



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

WALLYSSON DE VASCONCELOS SOUSA

UM WATTÍMETRO MICROCONTROLADO PARA APLICAÇÕES EM ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2013

WALLYSSON DE VASCONCELOS SOUSA

UM WATTÍMETRO MICROCONTROLADO PARA APLICAÇÕES EM
ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

*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, Paraíba
Outubro de 2013

WALLYSSON DE VASCONCELOS SOUSA

UM WATTÍMETRO MICROCONTROLADO PARA APLICAÇÕES EM
ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

*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, que é em minha vida um presente maravilhoso de Deus. Mulher cheia de garra, coragem, e que nunca permitiu que desistisse dos meus sonhos e propósitos, manteve firme e inabalável sua fé, por acreditar em mim nos momentos em que até eu duvidei da minha capacidade, obrigada por aceitar todos os meus erros e nunca ter me deixado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho.

Aos meus pais Eliezer e Aparecida, pelo amor, carinho, dedicação, compreensão, oportunidades, paciência, enfim, meus pais sem dúvida nenhuma são merecedores e grandes responsáveis por essa vitória.

Agradeço a minha irmã Wilma, por todos os momentos de apoio, carinho na construção desse sonho, e confiança depositada em mim.

Agradeço a minha esposa Walda, por ter me dado apoio, em todas as horas, em todos os bons e maus momentos, esteve sempre ao meu lado, me passando tranquilidade e torcendo por mim, e acreditando que eu seria vitorioso.

Ao meu filho Breno, que apesar da pouca idade, representa muito em minha vida, posso dizer que é a minha fonte de inspiração.

Agradeço ao Professor Tarso Vilela Ferreira pela supervisão e orientação.

Agradeço ao Professor Raimundo Carlos Silvério Freire pela significativa ajuda e contribuição no processo de desenvolvimento dos circuitos eletrônicos.

Agradeço a todos os professores que tive durante o curso de graduação pelo conhecimento transmitido.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um protótipo de um wattímetro digital monofásico para utilização em ensaios de transformadores de distribuição. O protótipo do wattímetro digital é baseado em uma plataforma microcontrolada de baixo custo, e foi confeccionada utilizando componentes e sensores também de custo reduzido. A plataforma microcontrolada permitiu a aquisição e tratamento dos dados relativos às grandezas elétricas do transformador de distribuição. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que sua comparação com outros instrumentos de medição gerou erros suficientemente baixos.

Palavras-chave: Wattímetro, microcontroladores, ensaios, transformadores, arduino.

ABSTRACT

This report presents a prototype of a digital power meter single phase for use in the testing of distribution transformers. The prototype of the meter was based on a digital platform microcontrolled low cost, and was made using components and sensors also reduced cost. The platform microcontrolled allowed the acquisition and processing of data relating to the electrical distribution transformer. The results were satisfactory, since their comparison with other measuring errors generated sufficiently low.

Keywords: Wattmeter, microcontrollers, testing, processing, arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ligação típica de um wattímetro (10).....	13
Figura 2 - Esquema elétrico de ligações para medição de perdas.....	16
Figura 3 - Esquema de ligações para ensaio de curto-circuito.....	16
Figura 4 - Fotografia do Arduino Mega 2560.	17
Figura 5 - Comparação entre modelos da plataforma Arduino.....	20
Figura 6 - Circuito de condicionamento para o sinal de tensão.	22
Figura 7 - Aplicação típica ACS712.....	22
Figura 8 - Esquema de ligação para teste de placas de condicionamento de sinais.....	23
Figura 9 - Fotografia da montagem do teste da placa condicionamento sinal.....	24
Figura 10 - Fotografia da montagem placa condicionamento de sinal 2.....	24
Figura 11 - Resultado da saída da placa de aquisição de dados.....	25
Figura 12 - Fotografia da montagem no Protoboard.....	26
Figura 13 - fotografia da medição de tensão e corrente na carga.....	27
Figura 14 - Fotografia da medição via wattímetro.....	27
Figura 15 - Dados aquisitados via osciloscópio.....	28
Figura 16 - Fotografia arranjo aquisição via osciloscópio.....	29
Figura 17 - Fotografia de medição potência e fator de potencia.....	29
Figura 18 - Fotografia do arranjo experimental.....	30
Figura 19 - Formas de ondas tensão e corrente (ensaio circuito aberto).....	30
Figura 20 - Fotografia de medição de tensão e corrente Ensaio circuito aberto wattímetro.....	31
Figura 21 - Fotografia de medição de potência e fator de potência.....	31
Figura 22 - Formas de ondas tensão e corrente (ensaio curto-circuito).....	32
Figura 23 - Fotografia de medição de tensão e corrente Ensaio curto-circuito wattímetro.....	33
Figura 24 - Fotografia de medição de potência aparente e Potência ativa.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do Arduino Mega	18
Tabela 2 - Dados processados Via MatLab	28
Tabela 3 - Comparativo de dados obtido no ensaio circuito aberto.....	32
Tabela 4 - Comparativo de dados obtido no ensaio curto circuito	34

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivo	11
1.1.1	Objetivo Primário	11
1.1.2	Objetivo Secundário	11
1.2	Motivação	12
2	Embasamento Teórico.....	13
2.1	Wattímetro	13
2.2	Determinação de Potências e Fator de Potência.....	14
2.3	Ensaio em Transformadores	15
2.3.1	Ensaio de circuito aberto	15
2.3.2	Ensaio de curto circuito	16
2.4	Plataforma Arduino Mega 2560.....	17
3	Material e métodos	19
3.1	Material Utilizado	19
3.1.1	Microcontrolador Arduino Mega 2560.....	19
3.1.2	Placa de condicionamento do sinal de tensão	20
3.1.3	Sensor ACS712 da fabricante Allegro®	20
3.1.4	Display de cristal líquido com 16 colunas e 2 linhas	20
3.2	Condicionamento dos sinais.....	21
3.2.1	Sensor de tensão	21
3.2.2	Sensor de Corrente.....	22
3.3	Teste do Protótipo	23
4	Análise e Discussão dos Resultados	26
4.1	Comportamento Transformador em Carga	26
4.2	Ensaio de circuito aberto.....	30
4.3	Ensaio de curto circuito	32
5	Conclusão	35
6	Referências	36
	APÊNDICE A – – Especificações técnicas do Arduino ATmega2560	37

1 INTRODUÇÃO

O wattímetro é um instrumento que permite medir a potência elétrica fornecida ou dissipada por um elemento. Basicamente, ele implementa o produto das grandezas tensão e corrente elétrica no elemento, razão pela qual a sua ligação ao circuito é feita simultaneamente em série e em paralelo

No contexto da Grade Curricular do Curso de Engenharia Elétrica da UFCG, o wattímetro é utilizado nos experimentos de laboratório da disciplina Equipamentos Elétricos, para medição de potência elétrica fornecida ou dissipada por um transformador de distribuição e pode ser construído, dentre outras opções didáticas de implementação, com microcontroladores.

O objetivo principal deste trabalho relatar a construção de um wattímetro digital utilizando a plataforma Arduino. Vale salientar que o trabalho foi confeccionado um protótipo, e que o dispositivo será aprimorado para desenvolvimento de um instrumento de medição como produto final.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO PRIMÁRIO

Este trabalho tem como objetivo principal a construção, teste e validação de um wattímetro digital monofásico de baixo custo para auxílio em ensaios de transformadores de distribuição. O equipamento deve registrar amostras de tensão e corrente, fazer o tratamento matemático e mostrar os resultados em um display LCD.

1.1.2 OBJETIVO SECUNDÁRIO

Desenvolver e documentar técnicas para a construção de materiais didáticos auxiliares ao processo ensino-aprendizagem, com ênfase em disciplinas de eletrotécnica, servindo como referência aos futuros discentes.

1.2 MOTIVAÇÃO

Este projeto poderá permear boa parte da grade curricular do curso, e deverá contemplar o princípio da unidade entre teoria e prática. 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.

