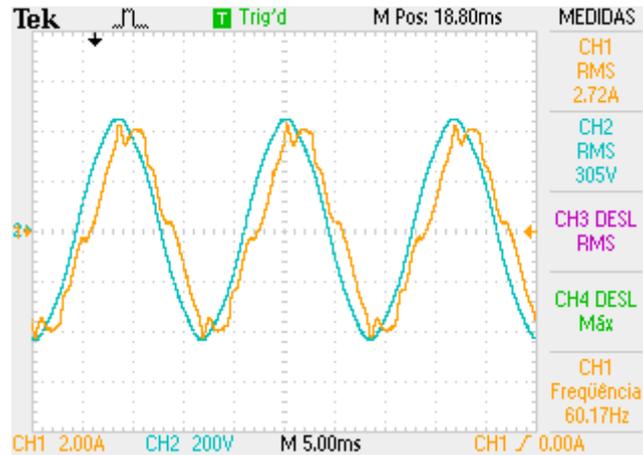
Fonte: Próprio autor.

Verificou-se, portanto, que para a situação de 80 % da corrente nominal os erros percentuais globais obtidos foram menores do que os verificados para 60 % da corrente nominal. Isto se deve ao fato de a mudança de parâmetros das equações utilizadas pelo microcontrolador para cálculo da tensão e da corrente haver sido realizada para a situação de 80 % da corrente nominal.

4.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

Nas Figuras 16 e 17 são apresentadas, respectivamente, as formas de onda dos sinais de tensão e de corrente registradas pelo osciloscópio e uma fotografia dos resultados da medição realizada pelo protótipo. Ambas, referem-se ao ensaio a 80 % da corrente nominal.

Figura 16 – Formas de onda dos sinais de tensão e corrente – ensaio de circuito aberto.



Fonte: o próprio autor.

Figura 17 – Medição apresentada no *display* do wattímetro para o ensaio de circuito aberto.



Fonte: o próprio autor.

Para permitir a avaliação dos erros obtidos nas medições, nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os erros percentuais das medições realizadas pelo protótipo em relação às medições obtidas por meio do osciloscópio e do Matlab.

Tabela 3 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 60 % da tensão nominal.

	Protótipo Wattímetro	Matlab	Erro percentual
Tensão RMS (V)	228,00	228,70	0,31
Corrente RMS (A)	1,54	1,54	0,00
Potência Aparente (VA)	353,57	353,42	0,04
Potência Ativa (W)	342,59	330,05	3,80

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio a 80 % da tensão nominal.

	Protótipo Wattímetro	Matlab	Erro percentual
Tensão RMS (V)	300,00	304,45	1,46
Corrente RMS (A)	2,59	2,73	5,12
Potência Aparente (VA)	818,30	831,76	1,62
Potência Ativa (W)	708,78	753,30	5,91

Fonte: Próprio autor.

Novamente, assim como ocorreu para o ensaio de curto circuito, os erros percentuais globais obtidos mostraram-se mais elevados para a potência ativa do que para as demais grandezas, inclusive passando de 5 % para o ensaio a 80 % da tensão nominal. Verificou-se também que para esta situação de excitação os erros percentuais foram maiores do que os verificados para 60 % da tensão nominal.

4.3 PARAMETRIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES RELACIONADAS À

LEITURA DE TENSÃO

A fim de diminuir os erros relacionados com a leitura de tensão e permitir uma medição mais exata por parte do wattímetro, foi realizado um experimento de parametrização das equações relacionadas à leitura de tensão.

