

Faculdade de Tecnologia de São Paulo
Tecnologia em Instalações Elétricas

JOÃO VITOR DA SILVA - 22108913
LUIZ EDUARDO D. DOMINGOS - 22113379

DISPOSITIVO ARDUINO PARA ENSAIOS EM TRANSFORMADORES
MONOFÁSICOS DIDÁTICOS

SÃO PAULO – SP
2025

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

JOÃO VITOR DA SILVA - 22108913

LUIZ EDUARDO D. DOMINGOS - 22113379

**DISPOSITIVO ARDUINO PARA ENSAIOS EM TRANSFORMADORES
MONOFÁSICOS DIDÁTICOS**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao curso de Tecnologia em Instalações Elétricas da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de tecnólogo.

Orientador: Me. Helvio Fregolente Junior

Coorientador: Dr. Maurício Antônio Deffert

SÃO PAULO – SP

2025

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho, com todo carinho, às nossas famílias, que sempre nos apoiaram, e também aos professores e amigos que fizeram parte desta caminhada

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, cuja presença e força nos sustentaram em cada etapa desta jornada. Somos profundamente gratos às nossas famílias, por terem sido o alicerce constante, pelo apoio, pela paciência e pelo incentivo que nos permitiram seguir adiante.

Reconhecemos com respeito e gratidão o trabalho dos professores que nos orientaram e inspiraram, em especial aqueles que nos orientaram diretamente neste TCC, pelas orientações técnicas e críticas fundamentais. Agradecemos também aos colegas e aos amigos que fizemos ao longo do curso, a companhia, as trocas e o apoio tornaram o caminho mais leve e possível.

EPÍGRAFE

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

Cora Coralina

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo didático para ensaios em transformadores monofásicos. Foram realizados os ensaios em vazio, curto-circuito e carga, permitindo calcular parâmetros internos, circuito equivalente e rendimento. O dispositivo mostrou-se robusto, intuitivo e eficiente, reduzindo tempo de execução e erros humanos, além de oferecer custo acessível em comparação a equipamentos tradicionais. Os resultados obtidos demonstraram confiabilidade, validando tanto medições quanto cálculos. O protótipo cumpre plenamente seu objetivo, consolidando-se como ferramenta relevante para ensino e prática experimental em laboratórios de elétrica.

Palavras-Chave: Transformadores monofásicos; Arduino; Automação didática; Ensaios elétricos; Rendimento.

ABSTRACT

This work presents the development of a didactic prototype designed to perform tests on single-phase transformers. Open-circuit, short-circuit, and load tests were conducted, enabling the calculation of internal parameters, equivalent circuit, and efficiency. The device proved to be robust, intuitive, and efficient, reducing execution time and human errors while offering a cost-effective alternative to traditional equipment. The results demonstrated high reliability, validating both measurements and calculations. The prototype successfully fulfills its purpose, establishing itself as a relevant tool for teaching and experimental practice in electrical engineering laboratories.

Keywords: Single-phase transformers; Arduino; Didactic automation; Electrical tests; Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regra da mão direita.	17
Figura 2 - Regra da mão esquerda.	17
Figura 3 - Limalhas de ferro indicando linhas de campo magnético do ímã.	18
Figura 4 - Limalhas de ferro indicando linhas de indução magnética do condutor.....	19
Figura 5 - Corrente induzida pelo movimento do ímã.....	20
Figura 6 - Movimento de um ímã próximo de uma espira.	21
Figura 7 - Transformador com núcleo envolvido.	23
Figura 8 - Transformador com núcleo envolvente.	23
Figura 9 - Transformador com enrolamento tipo concêntrico e alternado.....	24
Figura 10 - Desenho esquemático de um transformador ideal.	25
Figura 11 - Diagrama de um transformador real com o secundário sem carga.	27
Figura 12 - Circuitos equivalentes do transformador monofásico.	33
Figura 13 - Esquema de ligação para o ensaio de transformador em vazio.	34
Figura 14 - Esquema de ligação para o ensaio de transformador em vazio.	36
Figura 15 - Imagem de uma placa Arduino	38
Figura 16 - Placa Arduino Mega 2560.....	39
Figura 17 - Exemplo de uma interface IDE	40
Figura 18 - Funções setup e loop.....	41
Figura 19 - Arduino Mega 2560 R3 ATmega2560.....	43
Figura 20 – Par de voltímetro amperímetro PZEM-004T.....	44
Figura 21 - Display LCD.....	45
Figura 22 - Teclado matricial 12 dígitos	45
Figura 23 - Kits e itens complementares.....	46
Figura 24 - Caixa plástica ABS preta	46
Figura 25 - Fluxograma de funcionamento do software	49
Figura 26 – Desenho do posicionando do teclado e LCD na tampa.....	50
Figura 27 - Recortes iniciais na tampa.....	51
Figura 28 - Tampa acrílica finalizada (frente).....	51
Figura 29 - Tampa acrílica finalizada (verso)	52
Figura 30 - Posicionamento do Arduino dentro da caixa I	53
Figura 31 - Posicionamento do Arduino dentro da caixa II	53
Figura 32 - Posicionamento dos wattímetros dentro da caixa	54
Figura 33 - Posicionamento do potenciômetro dentro da caixa.....	55
Figura 34 - Conexão dos cabos nos wattímetros	55
Figura 35 - Identificação dos cabos dentro da caixa	56