Equipamentos dedicados a uma única atividade apresentam custos mais elevados de desenvolvimento. O desenvolvimento de tais equipamentos é fundamental, pois o custo de wattímetros comerciais é elevado e não há a possibilidade de alterações que vislumbrem a aplicação em outras tarefas, uma vez que em geral os equipamentos são de arquitetura fechada e conhecida apenas pelo fabricante. O custo é um fator decisivo em relação à escolha deste projeto, e tem como foco tentar contribuir para a redução de custos e para facilidade nas aplicações mais diversas no ambiente do laboratório.

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 grande flexibilidade para a pesquisa, pois não se está restrito as limitações impostas por um equipamento comercial, sendo factível realizar alterações de acordo com necessidades encontradas no decorrer do projeto.

Além disso, não faltam relatos de dificuldades para a solução de problema, como falta de assistência técnica no município, falta de peças de reposição, demora em conserto wattímetros comerciais.

Este trabalho promove subsídios científicos e tecnológicos para novas pesquisas. Existe atualmente uma grande demanda e interesse por parte de grandes empresas pelo assunto inovação tecnológica. Nesse contexto, as organizações se deparam, com ideias propostas com o objetivo de identificar mudanças no processo de fabricação e/ou criação de produtos.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesta seção será abordada a teoria geral referente a wattímetro e aos ensaios realizados em transformadores. Além disso, serão apresentadas informações sobre o microcontrolador utilizado para processamentos dos dados obtidos a partir da medição das grandezas elétricas.

2.1 WATTÍMETRO

O wattímetro é um instrumento desenvolvido para medição de potência elétrica fornecida ou dissipada por um elemento. É considerado ideal quando torna possível medir a tensão sem desvio de qualquer fluxo de corrente, e medir a corrente sem introduzir qualquer queda de tensão aos seus terminais. Conceitualmente, é realizado o produto entre as grandezas tensão e corrente elétrica, e esta é a razão pela qual a ligação do wattímetro ao circuito é feita simultaneamente em série e em paralelo, conforme apresentado na Figura 3. Assim, dois dos terminais são ligados em paralelo com o elemento, efetuando a medição da tensão, e os dois restantes são interpostos no caminho da corrente.

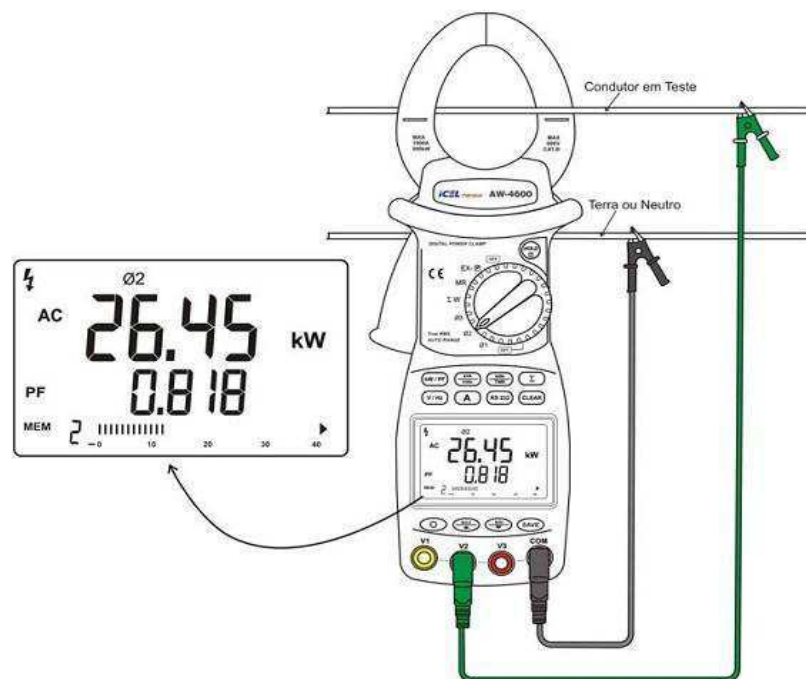


Figura 1 - Ligação típica de um wattímetro (10).

Assim, o wattímetro pode ser representado por dois instrumentos separados:

- Um voltímetro – bobinas de tensão,
- Um amperímetro – bobinas de corrente.

2.2 DETERMINAÇÃO DE POTÊNCIAS E FATOR DE POTÊNCIA

Basicamente, em um wattímetro necessita-se de duas grandezas para a obtenção das informações que necessitamos – tensão e corrente. Com os sinais de tensão e corrente digitalizados, é possível determinar as potências aparente, ativa, reativa e o fator de potência do transformador. Sendo assim, a potência aparente S foi determinada de acordo com a equação (1).

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

Na equação (1), V e I são representativos dos valores *RMS* dos sinais de tensão e corrente, respectivamente. No domínio discreto, esta equação é implementada da seguinte forma:

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

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).

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

O fator de potência (FP) é determinado pela equação (4).

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

O modo pelo qual o fator de potência foi definido é idêntico ao utilizado nos sistemas senoidais, diferenciando-se apenas no significado do ângulo. Para sistemas senoidais, esse ângulo está relacionado à defasagem angular (temporal) entre os sinais de tensão e corrente. Em sistemas com excitação distorcida, o fator de potência não tem relação com a diferença de fase entre os sinais citados.

Neste trabalho tomou-se o conceito de FP como sendo a defasagem entre os sinais de tensão e corrente. Além disso, o FP é calculado indiretamente, fazendo-se uso dos valores previamente calculados de P e S .

2.3 ENSAIOS EM TRANSFORMADORES

Os ensaios descritos a seguir são regulamentados pela norma NBR 5380. Maiores detalhes podem ser encontrados nesta referência.

2.3.1 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

O ensaio de circuito aberto é importante, pois define a energia consumida pelo transformador quando opera sem carga, fornecendo apenas a energia necessária para a magnetização do seu circuito magnético. A forma de onda da corrente em vazio também indica nível de saturação do núcleo magnético do transformador.

O objetivo do ensaio de circuito aberto em transformadores neste trabalho foi determinar:

- Perdas no núcleo ou perdas por Histerese e Foucault (P_o);
- Corrente a Vazio (I_o).

Além dos elementos acima, o ensaio a vazio permite ainda que sejam analisados alguns fenômenos de suma importância para o perfeito entendimento do funcionamento do transformador, como por exemplo: o formato não senoidal da corrente a vazio; e a corrente transitória de magnetização. Contudo, o estudo destes fenômenos não foi foco deste trabalho.

O ensaio de circuito aberto é realizado aplicando tensão nominal senoidal no enrolamento de baixa tensão enquanto o enrolamento de alta tensão fica em aberto. Nos arranjos montados no laboratório de Equipamentos Elétricos empregam-se três amperímetros para medição das correntes de excitação em cada uma das fases, dois wattímetros para medição das potências, e um voltímetro, conforme se pode observar na Figura 2.

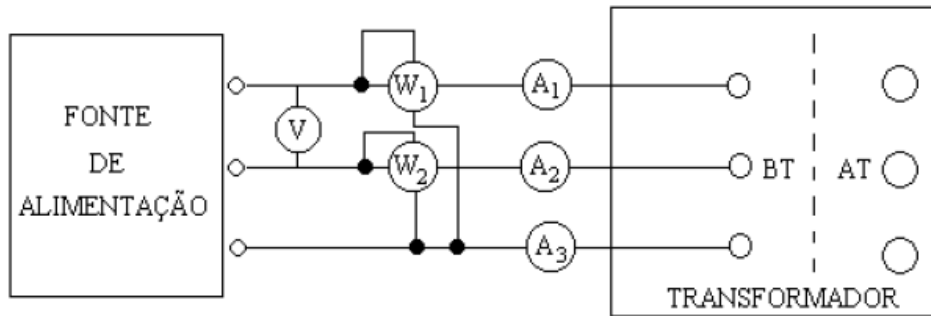


Figura 2 - Esquema elétrico de ligações para medição de perdas.