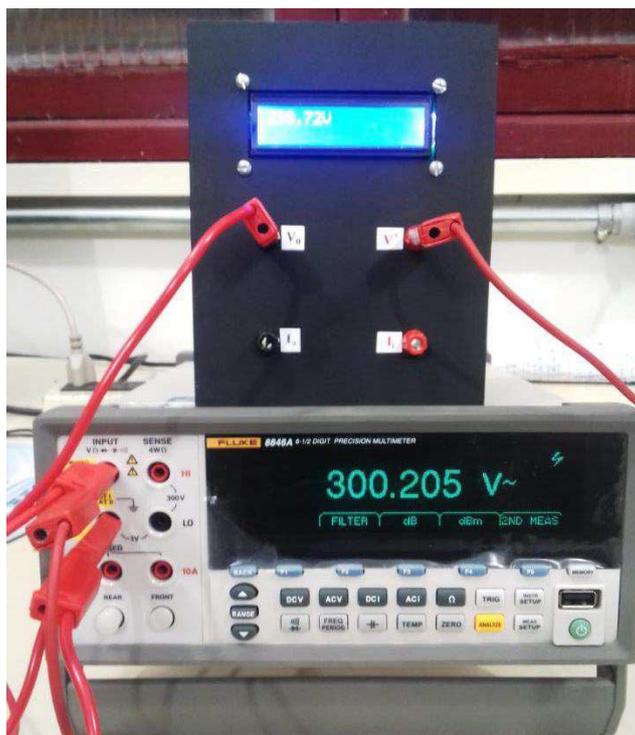
O experimento consistiu na comparação entre os valores de tensão medidos pelo protótipo e por um multímetro de precisão de 6-1/2 dígitos. Assim, utilizando uma fonte ajustável, foram colocados diversos níveis de tensão na entrada do wattímetro e do multímetro de precisão e então, foram anotados os valores medidos por eles.

A partir da comparação entre os valores medidos por cada instrumento, resolveu-se dividir a faixa de tensão de operação do wattímetro em sub-faixas. Assim, para cada sub-faixa, foram estabelecidos parâmetros diferentes para as equações utilizadas no cálculo da tensão. Esse procedimento equivale à utilização de escalas diferentes para a leitura da tensão. Sendo que, neste caso, a comutação entre as escalas é feita de maneira automática pelo protótipo.

Neste sentido, foram utilizadas 15 faixas de tensão definidas a partir da subdivisão da curva de resposta de tensão do circuito de condicionamento de sinais em regiões aproximadamente lineares. Para a obtenção de resultados mais aproximados, seria necessária a utilização de mais subdivisões. No entanto, como os erros percentuais obtidos foram baixos, resolveu-se utilizar a quantidade anteriormente citada.

Na Figura 18 apresenta-se uma fotografia do experimento realizado para a parametrização das equações das sub-faixas de tensão.

Figura 18 – Fotografia do experimento realizado para a parametrização das equações das sub-faixas de tensão.



Fonte: o próprio autor.

Na Tabela 5 são apresentados os erros percentuais das medições realizadas pelo protótipo em relação às medições obtidas por meio do multímetro de precisão, após a parametrização.

Tabela 5 – Comparativo dos resultados obtidos pelo protótipo e pelo multímetro de precisão.

Tensão Protótipo (V)	Tensão Multímetro (V)	Erro percentual
20,01	20,05	0,20
40,02	40,23	0,52
80,05	79,92	0,16
120,08	116,93	2,62
160,09	155,46	2,89
180,11	174,63	3,04
200,14	194,06	3,04
240,15	240,31	0,07
280,20	280,15	0,02
300,02	298,45	0,52
320,23	314,55	1,77

Fonte: Próprio autor.

Ao observar a Tabela 5 verifica-se que ao comparar os resultados do protótipo aos obtidos mediante o multímetro de precisão, os erros foram inferiores a 3,1%, o que por sua vez, valida a medição de tensão por parte do protótipo.

4.4 MANUAL DE INSTRUÇÕES DO WATTÍMETRO

A fim de orientar o usuário quanto à utilização do wattímetro desenvolvido, foi produzido um manual básico de instruções. Neles são apresentadas as especificações do wattímetro, bem como regras de segurança a serem seguidas quando de sua utilização. Ainda, são apresentados os procedimentos a serem utilizados para medição de corrente, tensão e potência em circuitos monofásicos e em circuitos trifásicos (métodos dos dois wattímetros).