Figura 36 - Soldagem dos componentes.....	57
Figura 37 – Organização dos cabos	58
Figura 38 - Fechamento da tampa acrílica I	58
Figura 39 - Fechamento da tampa acrílica II	59
Figura 40 - Protótipo com a tampa acrílica fechada	59
Figura 41 - Resultado final da tampa acrílica	60
Figura 42 - Resultado final da organização interna dos cabos e componentes I	61
Figura 43 - Resultado final da organização interna dos cabos e componentes II	61
Figura 44 - Resultado final do protótipo	62
Figura 45 - Esquema elétrico ensaio em circuito aberto (CA)	63
Figura 46 – Ligação do transformador monofásico em circuito aberto (CA)	64
Figura 47 - Esquema elétrico ensaio em curto circuito (CC)	65
Figura 48 - Ligação do transformador monofásico em curto circuito (CC).....	66
Figura 49 - Esquema elétrico ensaio em carga	67
Figura 50 - Ligação do transformador monofásico em carga	68
Figura 51 - Valores obtidos no aplicativo	70
Figura 52 - Resultado do rendimento do transformador ensaiado.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista completa de todos os materiais utilizados no protótipo	47
Tabela 2 - Valores obtidos no protótipo ensaio em aberto (CA)	64
Tabela 3 - Valores obtidos no protótipo ensaio em curto circuito (CC)	66
Tabela 4 - Valores obtidos no protótipo ensaio em carga	68
Tabela 5 - Resultados obtidos no protótipo circuito equivalente do transformador	69
Tabela 6 - Resultados obtidos no protótipo rendimento do transformador	71

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Intensidade do campo magnético gerado por um fio retilíneo	19
Equação 2 - Cálculo matemático que representa a lei de Faraday	20
Equação 3 - Relação entre tensões e número de espiras do transformador ideal.....	25
Equação 4 - Relação de transformação do transformador ideal.....	25
Equação 5 - Relação de correntes no transformador ideal	26
Equação 6 - Potência ativa do transformador Ideal.....	26
Equação 7 - Potência reativa do transformador Ideal.....	26
Equação 8 - Potência aparente do transformador Ideal	26
Equação 9 - Lei de Faraday da Indução Eletromagnética	27
Equação 10 - Definição de fluxo concatenado	27
Equação 11 - Fluxo magnético médio por espira	28
Equação 12 - Lei de Faraday reescrita	28
Equação 13 - Fluxo magnético médio no primário em função da tensão aplicada	28
Equação 14 - Decomposição do fluxo magnético do lado primário	28
Equação 15 - Decomposição do fluxo magnético do lado secundário.....	29
Equação 16 - Lei de Faraday aplicada ao primário com fluxo mútuo e fluxo de dispersão...	29
Equação 17 - Tensão induzida no primário considerando apenas o fluxo mútuo.....	29
Equação 18 - Tensão induzida no secundário considerando apenas o fluxo mútuo	29
Equação 19 - Relação de tensões e número de espiras	30
Equação 20 - Perdas no ferro (núcleo)	31
Equação 21 - Lei de Steinmetz para perdas por histerese em materiais ferromagnéticos ...	31
Equação 22 - Perdas no cobre (enrolamento).....	31
Equação 23 - Relação entre perdas no cobre e potência útil entregue à carga.....	31
Equação 24 - Cálculo do rendimento considerando todas as perdas.....	32
Equação 25 - Resistência equivalente de perdas no núcleo	35
Equação 26 - Impedância de magnetização do transformador	35
Equação 27 - Reatância de magnetização do transformador.....	35
Equação 28 - Potência dissipada no núcleo (ferro).....	35
Equação 29 - Impedância equivalente referida ao primário	36
Equação 30 - Resistência equivalente do transformador referida ao primário.....	36
Equação 31 - Reatância equivalente do transformador referida ao primário	37
Equação 32 - Potência dissipada no cobre (enrolamento)	37

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
1.2 Estrutura do documento	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Conceitos	16
2.1.1 Definição de Campo Magnético	16
2.1.2 Campo Magnético Gerado por Corrente Elétrica.....	18
2.1.3 Lei da Indução Eletromagnética de Faraday	20
2.1.4 Lei de Lenz	21
2.2 Transformador	22
2.2.1 Núcleo	22
2.2.2 Enrolamentos.....	24
2.2.3 Transformador Ideal.....	24
2.2.4 Transformador Real	26
2.3 Perdas.....	30
2.3.1 Perda no Núcleo	30
2.3.2 Perdas no Cobre.....	31
2.3 Rendimento	32
2.4 Circuito Equivalente de um Transformador	32
2.5 Ensaios em Transformadores.....	33
2.5.1 Ensaio em Vazio	34
2.5.2 Ensaio em Curto Circuito	35
2.6 Arduino.....	37
2.6.1 Placa Arduino Mega 2560	38
2.6.2 Ambiente de Desenvolvimento Arduino IDE.....	39
2.6.3 Linguagem de Programação C/C++	40

3 DESENVOLVIMENTO	42
3.1 Descrição do protótipo	42
3.2 Componentes utilizados	43
3.3 Desenvolvimento do Software	48
3.4 Montagem física do protótipo	49
3.5 Resultado final da montagem	60
4 RESULTADOS	63
4.1 Resultados ensaio em vazio	63
4.2 Resultados ensaio em curto circuito	65
4.3 Resultados ensaio em carga	67
4.4 Resultados circuito equivalente do transformador	69
4.5 Resultados rendimento do transformador	70
5 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	75
ANEXO A – DATASHEET DO ARDUINO E SENSORES	77

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos transformadores monofásicos é fundamental no campo da elétrica, principalmente para a compreensão de conceitos como transferência de energia elétrica, perdas, eficiência e comportamento de cargas. Durante as aulas de laboratório, é comum realizar ensaios nos transformadores monofásicos para avaliar suas características elétricas e desempenho. Entre esses ensaios, destacam-se o ensaio em vazio, o ensaio em carga e o ensaio em curto, que permitem medir tensões, correntes e potências, possibilitando o cálculo do rendimento do equipamento.