2.3.2 ENSAIO DE CURTO CIRCUITO

A operação em curto circuito possibilita a determinação das perdas no cobre (P_j), queda de tensão interna (ΔV), e impedância, resistência e reatância percentuais ($Z\%$, $R\%$ e $X\%$).

Neste experimento o lado de baixa tensão do transformador é curto circuitado, de modo a enfatizar as perdas no cobre. O circuito é montado conforme ilustrado na Figura 3, alimentamos no lado de alta com uma tensão correspondente a 10% da tensão nominal.

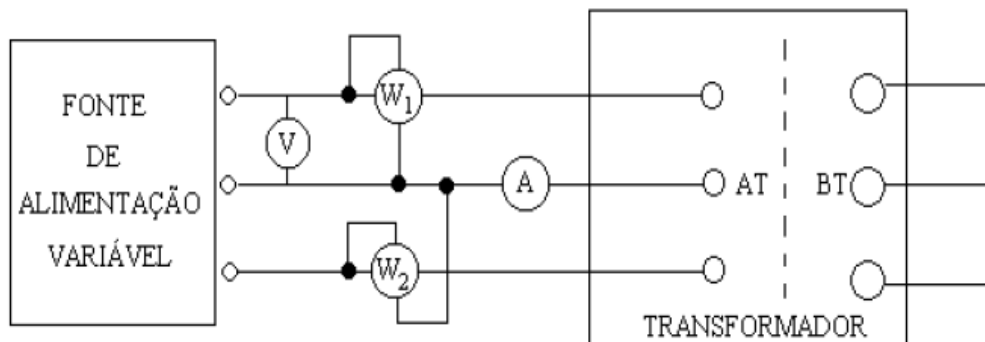


Figura 3 - Esquema de ligações para ensaio de curto-circuito.

Conecta-se o transformador a uma fonte de tensão variável, sob frequência nominal, alimentando-o pelo lado de alta tensão e curto-circuitando o lado de baixa tensão. No arranjo montado no laboratório foram utilizados um voltímetro, um amperímetro, e dois wattímetros para medição das potências.

2.4 PLATAFORMA ARDUINO MEGA 2560

O Arduino Mega 2560 é uma placa de microcontrolador baseada no ATmega2560 e é composto de.

- Cinquenta e quatro pinos de entradas/saídas digitais;
- Dezesseis entradas analógicas;
- Quatro UARTs (portas seriais de *hardware*);
- Um oscilador de cristal de 16 MHz;
- Uma conexão USB, uma entrada de alimentação;
- Uma conexão ICSP e um botão de *reset*.

O Arduino Mega pode ser alimentado mediante a conexão USB ou com uma fonte de alimentação externa. A fonte de alimentação deve possuir uma tensão entre 7 V e 12 V. [6]

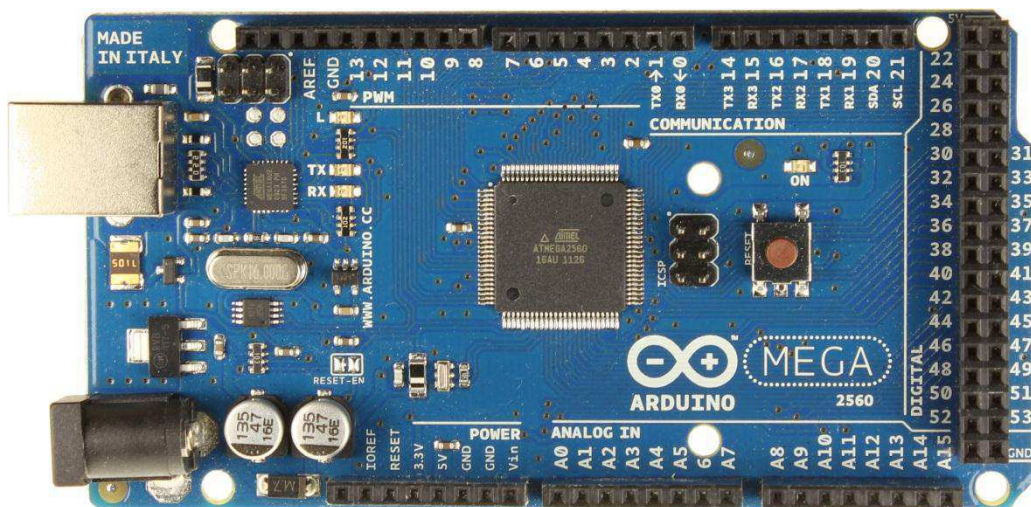


Figura 4 - Fotografia do Arduino Mega 2560.

A principal vantagem desse dispositivo é ser uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada em flexibilidade e facilidade de uso de hardware e software. Além disso, pode ser programada utilizando um software cuja licença é aberta para uso. Essa plataforma possui as características nominais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do Arduino Mega

Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V
Pinos digitais de entrada e saída	54 (das quais 15 fornecem saída PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente CC por pino de entrada e saída	40 mA
Corrente CC para o pino de 3,3 V	50 mA
Memória flash	256 kB
Velocidade do clock	16 MHz

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção é apresentado o material que foi utilizado para confecção do wattímetro e os métodos empregados para processamento e tratamento das grandezas elétricas do transformador de distribuição. O trabalho foi dividido em duas partes: a primeira para o condicionamento dos sinais elétricos, e a segunda para realizar testes do protótipo.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

Foram empregados na confecção do protótipo de wattímetro digital:

3.1.1 MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA 2560

O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software. A maior vantagem do Arduino sobre outras plataformas de desenvolvimento de microcontroladores é a facilidade de sua utilização, novos usuários podem, rapidamente, aprender o básico e criar seus próprios projetos em um intervalo de tempo relativamente curto.

A determinação do clock necessário para o sistema é importante para a escolha correta do microcontrolador a ser utilizado, de modo geral, capacidade de computação, consumo de potência e o custo do sistema irá aumentar com o aumento da frequência de clock.

Os microcontroladores da família Arduino, são compostas por inúmeras versões. Algumas listadas na figura 5:

	Arduino UNO	Arduino Mega 2560	Arduino Mega 1280
Microcontrolador	ATmega 328	ATmega2560	ATmega1280
Nº de portas de E/S³ digital	14 (sendo que 6 podem ser usadas como PWM ⁴)	54 (sendo que 15 podem ser usadas como PWM)	54 (sendo que 14 podem ser usadas como PWM)
Nº de portas de Entrada analógica	6	16	16
Flash memory	32KB	256KB	128KB
Clock speed	16 MHz	16MHz	16MHz
Bootloader	0.5KB	8KB	4KB

Figura 5 - Comparação entre modelos da plataforma Arduino.

O modelo escolhido para realizar o desenvolvimento do protótipo foi o Arduino Mega 2560, pois possui uma quantidade aceitável de memória para o armazenamento de códigos e um número razoável de portas de entrada e saída para conexão dos sensores. Um segundo critério importante para a escolha foi sua disponibilidade imediata no laboratório, porém nada impede o uso Arduino UNO que ajudaria a baratear o projeto final, sem comprometer processamento das grandezas.

3.1.2 PLACA DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DE TENSÃO

Este circuito é composto pelo divisor resistivo, um buffer garantir um perfeito acoplamento de impedâncias, um grampeador para que adicionar um nível DC à uma tensão alternada, além de dois diodo para proteção contra sobretensões.

3.1.3 SENSOR ACS712 DA FABRICANTE ALLEGRO[®]

Baseado no efeito hall, sua saída é isolada da entrada em corrente e não altera características do circuito a ser medido. Sua estabilidade térmica e linearidade, bem como o baixo custo do componente e facilidade em encontra-lo no mercado foram diferenciais importantes para a sua seleção neste trabalho.

3.1.4 DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO COM 16 COLUNAS E 2 LINHAS

Foi utilizado um display LCD 16x2 para que se possa ter uma visualização dos resultados obtidos durante a medição. O fato da simplicidade de como se configura um

Display LCD para trabalhar em conjunto com um microcontrolador faz com que se pense duas vezes em não utilizá-lo em projetos. Um simples Display LCD 16x2 torna o projeto muito mais amigável ao usuário além de aumentar a gama de funções e operações com um custo relativamente baixo.