5 CONCLUSÃO

Com a realização deste projeto, conseguiu-se idealizar e construir um wattímetro digital monofásico para auxílio em ensaios de transformadores de distribuição. Neste sentido, foram realizados o projeto e a construção de uma placa de circuito impresso para o wattímetro e a construção de um gabinete, além da realização de experimentos para validação do protótipo. Também, foi desenvolvido um manual de instruções a fim de orientar o usuário quanto à utilização do wattímetro. O manual apresenta as especificações do wattímetro, regras de segurança para sua utilização e procedimentos de medição de potência.

De forma geral, os erros percentuais, verificados quando da comparação entre os resultados obtidos por meio do protótipo e do osciloscópio, ficaram abaixo de 4%, exceto para o ensaio de circuito aberto a 80 % da tensão nominal. Para minimizar os erros relacionados à medição de tensão, foi realizado um experimento de parametrização das equações relacionadas à leitura de tensão, obtendo-se, conseqüentemente, erros inferiores a 3,01% quando em comparação com as medições obtidas a partir de um multímetro de precisão.

O protótipo desenvolvido apresenta baixo custo, fácil manutenção e facilidade de uso. Neste sentido, embora não apresente uma exatidão elevada em suas medições, considerando a sua aplicação em ensaios didáticos, o protótipo atende bem às especificações.

Em trabalho futuros, em nível de mestrado, por exemplo, poderiam ser implementadas novas funcionalidades ao projeto. Algumas delas poderiam ser: comunicação USB para transferência dos dados para o processamento em um computador, o desenvolvimento de um circuito de monitoramento do nível de tensão das baterias, o uso de baterias recarregáveis e etc. Também poderiam ser feitas melhorias estéticas e funcionais no gabinete a fim de torna-lo mais próximo de um produto comercial.

Quanto ao nível de conhecimentos, este projeto permitiu o desenvolvimento de competências diferente áreas da engenharia elétrica, além da familiarização com o uso de instrumentos de medição, entre outros.

BIBLIOGRAFIA

ACS712. Data sheet: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. Rev. 15, 2012. Disponível em: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>. Acesso em: 03 de outubro de 2016.

ARAÚJO, J. F.; FERREIRA, T. V.; COSTA, E. G. “Microcontroladores e Matlab Aplicados ao Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Transformadores de Distribuição” Campina Grande, Paraíba. Não publicado.

ATmega328. Disponível em: <http://www.atmel.com/pt/br/devices/ATMEGA328.aspx>. Acesso em: 03 de outubro de 2016.

BELCHIOR, F. N. “Medidas Elétricas”. Apostila. UNIFEI, 2014.

DONATO, E. B. “Wattímetro digital de baixo custo”. Trabalho de conclusão de curso, UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

FERNANDES, D. A.; FERREIRA, H. A.; COSTA, E. G. “Guia de experimentos com transformadores de distribuição” Campina Grande, Paraíba, 2008.

KUROKAWA, S.; LEÃO, F. B. “Capítulo 7, Wattímetros”. Notas de aula. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo-7_medidas-eletricas_fabiobleao.pdf. Acesso em: 03 de outubro de 2016.

LUCIANO, Benedito Antônio. Apostila sobre Transformadores. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, Paraíba.

MAMEDE FILHO, João. Manual de Equipamentos Elétricos. Volume 1. 2ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1994.

Manual de Instruções do Alicata Wattímetro MODELO AW-4600. Disponível em: <http://icel-manauas.com.br/imagens/produtos/aw4600.pdf>. Acesso em: 03 de outubro de 2016.

OLIVEIRA, José Carlos de, COGO, João Roberto e ABREU, José Policarpo G. de. Transformadores: Teoria e Ensaio. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, 1984.

SOUZA, W. V. “Um wattímetro microcontrolado para aplicação em ensaios de transformadores de potência”. Trabalho de conclusão de curso, UFCG, Campina Grande, Paraíba, 2013.

T. C. Batista, J. G. A. Lira, R. C. S. Freire, B. A. Luciano, F. C. F. Guerra and R. Cucatu, "Sistema Automático para Ensaio de Perdas em Núcleos de Transformadores Monofásicos," in Proc. 2010 IEEE Industry Applications Conf., pp. 1 -5.