No entanto, apesar da importância desses ensaios, a prática tradicional envolve uma série de cálculos manuais e medições individuais que podem tornar o processo demorado, suscetível a erros humanos e pouco eficiente, principalmente em um contexto educacional em que se busca maximizar o aprendizado prático de forma objetiva e segura. A partir dessa constatação, surgiu a ideia de desenvolver um dispositivo automatizado baseado em Arduino, capaz de executar os ensaios do transformador monofásico de forma automática. O dispositivo realiza as medições de tensão, corrente e potência, processa os cálculos de perdas e rendimento, e exibe diretamente o resultado final, facilitando a compreensão do aluno e agilizando o procedimento experimental.

A escolha desse tema se justifica pela necessidade de modernizar o ensino de ensaios elétricos em laboratórios de formação técnica e superior, integrando conceitos de automação e programação com as práticas tradicionais da elétrica. Além disso, o projeto contribui para o aprendizado de tecnologias embarcadas, como o Arduino, e para a aplicação prática de conceitos de instrumentação elétrica, tornando o estudo mais interativo, preciso e próximo do que é encontrado em ambientes profissionais.

A metodologia adotada neste trabalho envolveu três etapas principais: inicialmente, realizou-se o estudo dos ensaios elétricos de transformadores monofásicos; em seguida, foram selecionados os componentes eletrônicos e programado o Arduino para processar os dados coletados; por fim, o dispositivo foi testado em laboratório, com registro dos resultados e comparação com aplicativos específicos de testes, garantindo a precisão e a confiabilidade das informações obtidas.

O escopo do trabalho limita-se ao desenvolvimento de um dispositivo automático para ensaios de transformador monofásico em ambiente de laboratório

acadêmico. Serão abordados os ensaios em vazio em curto e em carga, medição de tensões, correntes e potências, cálculo do rendimento e comparação com aplicativos específicos de testes. Não serão tratados transformadores trifásicos, aplicações industriais em larga escala ou ensaios fora do contexto educacional, garantindo que o estudo permaneça focado no aprendizado prático e na instrumentação para fins pedagógicos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um dispositivo automático baseado em Arduino para realizar os ensaios do transformador monofásico, medindo tensões, correntes e potências e calculando automaticamente o rendimento, exibindo o resultado de forma prática e direta.

1.1.2 Objetivos específicos

O trabalho consiste no projeto do circuito eletrônico e da interface do dispositivo, utilizando a plataforma Arduino e sensores adequados para a medição das grandezas elétricas envolvidas. Em seguida, o Arduino é programado para realizar a coleta dos dados de tensão, corrente e potência, processar automaticamente os cálculos necessários e apresentar, ao final, o valor do rendimento no visor do sistema. O funcionamento do dispositivo é validado por meio da realização de ensaios práticos em transformadores monofásicos no laboratório. Por fim, os resultados obtidos de forma automática são comparados com os cálculos realizados por aplicativos específicos de testes, com o objetivo de verificar a confiabilidade e a precisão do dispositivo desenvolvido.

1.2 Estrutura do documento

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, na qual são expostos a contextualização do estudo, os objetivos propostos e a justificativa para o desenvolvimento do dispositivo de ensaio automatizado. O Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica, abordando os princípios de funcionamento do transformador monofásico, bem como os conceitos relacionados à utilização do Arduino, considerados essenciais para a elaboração do projeto. No Capítulo 3 é descrito o desenvolvimento do protótipo, incluindo sua finalidade, o problema que se propõe a solucionar, os componentes empregados com seus respectivos custos, o desenvolvimento do software e a montagem completa do equipamento. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos em cada ensaio, realizando a comparação entre as medições efetuadas automaticamente pelo dispositivo e aquelas obtidas por meio do aplicativo. Por fim, o Capítulo 5 reúne as discussões e conclusões, além de apresentar as considerações finais do projeto e apontar possíveis melhorias para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos

2.1.1 Definição de Campo Magnético

Conforme explica Asth (2025), o campo magnético é uma grandeza vetorial da física que pode exercer força sobre partículas com carga elétrica. Quando o campo magnético muda, a força magnética que age sobre uma carga também é alterada, ou seja, varia-se o campo e muda-se a interação com a carga.

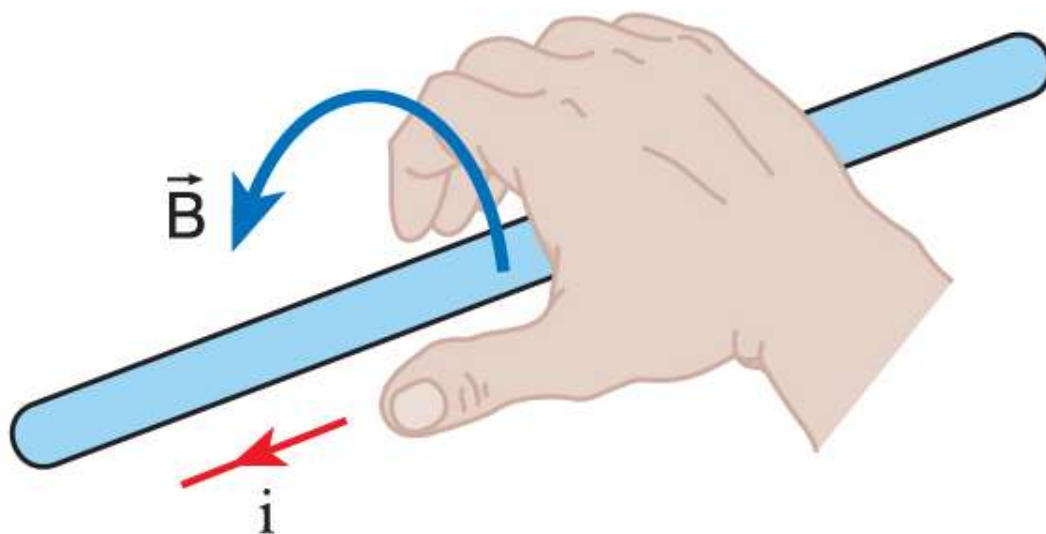
Por ser vetorial, o campo magnético tem três características essenciais: direção, sentido e intensidade.