3.2 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS

O protótipo possui entradas de tensão e corrente as quais são medidas e condicionadas de forma a serem inteligíveis ao usuário do equipamento. Para isto ocorra, é necessário que o microcontrolador meça as grandezas, que geralmente estão fora da faixa de tensão dos conversores A/D disponíveis. Assim, faz-se necessário reduzir a tensão das entradas do circuito para níveis compatíveis com a máxima suportável pelo microcontrolador que é de 0 V a 5 V. No caso da corrente, é necessário também um circuito que converta uma corrente de entrada numa tensão de saída linearmente proporcional. Além disso, os circuitos de condicionamento de sinal tem a função extra de proteger microcontrolador de sobretensões.

3.2.1 SENSOR DE TENSÃO

A medição de tensão foi realizada empregando-se divisores de tensão resistivos. Tal técnica consiste em resistências conhecidas associadas em série, das quais a saída servirá de ponto de medição para que o microcontrolador possa adquirir o sinal. O microcontrolador realiza a conversão do sinal analógico (que varia de 0 a 5 V) em um valor binário de 10 bits. Isso é realizado graças ao conversor A/D embutido no próprio microcontrolador.

É válido destacar que o emprego de um simples divisor de tensão, além de não prover proteção, fornecerá um sinal alternado, ou seja, com valores negativos que não são detectados pelo conversor A/D. Por isso, o circuito de condicionamento de tensão deve também somar ao sinal de entrada um nível DC, grampeando o sinal entre 0 e 5 V.

Após a definição dos atributos necessários aos circuitos de sensoriamento e condicionamento de tensão, foi realizada uma análise a fim de se definir os valores dos componentes. Iniciou-se o estudo do funcionamento dos possíveis circuitos através de simulações utilizando o *software* OrCAD[®]. Com base neste esquemático, a placa de circuito impresso foi projetada. Ao fim deste processo, a placa foi montada com os componentes escolhidos. Na Figura 5 temos um circuito para o condicionamento do sinal de tensão.

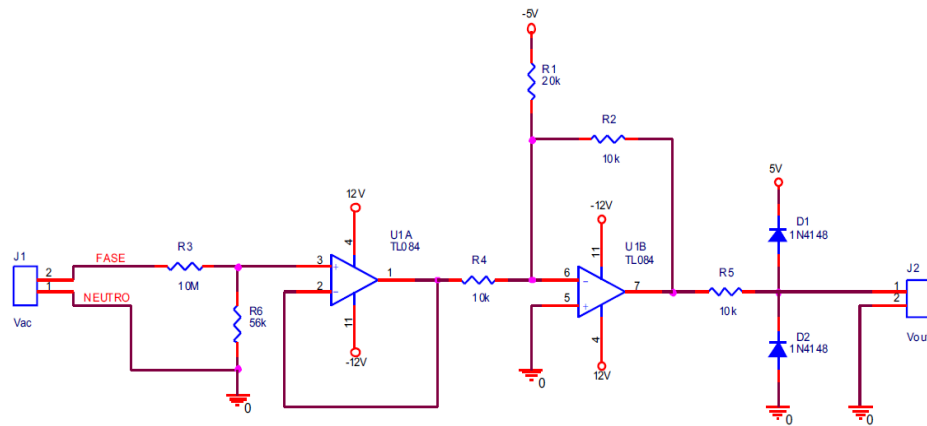


Figura 6 - Circuito de condicionamento para o sinal de tensão.

3.2.2 SENSOR DE CORRENTE

O sensor ACS712 da fabricante Allegro[®] é utilizado para medir a corrente elétrica alternada ou contínua de circuitos industriais, comerciais e sistemas de comunicação. A corrente elétrica aplicada gera um campo magnético que o circuito Hall converte em uma tensão proporcional.

A resistência interna do sensor é típica de 1,2 m Ω , resultando em uma baixa perda de potência. Os terminais de condução de corrente são isolados, o que permite que o ACS712 seja usado em aplicações que necessitam de isolamento elétrico sem o uso de opto acopladores ou outras técnicas de isolamento.

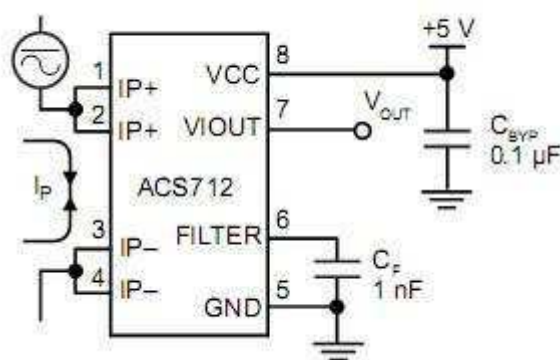


Figura 7 - Aplicação típica ACS712

Algumas características do dispositivo:

- Baixo nível de ruído do sinal analógico;
- A largura de banda do dispositivo é configurada através do pino (6) FILTER;
- 5 μ s de tempo de resposta da saída;

- Largura máxima de banda de 80 kHz;
- Erro total de saída de 1,5% (operando em 25°C);
- Resistência interna de 1,2mΩ;
- 2,1 kV_{RMS} de isolamento mínima dos pinos 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.

Uma vez definidos os circuitos de monitoramento, o protótipo foi montado em matriz de contatos, conforme se pode observar na Figura 16.

3.3 TESTE DO PROTÓTIPO

A primeira etapa de teste referiu-se ao funcionamento correto dos circuitos de condicionamento de sinal.

Para isso, foi utilizado em laboratório um gerador de sinal, dois transformadores de distribuição, e uma carga resistiva variável que visava emular as variações de carga típicas o comportamento dos usuários de forma mais realista de modo que conseguíssemos uma maior proximidade com a realidade, já que nosso objetivo era de certificar que o processo de medição de potência ativa estava sendo realizada de maneira eficaz.



Figura 8 - Esquema de ligação para teste de placas de condicionamento de sinais.

Essa montagem pode ser observadas nas figuras 8 e 9, subsequentes:



Figura 9 - Fotografia da montagem do teste da placa condicionamento sinal.



Figura 10 - Fotografia da montagem placa condicionamento de sinal 2

Nesta etapa do projeto foi verificado através da comparação das formas de onda obtidas no osciloscópio (vide figura 10), se os sinais obtidos nas placas de condicionamento de sinal podem ser aplicados na entrada analógica do microcontrolador Arduino, ou seja, se estão entre 0 e 5V.

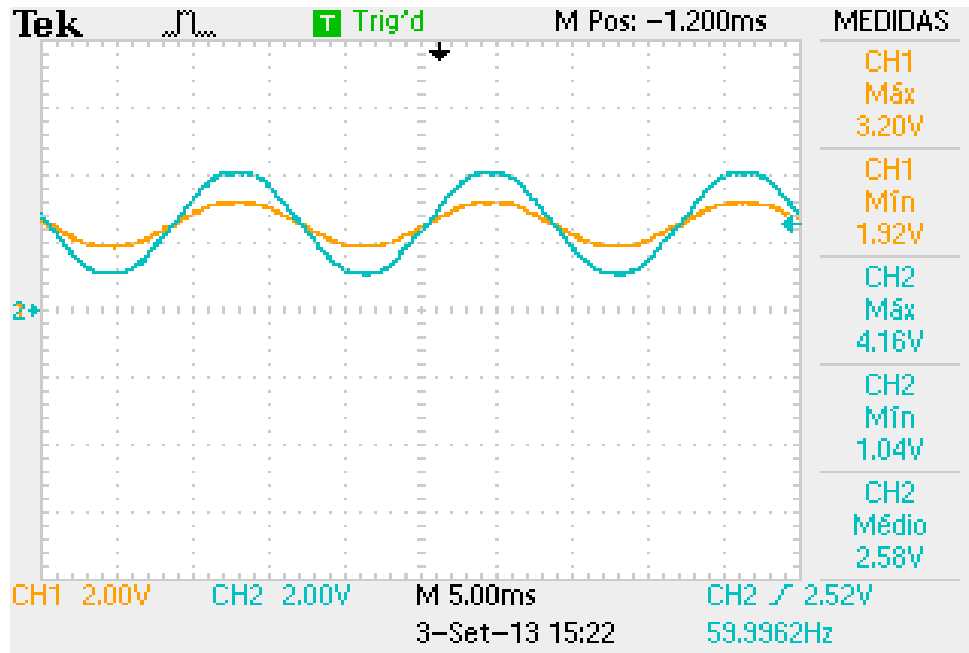


Figura 11 - Resultado da saída da placa de aquisição de dados.