APÊNDICE A – MANUAL DE INSTRUÇÕES DO

WATTÍMETRO

O presente manual trata das instruções básicas para utilização do wattímetro digital monofásico. Também são apresentadas as suas especificações, bem como regras de segurança a serem seguidas quando da utilização do equipamento e os procedimentos a serem utilizados para medição de corrente, tensão e potência em circuitos monofásicos e em circuitos trifásicos.

1 INTRODUÇÃO

O wattímetro apresentado neste manual é um wattímetro digital monofásico microprocessado o qual permite a medição de potência ativa, mas também, a medição de potência aparente, além da tensão e da corrente. Ele pode utilizado em medições cujos valores de tensão e corrente não ultrapassem, respectivamente, 400 V e 30 A. Um wattímetro é um equipamento delicado e requer um operador habilitado tecnicamente, caso contrário, poderá ser danificado.

2 REGRAS DE SEGURANÇA

- a. Assegure-se que as baterias estejam corretamente colocadas e conectadas ao wattímetro.
- b. Não ultrapasse os limites de tensão ou corrente máximos especificados, pois poderá danificar seriamente o wattímetro.**
- c. Quando não for usar o wattímetro por um período prolongado, remova as baterias e guarde-as em separado do aparelho.

- d. Antes de usar o wattímetro, examine-o juntamente com as pontas de prova, para ver se apresentam alguma anormalidade ou dano. **Em caso afirmativo, desligue o aparelho imediatamente e o encaminhe para a manutenção.**

3 ESPECIFICAÇÕES

A seguir, serão apresentadas as especificações gerais do equipamento, bem como as suas especificações elétricas.

3.1 GERAIS

- a. Funções: Tensão alternada e corrente alternada (“True RMS”), potência ativa e aparente.
- b. Seleção de escalas: Automática.
- c. Alimentação: Duas baterias de 9 V.
- d. Visor: Display de cristal líquido (LCD) 16x2.
- e. Temperatura de operação: De 0°C a 40°C.
- f. Dimensões:
- g. Peso:

3.2 ELÉTRICAS

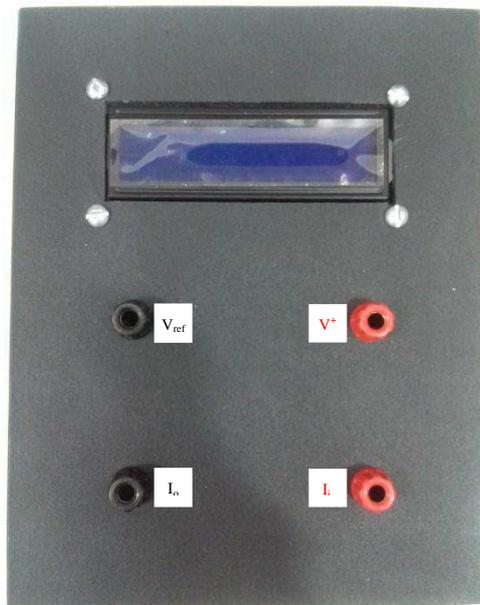
- a. Limite máximo de tensão: 400 V.
- b. Limite máximo de corrente: 30 A.

4 DESCRIÇÃO GERAL

Por ser de simples operação, o wattímetro digital dispõem apenas de uma chave *on/off* em sua face lateral direita e de um conjunto de bornes para conexão das pontas de

prova para medição de tensão e de corrente em sua face frontal. Na Figura 1 apresenta-se uma fotografia do wattímetro digital.

Figura 1 – Fotografia do wattímetro digital.



As marcações dos bornes indicam:

- V⁺ - Borne para conexão à tensão a ser medida.
- V_{ref} - Borne para conexão ao potencial de referência para medição de tensão.
- I_i – Borne para entrada da corrente a ser medida.
- I_o- - Borne para saída da corrente medida.

5 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

A seguir, serão apresentados os principais procedimentos a serem adotados para medição de corrente, tensão e potências em circuitos monofásicos e trifásicos.