- **Direção:** corresponde à direção das linhas de campo magnético, é também a orientação em que uma carga em movimento paralela ao campo não sofre força magnética (ou seja, quando a velocidade é paralela ao campo, a componente de força magnética é nula).
- **Sentido:** determinado por regras práticas como a “regra da mão direita” para o campo gerado por correntes, ou a “regra da mão esquerda” em aplicações com corrente e força, que nos permitem visualizar para onde o campo aponta.
- **Intensidade:** é a magnitude do campo e pode ser calculada por fórmulas específicas quando conhecemos as grandezas envolvidas (por exemplo, a força, a velocidade da carga e o ângulo entre velocidade e campo).

Dantas (2025) ressalta que as regras práticas úteis para utilizar na hora de desenhar ou prever sentidos são:

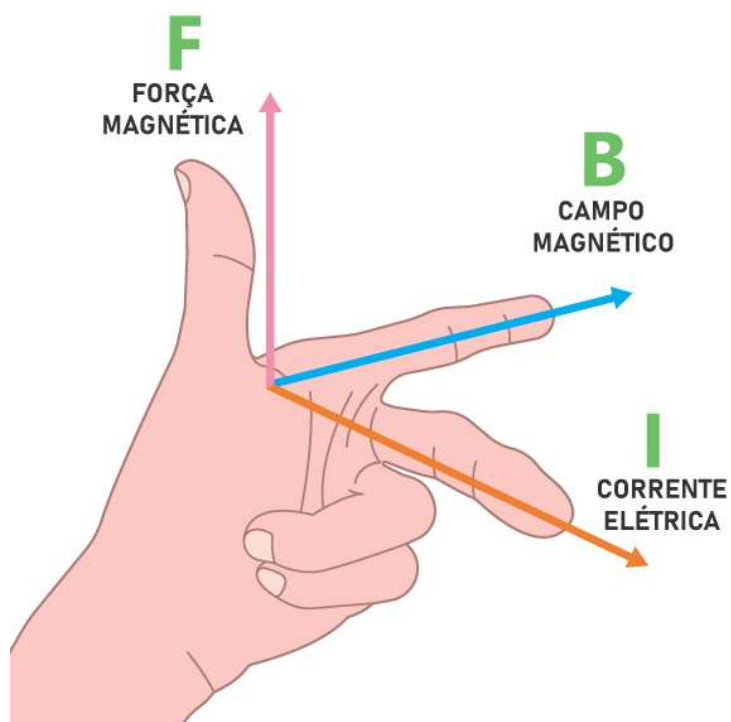
- **Regra da mão direita:** com o polegar apontando o sentido da corrente elétrica, os demais dedos enrolam e mostram o sentido do campo magnético gerado ao redor do condutor.
- **Regra da mão esquerda:** o dedo médio indica o sentido da corrente, o indicador aponta o sentido do campo magnético e o polegar aponta o sentido da força magnética.

Figura 1 - Regra da mão direita.



Fonte: Brasil Escola (2025)

Figura 2 - Regra da mão esquerda.

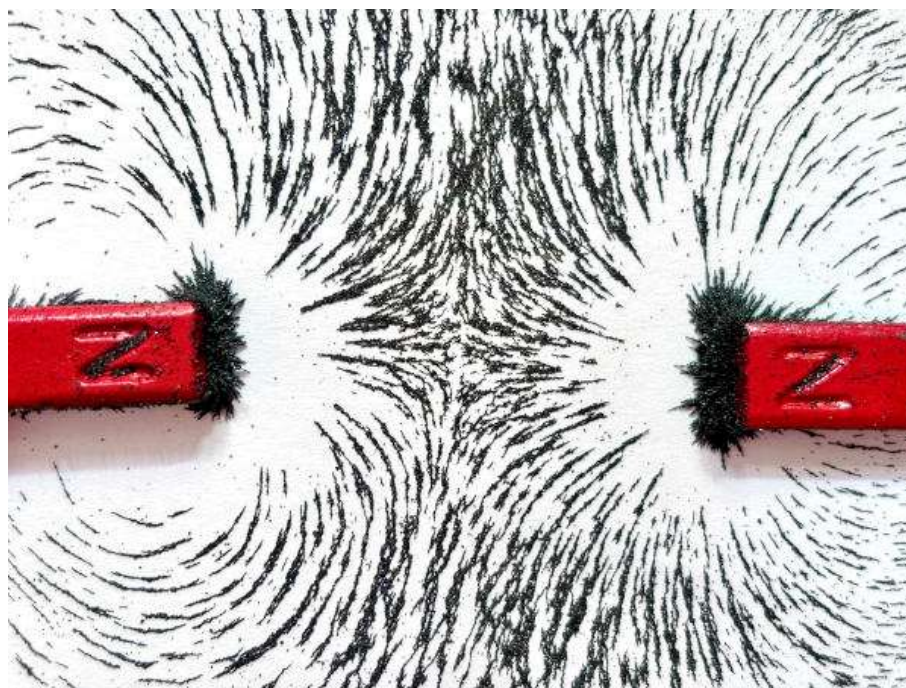


Fonte: Brasil Escola (2025)