Com os sinais dentro dos limites especificados podemos fazer as montagens

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção é apresentada a análise e discussão de resultados obtidos.

4.1 COMPORTAMENTO TRANSFORMADOR EM CARGA

Após a etapa de revisão teórica e um estudo sobre o comportamento dos sensores, foram desenvolvidos na ordem, a montagem do wattímetro no protoboard (figura 11), calibração e ajuste no código do microcontrolador (Arduino) e por último a visualização em display.

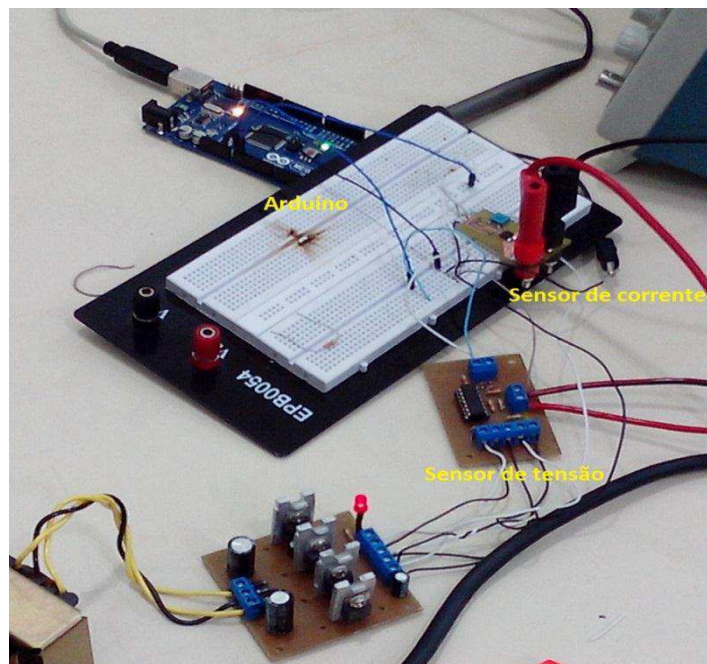


Figura 12 - Fotografia da montagem no Protoboard

A validação dos resultados se deu pelo teste em laboratório, que consistiu em ligar uma carga na resistiva variável nos terminais de baixa tensão CA do nosso sistema, neste, e a colocação de um amperímetro em série com o sensor de corrente ACS712, e um multímetro colocado em paralelo com a carga para medir a tensão. Mais uma vez o arranjo e mostrado na figura 12.



Figura 13 - fotografia da medição de tensão e corrente na carga

Observamos a proximidade dos valores medidos com os apresentados no display, com o maior erro das grandezas medidas inferior a 0,5% (Figura13). Por comparação percebemos existir valores aproximados do display de LCD em relação aos multímetros, que monitoravam tensão e corrente.

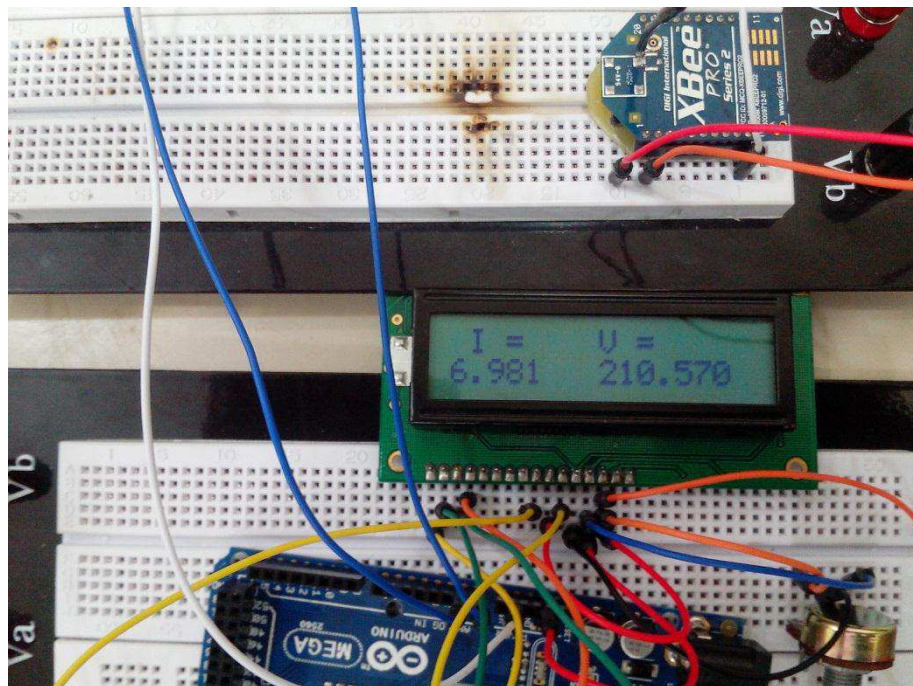


Figura 14 - Fotografia da medição via wattímetro

A maioria dos medidores de tensão e corrente fornece indicações bastante exatas quando operam grandezas constantes (CC) ou formas sinusoidais puras (CA); no entanto deixam a desejar quando a grandeza sob análise tem outra forma de onda. Nesse caso, somente os instrumentos classificados com *TrueRMS* darão a indicação exata.

Como em nosso ensaio tal equipamento não pode ser utilizado, para ter ideia do quão próximo estaria, nossas medições utilizaram um osciloscópio para obter e gravar as mesmas grandezas elétricas, e com auxílio do software Matlab[®] processamos, tratamos, fornecemos dados relativos aos valores das grandezas elétricas.

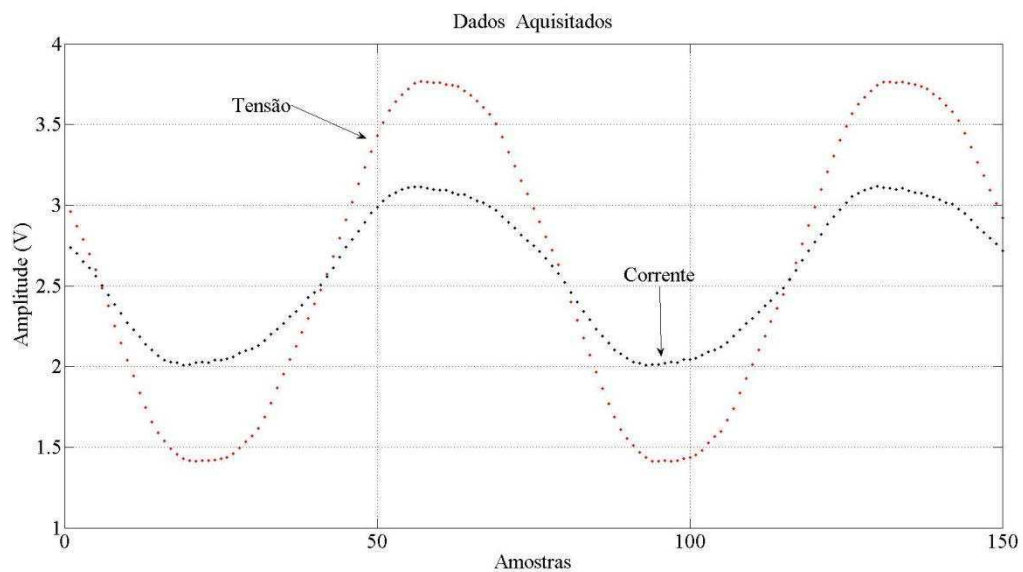


Figura 15 - Dados adquiridos via osciloscópio

Esses dados podem ser observados na Tabela 2 e foram obtidos após tratamento no software Matlab[®], como mencionado anteriormente.