5.1 CORRENTE

- a. Ligue o wattímetro por meio do botão *on/off*.

- b. Faça a conexão das pontas de prova aos bornes de medição de corrente do wattímetro. **É importante respeitar a indicação de sentido da corrente: corrente entrando no terminal marcado com “ I_i ” e saindo no terminal marcado com “ I_o ”.**
- c. Conecte as pontas de prova em série com o circuito do qual deseja medir corrente.
- d. Leia o valor da corrente exibido no *display*.

5.2 TENSÃO

- a. Ligue o wattímetro por meio do botão *on/off*.
- b. Conecte a ponta de prova relativa ao potencial de referência no borne de entrada marcado com “ V_{ref} ” e a outra ponta de prova no borne marcado com “ V^+ ”.
- c. Conecte as pontas de prova em paralelo com o circuito do qual deseja medir tensão.
- d. Leia o valor da tensão exibido no *display*.

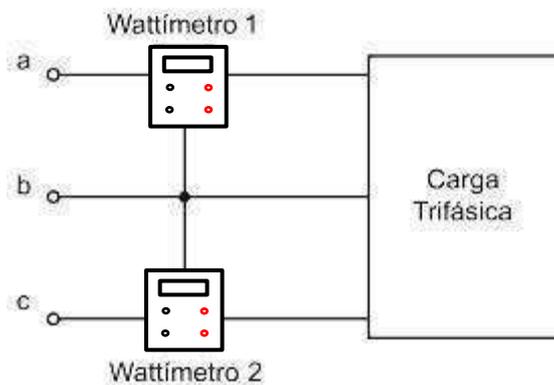
5.3 POTÊNCIA EM CIRCUITOS MONOFÁSICOS

- a. Ligue o wattímetro por meio do botão *on/off*.
- b. Conecte a ponta de prova relativa ao potencial de referência no borne de entrada marcado com “ V_{ref} ” e a outra ponta de prova no borne marcado com “ V^+ ”.
- c. Conecte as pontas de prova em paralelo com o circuito do qual deseja medir potência.
- d. Faça a conexão das pontas de prova aos bornes de medição de corrente do wattímetro. **É importante respeitar a indicação de sentido da corrente.** Para simplificar a montagem, **recomenda-se interligar o borne de entrada da corrente ao borne marcado com “ V^+ ”** correspondente a tensão a ser medida.
- e. Leia o dos parâmetros exibidos no *display*.