2.1.2 Campo Magnético Gerado por Corrente Elétrica

Costa (2025) destaca que, uma corrente elétrica ao passa por um fio condutor, ela cria ao redor desse fio um campo magnético. Esse campo pode ser visualizado com a ajuda de limalhas de ferro, que se alinham formando círculos ao redor do fio. Quanto maior a intensidade da corrente, mais forte é o campo magnético gerado. Além disso, se o fio for enrolado em forma de espira ou bobina, o campo magnético se torna mais concentrado e uniforme no interior da bobina, o que é útil em diversos dispositivos, como eletroímãs e motores elétricos.

Figura 3 - Limalhas de ferro indicando linhas de campo magnético do ímã.



Fonte: Prepara Enem (2025)

Figura 4 - Limalhas de ferro indicando linhas de indução magnética do condutor.



Fonte: Prepara Enem (2025)

A intensidade do campo magnético gerado por um fio retilíneo é dada pela equação a seguir:

Equação 1 - Intensidade do campo magnético gerado por um fio retilíneo

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot r} \quad (1)$$

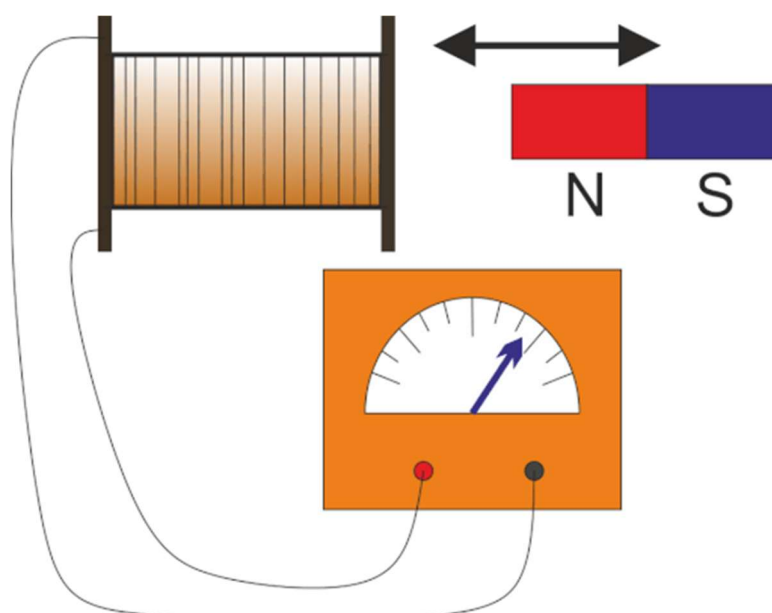
Onde:

- μ é a permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A),
- B é a densidade do campo magnético (Tesla, T).
- i é a intensidade da corrente elétrica (Ampere, A).
- r é raio da espira (metros, m).

2.1.3 Lei da Indução Eletromagnética de Faraday

A Lei de Faraday explica como uma corrente elétrica pode ser gerada a partir de um campo magnético. Ela afirma que, se houver uma variação no fluxo magnético através de um circuito condutor, será induzida uma força eletromotriz (FEM) nesse circuito. (ASTH, 2025)

Figura 5 - Corrente induzida pelo movimento do ímã.



Fonte: Toda Matéria (2025)

Essa variação pode ocorrer de duas formas: movendo um ímã em direção ou afastando-o de uma bobina, ou movendo a bobina em relação a um campo magnético. Quanto mais rápida for a variação do fluxo magnético, maior será a tensão induzida.

A fórmula que expressa essa relação é:

Equação 2 - Cálculo matemático que representa a lei de Faraday

$$\varepsilon = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (2)$$

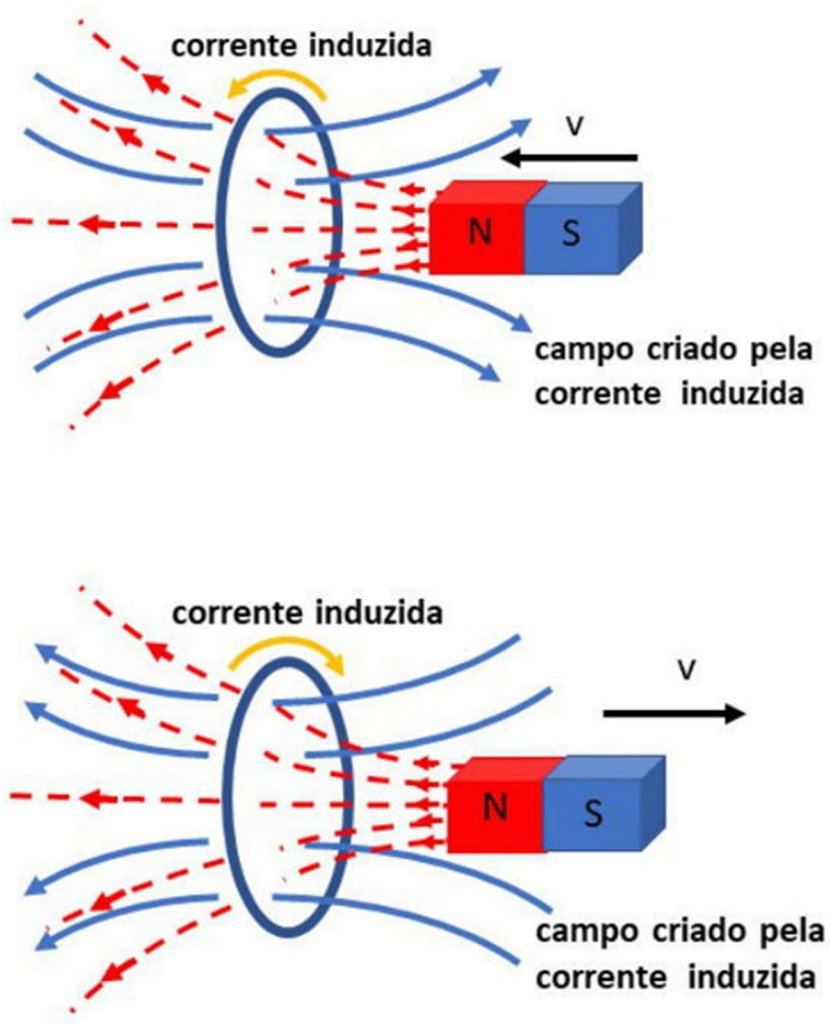
Onde:

- $\mathcal{E}$ é a força eletromotriz induzida, (fem) (V)
- $\Delta\phi$ é a variação do fluxo magnético (Wb)
- Δt são o intervalo de tempo (s)

2.1.4 Lei de Lenz

A Lei de Lenz afirma que a corrente induzida em um circuito fechado aparece com uma orientação tal que o campo magnético que ela gera se opõe à variação do fluxo magnético que a originou. Em outras palavras, a natureza “resiste” à mudança do fluxo magnético, isso é a razão física do sinal negativo na Lei de Faraday. (ASTH, 2025)

Figura 6 - Movimento de um ímã próximo de uma espira.



Fonte: Toda Matéria (2025)

Ou seja, se o fluxo magnético através de uma espira está aumentando para dentro, a corrente induzida criará um campo que aponta para fora, tentando diminuir esse aumento; se o fluxo está diminuindo, a corrente induzida cria um campo que aponta para dentro, tentando compensar a redução.

2.2 Transformador

Um transformador é um aparelho que altera os níveis de tensão de um sinal em corrente alternada (CA) sem modificar sua frequência, podendo tanto elevar quanto reduzir a tensão conforme a necessidade.

Sua estrutura básica é formada por duas ou mais bobinas isoladas entre si, enroladas em torno de um núcleo ferromagnético. Essas bobinas não têm ligação elétrica direta; a transferência de energia entre elas ocorre exclusivamente pelo fluxo magnético que se estabelece no núcleo (CHAPMAN, 2013).

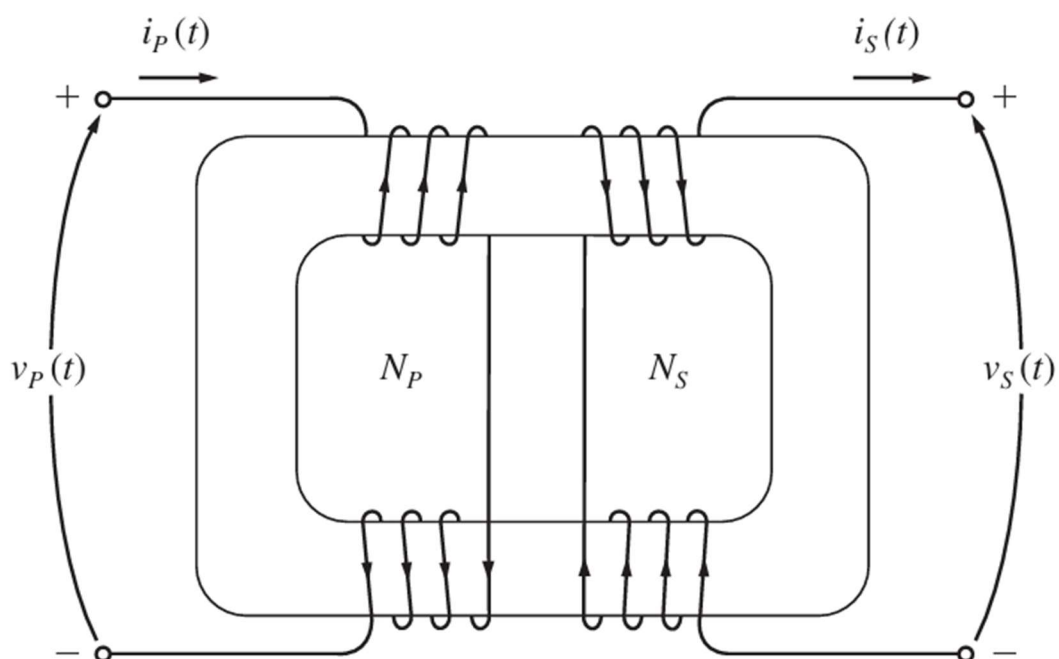
2.2.1 Núcleo

O núcleo do transformador é composto por um material ferromagnético de alta permeabilidade normalmente lâminas de aço-silício onde circula o fluxo magnético. Essas lâminas são finas para reduzir as perdas por correntes de Foucault já que a laminação limita a circulação dessas correntes parasitas (UMANS, 2014).

A construção do núcleo geralmente segue duas configurações principais: núcleo envolvido e núcleo envolvente.