Tabela 2 - Dados processados Via MatLab

Potência Aparente em VA	1465,4000
Potência Ativa em W	1462,1000
Fator de Potência	0,9978

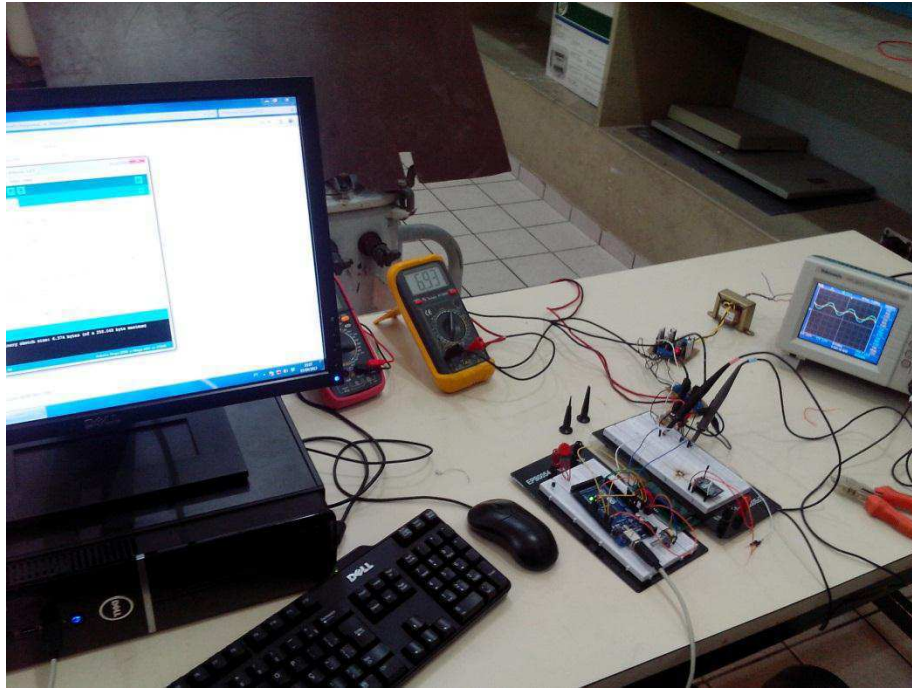


Figura 16 - Fotografia arranjo aquisição via osciloscópio

Por fim, a figura abaixo mostra o projeto em funcionamento, medindo com boa aproximação a potência consumida pela carga, utilizada no teste.

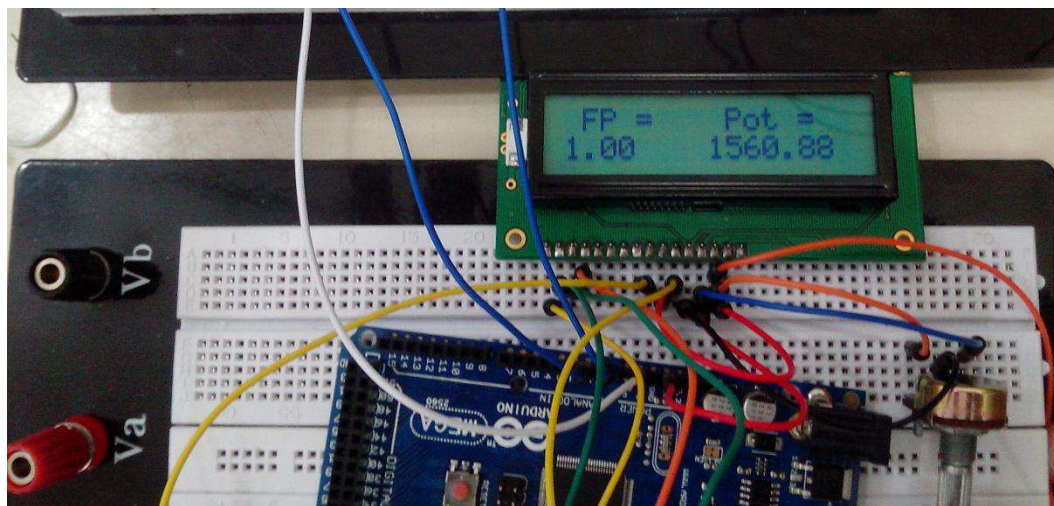


Figura 17 - Fotografia de medição potência e fator de potencia

4.2 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

Este experimento consiste na aplicação da tensão nominal no primário do transformador com o secundário em aberto visando encontrar as perdas no núcleo.

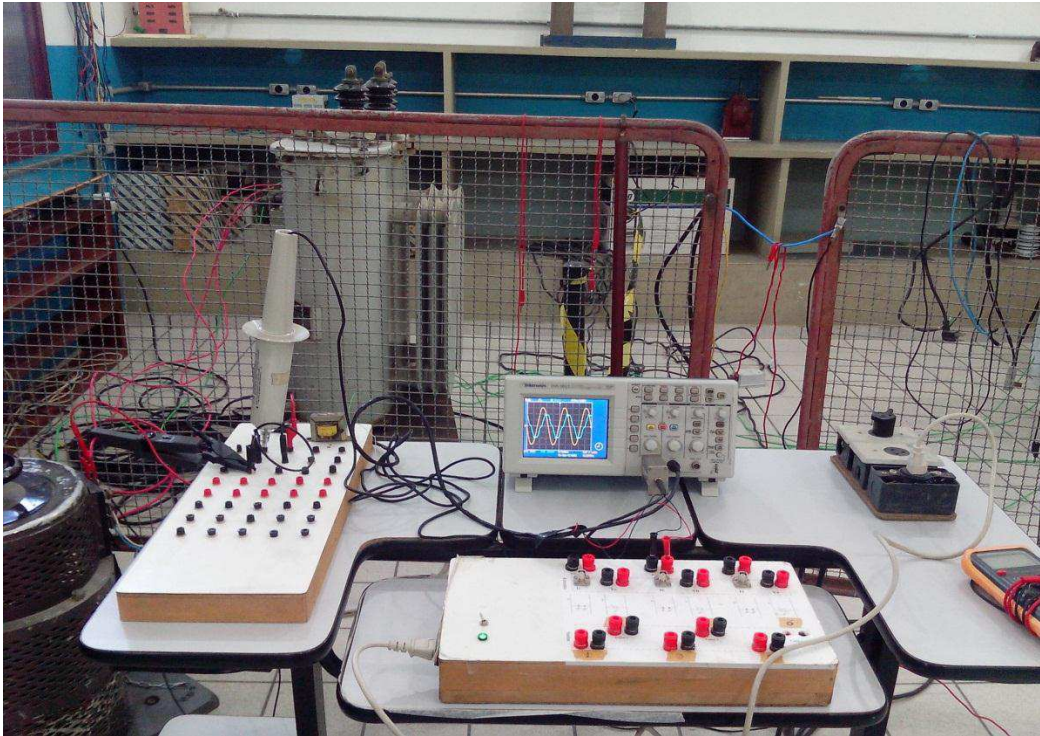


Figura 18 - Fotografia do arranjo experimental

No arranjo montado no laboratório (figura 22), foi realizado o ensaio inicialmente aquisitando dados com o auxílio de um osciloscópio, processando este no software Matlab[®], para confronto futuro com as grandezas vistas no display LCD do protótipo do wattímetro.