5.4 POTÊNCIA EM CIRCUITOS TRIFÁSICOS (MÉTODO DOS DOIS WATTÍMETROS)

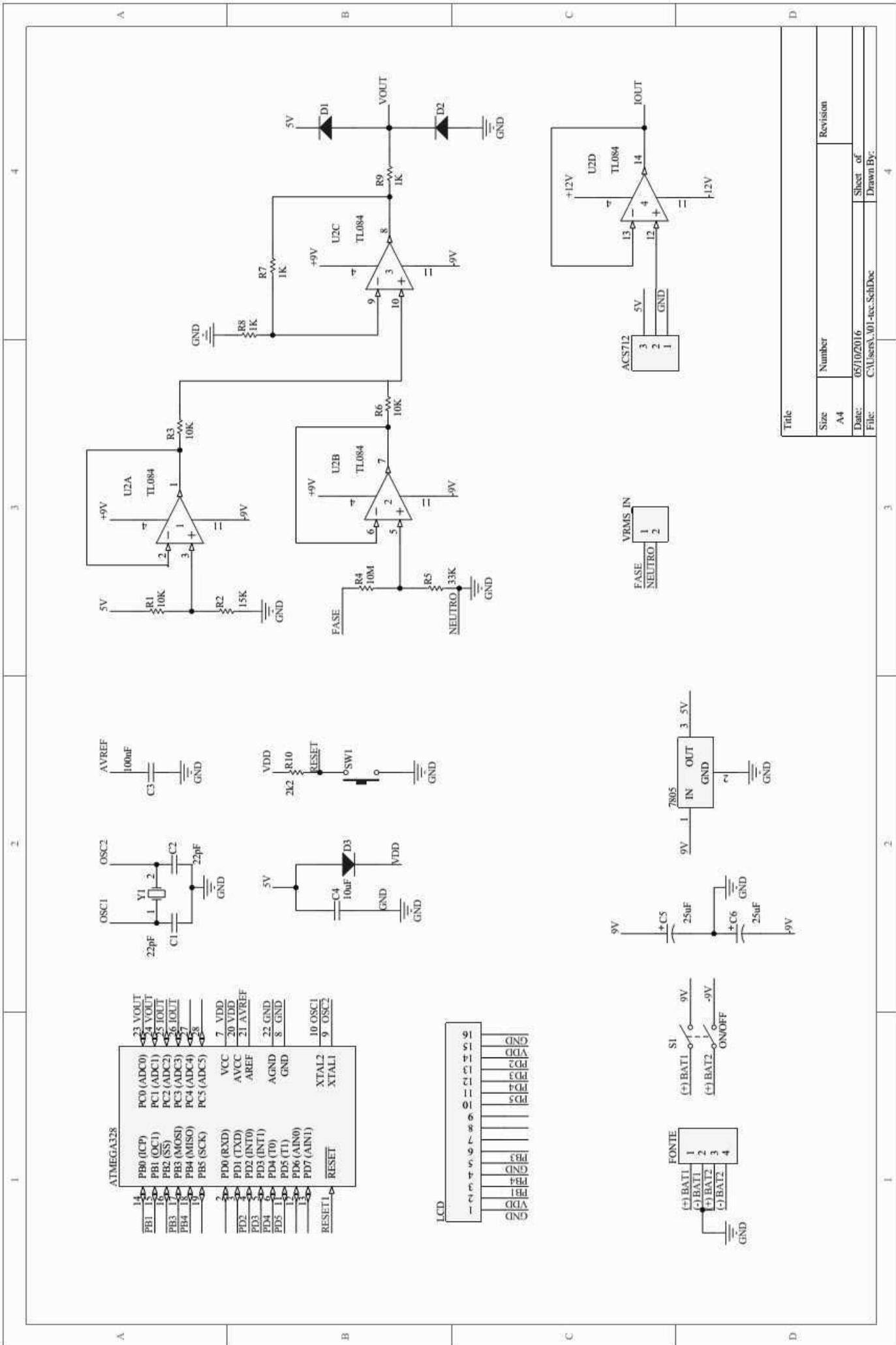
Para medir Potência em circuitos trifásicos a 3 fios, são necessários dois wattímetros dispostos conforme apresentado na Figura 2 (método dos dois wattímetros).

Figura 2 – Método dos dois wattímetros.



- a. Ligue os wattímetros por meio do botão *on/off* de cada um deles.
- b. Conecte a ponta de prova relativa ao potencial de referência de cada wattímetro no borne de entrada marcado com “ V_{ref} ” e à fase a ser utilizada como referência (**fase b**).
- c. Conecte as pontas de prova de cada wattímetro no borne marcado com “ V^+ ” e às fases a serem medidas (**a** – wattímetro 1 e **c** – wattímetro 2).
- d. Wattímetro 1: Conecte uma ponta de prova no borne marcado com “ I_i ” e à **fase a**, bem como uma ponta de prova no borne marcado com “ I_o ” e ao terminal da carga que será alimentado pela **fase a**.
- e. Wattímetro 2: Conecte uma ponta de prova no borne marcado com “ I_i ” e à **fase c**, bem como uma ponta de prova no borne marcado com “ I_o ” e ao terminal da carga que será alimentado pela **fase c**.
- f. Leia o dos parâmetros exibidos nos *displays*.
- g. A potência total será a soma das potências de cada wattímetro.

APÊNDICE A: ESQUEMA DO CIRCUITO DO WATÍMETRO



Title		Revision	
Size	Number	Sheet of	Drawn By:
A4		05/10/2016	
Date:	File:	C:\Users\A.W1-acc\SchDoc	