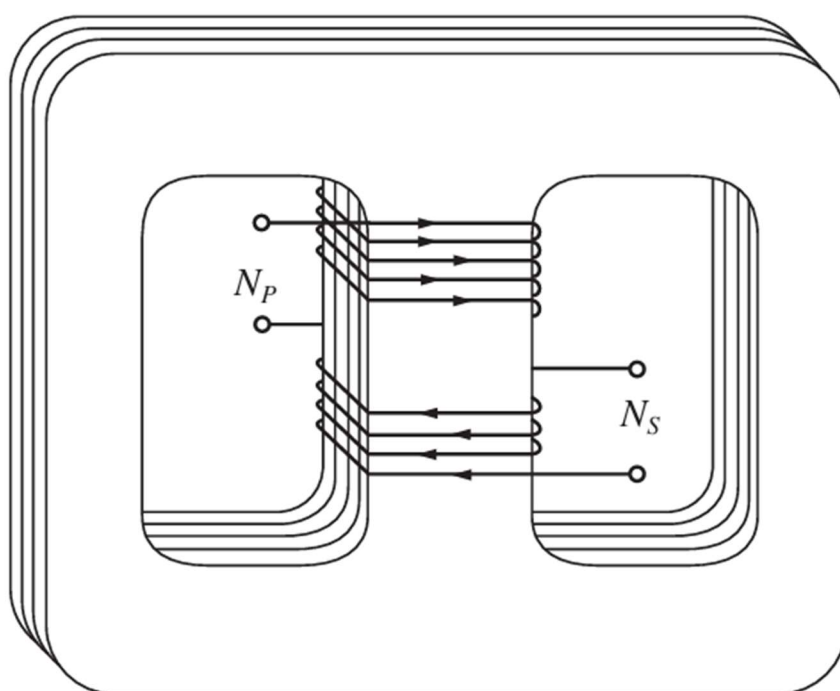
- **Núcleo envolvido:** cada coluna do núcleo é rodeada pelas bobinas dos enrolamentos.
- **Núcleo envolvente:** as bobinas envolvem a coluna central do núcleo.

Figura 7 - Transformador com núcleo envolvido.



Fonte: Chapman (2013).

Figura 8 - Transformador com núcleo envolvente.



Fonte: Chapman (2013).

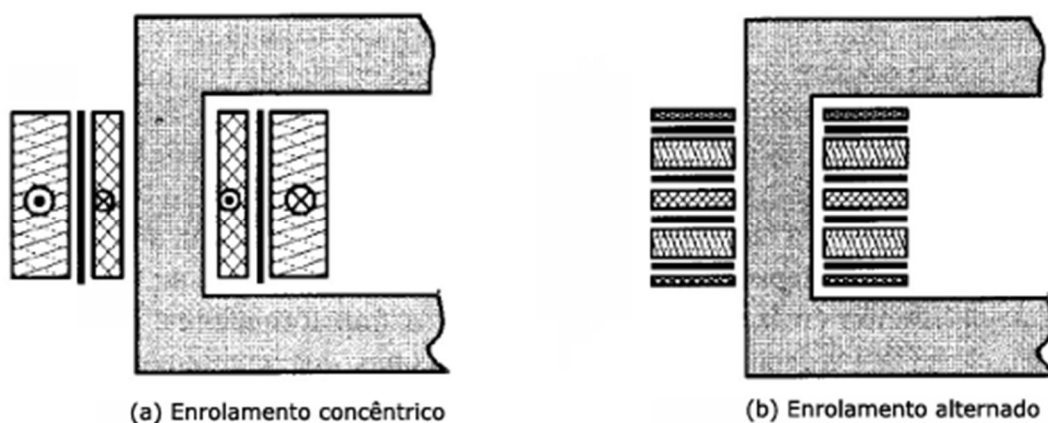
2.2.2 Enrolamentos

Os enrolamentos dos transformadores podem ser feitos com condutores de cobre ou alumínio. Após completar o número necessário de espiras, aplica-se uma camada de isolamento para evitar curtos-circuitos, que pode ser de verniz, fibra de algodão ou papel isolante. Esses enrolamentos podem ter formato cilíndrico ou retangular, sendo constituídos por um número específico de voltas em torno do núcleo do transformador (MORA, 2008).

Segundo o mesmo autor, os enrolamentos podem ser classificados em dois tipos: concêntricos e alternados.

- **Enrolamentos concêntricos:** as bobinas são dispostas em formato cilíndrico, uma dentro da outra, separadas por material isolante.
- **Enrolamentos alternados:** as bobinas são divididas em seções que se intercalam ao longo da coluna do núcleo.

Figura 9 - Transformador com enrolamento tipo concêntrico e alternado.