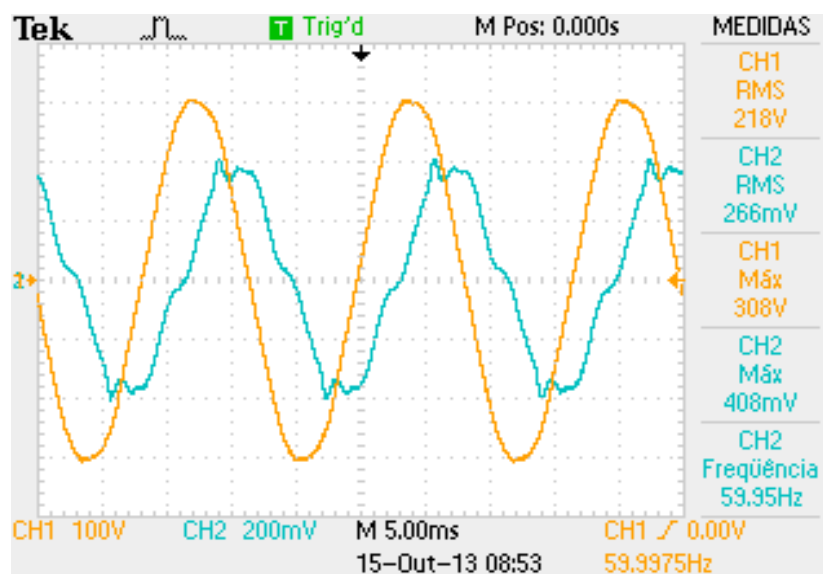


Figura 19 - Formas de ondas tensão e corrente (ensaio circuito aberto).

Podemos ver na figura 19, a coerência dos sinais com o wattímetro:

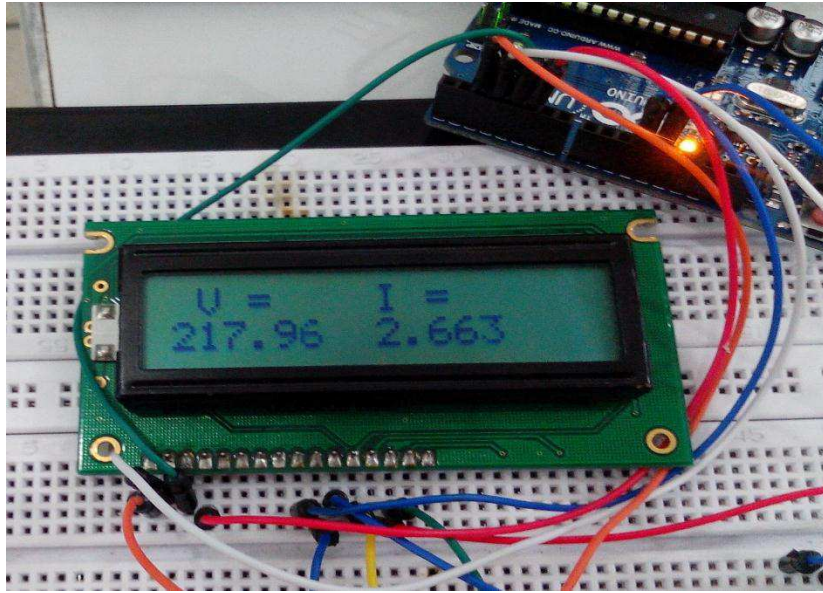


Figura 20 - Fotografia de medição de tensão e corrente Ensaio circuito aberto wattímetro

Para potência ativa e fator de potência observamos os seguintes valores:

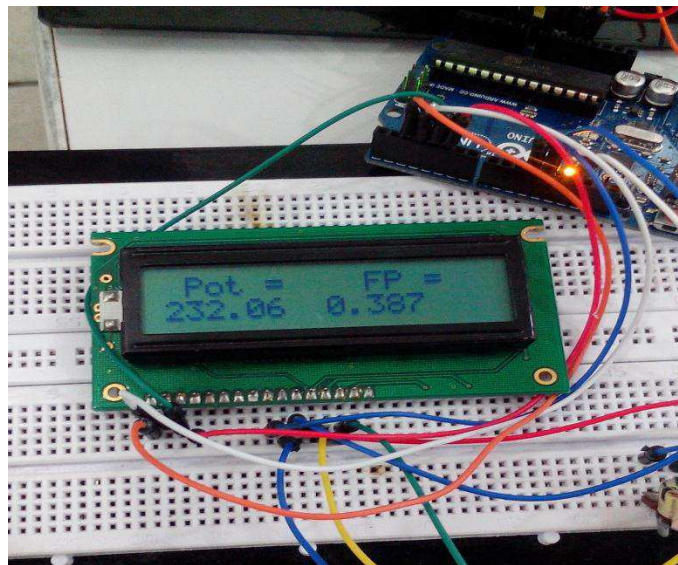


Figura 21 - Fotografia de medição de potência e fator de potência.

Para avaliar os erros presentes nas medições do protótipo, podemos observar a tabela 3, um comparativo wattímetro com valores calculados via Matlab®:

Tabela 3 - Comparativo de dados obtido no ensaio circuito aberto

	Protótipo wattímetro	Matlab®	Erro percentual
Tensão RMS	217,96	218,576	0,28%
Corrente RMS	2,663	2,6688	0,22%
Potência Ativa	232,06	231,6701	0,17%
Fator de potência	0,387	0,3972	2,57%

4.3 ENSAIO DE CURTO CIRCUITO

Ensaio de curto circuito são realizados para determinar as perdas no cobre, ou seja, as perdas por aquecimento nos enrolamentos do transformador. Como no ensaio anterior, a mesma metodologia foi aplicada para manter a coerência.

Observamos a figura 21, sinais de tensão e corrente aplicado no transformador:

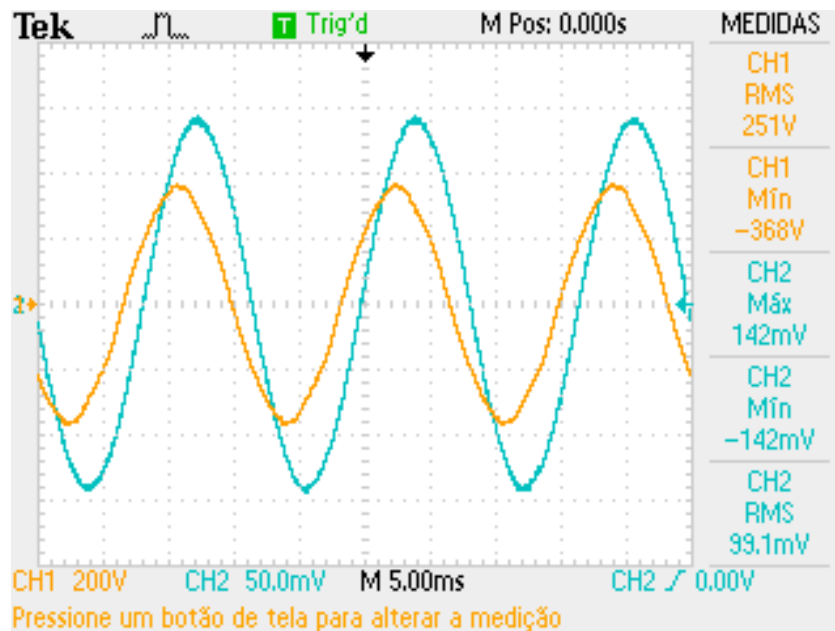


Figura 22 - Formas de ondas tensão e corrente (ensaio curto-circuito).

Dados apresentados pelo wattímetro figura 22, abaixo:

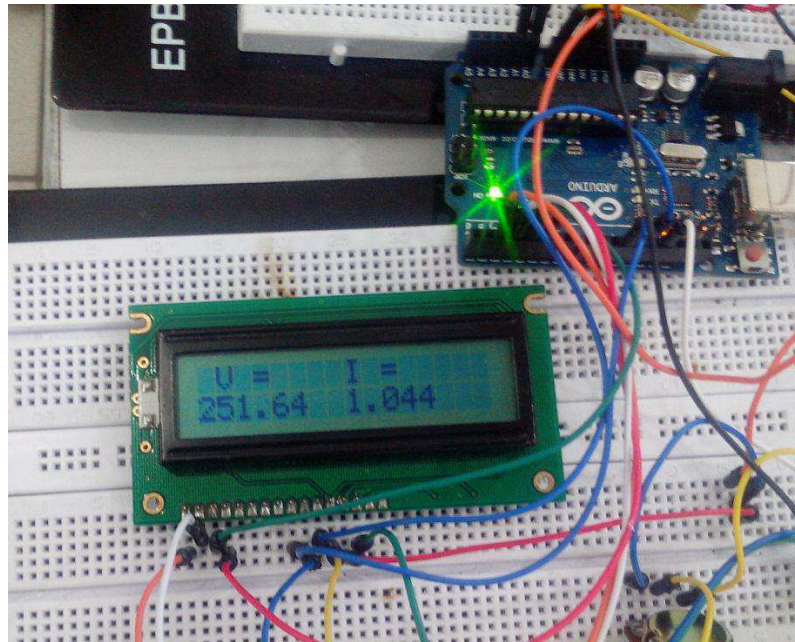


Figura 23 - Fotografia de medição de tensão e corrente Ensaio curto-circuito wattímetro

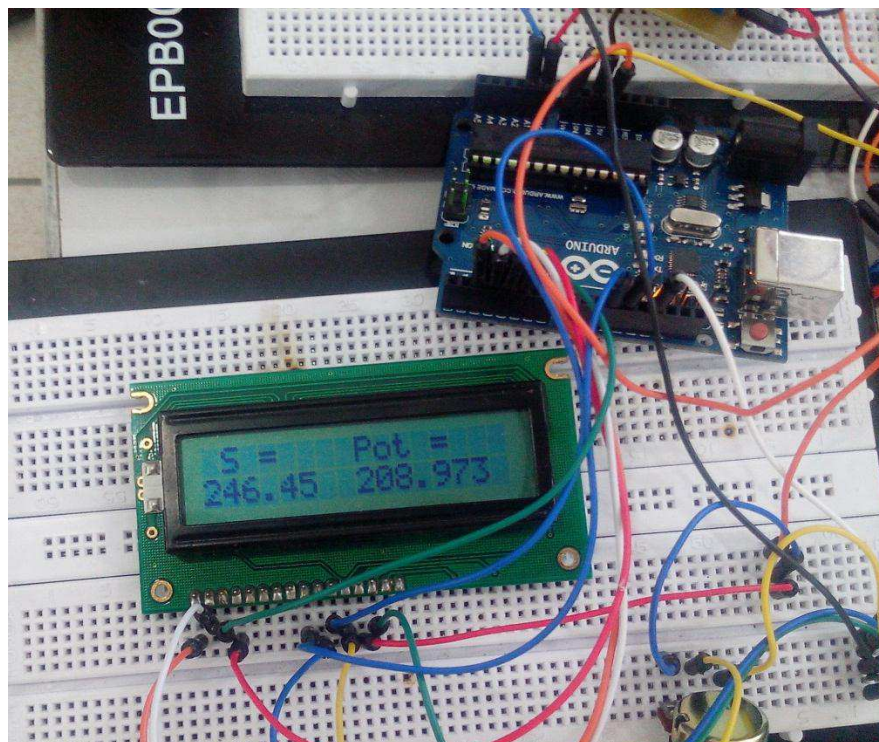


Figura 24 - Fotografia de medição de potência aparente e Potência ativa

Tabela comparativa entre wattímetro e Matlab[®], para ensaio em curto circuito:

Tabela 4 - Comparativo de dados obtido no ensaio curto circuito

	Protótipo wattímetro	Matlab	Erro percentual
Tensão RMS	251,64	251,6596	0,01%
Corrente RMS	1,044	0,9921	5,23%
Potência Ativa	208,973	206,72	1,09%
Potência Aparente	246,45	249,6658	1,29%

5 CONCLUSÃO

Com a realização deste projeto, conseguiu-se idealizar e construir um aparelho de medição de potência ativa. Além disso, o aparelho fornece, a partir das grandezas elétricas (tensão e corrente), várias outras grandezas, tais como potência aparente, fator de potência, potência reativa. Este projeto representa um produto que consegue ser mais completo que os atuais wattímetros presentes no mercado, devido ao fato de o cliente final poder escolher quais grandezas são de interesse e rapidamente mudar o código do Arduino, uma vez que esse é bem intuitivo.

Quanto ao nível de conhecimentos, este projeto, foi um enorme desafio, pois mesclava inúmeros conhecimentos de áreas distintas da engenharia elétrica, os quais necessitaram serem revisados. Todos os conhecimentos obtidos nas matérias lecionadas foram bastante úteis, abriram as portas a um novo campo, ainda desconhecido, o de pesquisa e desenvolvimento.

Apesar das dificuldades e dos problemas encontrados durante as etapas do projeto, foi um grande aprendizado para mim ao superar estas dificuldades, que justamente é um dos objetivos dos trabalhos acadêmicos.

Como trabalho futuro, pode-se ampliar a rede de sensores para diversos tipos, como os sensores de temperatura, e de vibração, podendo utilizar redes sem fio para monitoramento em tempo real, de determinados equipamentos.

6. REFERÊNCIAS

- [1]. OLIVEIRA, José Carlos de, COGO, João Roberto e ABREU, José Policarpo G. de. Transformadores: Teoria e Ensaio. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, 1984.
- [2]. FILHO, João Mamede. Manual de Equipamentos Elétricos. Volume 1. 2ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1994.
- [3]. LUCIANO, Benedito Antônio. Apostila sobre Transformadores. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, Paraíba.
- [4]. 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>.
- [5]. J. M. Neto, S. Paladini, C. E. Pereira and R. Marcelino, "Remote educational experiment applied to electrical engineering," in Proc. 2012 IEEE Remote Engineering and Virtual Instrumentation Conf., pp. 1-5.
- [6]. M. Banzi, D. Cuartielles, T Igoe, G. Martino and D. Mellis, Arduino. [Online]. Disponível: <http://arduino.cc/en/>.
- [7]. 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.
- [8]. D. A. Fernandes, H. A. Ferreira, E. G. Costa, "Guia de experimentos com transformadores de distribuição" Campina Grande, Paraíba.
- [9]. J. F. Araújo, T. V. Ferreira, E. G. Costa, "Microcontroladores e Matlab Aplicados ao Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Transformadores de Distribuição" Campina Grande, Paraíba. Não publicado.
- [10]. Manual de Instruções do Alicata Wattímetro MODELO AW-4600. Disponível em: <http://icel-manaus.com.br/imagens/produtos/aw4600.pdf>

APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ARDUINO ATMEGA2560

Technical Specification

EAGLE files: [_arduino-mega2560-reference-design.zip](#) Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller Operating Voltage Input Voltage (recommended) Input Voltage (limits) Digital I/O Pins Analog Input Pins DC Current per I/O Pin DC Current for 3,3V Pin Flash Memory SRAM EEPROM Clock Speed	ATmega2560 5V 7-12V 6-20V 54 (of which 14 provide PWM output) 16 40 mA 50 mA 256 KB of which 8 KB used by bootloader 8 KB 4 KB 16 MHz
--	--

the board

The image shows an Arduino Mega 2560 board with several components highlighted by colored boxes and labels:

- TX/RX Leds** (blue box): Located near the USB interface.
- "Test" Led 13** (yellow box): Located near the ATmega 2560 chip.
- digital pins** (green box): Points to the digital pin header on the right side.
- Power Led** (yellow box): Located near the I2C header.
- I2C** (green box): Points to the I2C header on the right side.
- USB Interface** (red box): Points to the USB Type-B connector.
- ICSP Header** (red box): Points to the ICSP header.
- ATmega 2560** (red box): Points to the main microcontroller chip.
- External Power Supply** (red box): Points to the DC power jack.
- power pins** (red box): Points to the power pin header at the bottom.
- analog pins** (yellow box): Points to the analog pin header at the bottom.