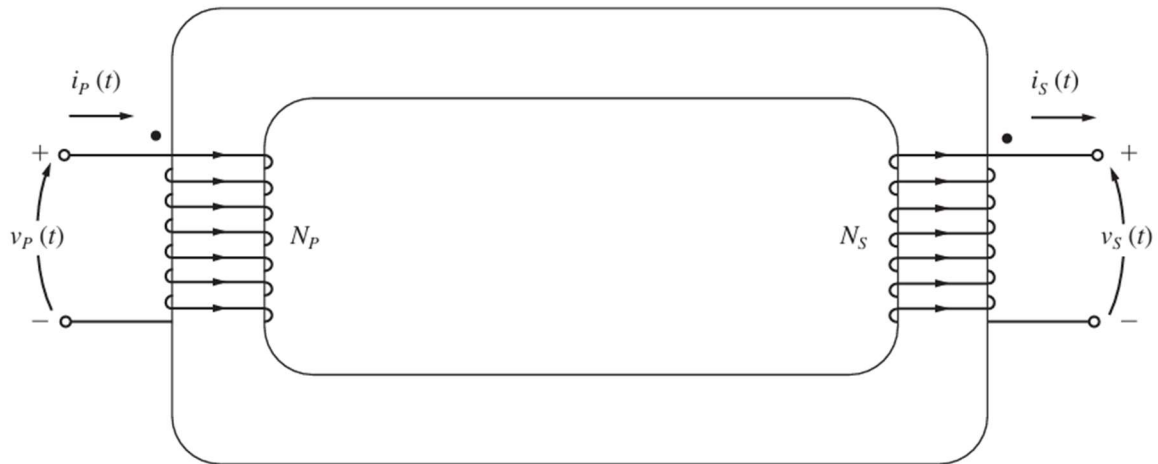


Fonte: Mora (2008)

2.2.3 Transformador Ideal

Um transformador ideal é um equipamento sem perdas, com um enrolamento de entrada e outro de saída. As relações entre tensão e corrente nos dois lados podem ser expressas por equações simples (CHAPMAN, 2013).

Figura 10 - Desenho esquemático de um transformador ideal.



Fonte: Chapman (2013).

No transformador da figura anterior (figura 10), o primário possui N_p espiras e o secundário N_s espiras. A tensão aplicada no primário $v_p(t)$ e a tensão obtida no secundário $v_s(t)$ estão relacionadas pela proporção do número de espiras:

Equação 3 - Relação entre tensões e número de espiras do transformador ideal

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3)$$

a é a relação de espiras ou de transformação do transformador.

Equação 4 - Relação de transformação do transformador ideal

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (4)$$

A corrente no primário $i_p(t)$ e no secundário $i_s(t)$ se relacionam inversamente à relação de espiras:

Equação 5 - Relação de correntes no transformador ideal

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{I}{a} \quad (5)$$

Chapman (2013) Explica que em um transformador ideal, o ângulo θ entre a tensão e a corrente do secundário se mantém igual, porque o transformador não altera o fator de potência. Assim, primário e secundário compartilham o mesmo fator de potência.

Além disso, a potência que entra pelo primário é exatamente a mesma que sai pelo secundário, podendo essa igualdade ser confirmada diretamente pelas equações de tensão e corrente do transformador.

Equação 6 - Potência ativa do transformador Ideal

$$P_{\text{entrada}} = V_p I_p \cos \theta = P_{\text{saída}} \quad (6)$$

O mesmo vale para a potência reativa Q (equação 7) e a potência aparente S (equação 8), ambas permanecem iguais entre primário e secundário em um transformador ideal.

Equação 7 - Potência reativa do transformador Ideal

$$Q_{\text{entrada}} = V_p I_p \sin \theta = V_s I_s \sin \theta = Q_{\text{saída}} \quad (7)$$

Equação 8 - Potência aparente do transformador Ideal

$$S_{\text{entrada}} = V_p I_p = V_s I_s = S_{\text{saída}} \quad (8)$$

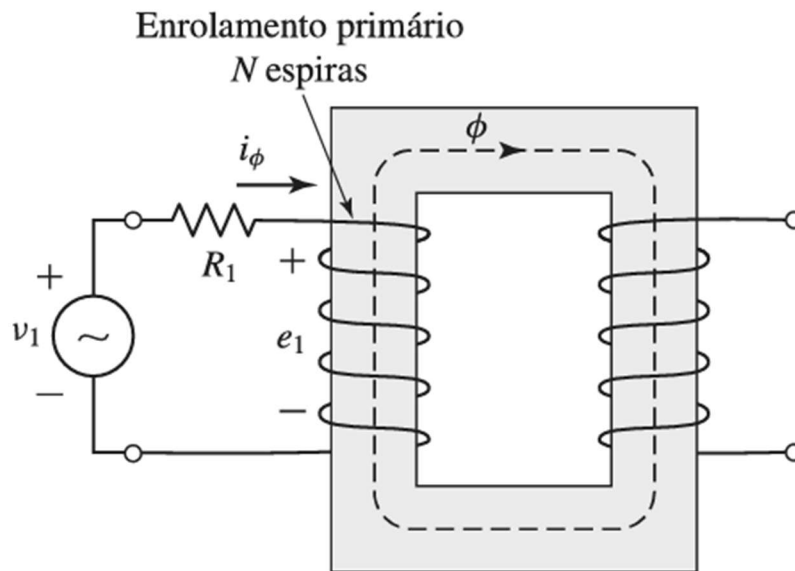
2.2.4 Transformador Real

Na prática, os transformadores ideais apresentados anteriormente não existem, pois não é possível construir um dispositivo totalmente livre de perdas. O que se consegue fabricar são transformadores reais, compostos por duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético.

As características de um transformador real se aproximam das de um transformador ideal, mas apenas até certo ponto. Para entender seu funcionamento,

podemos nos basear na figura a seguir, que mostra um transformador com duas bobinas de fio enroladas ao redor de um núcleo. O primário está ligado a uma fonte de corrente alternada, enquanto o secundário se encontra em circuito aberto.

Figura 11 - Diagrama de um transformador real com o secundário sem carga.



Fonte: Umans (2014).

Segundo Chapman (2013), a lei de Faraday pode ser representada pela equação (9) a seguir.

Equação 9 - Lei de Faraday da Indução Eletromagnética

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (9)$$

Nessa expressão, e_{ind} representa a tensão induzida e λ corresponde ao fluxo concatenado que atravessa a espira. O fluxo total que percorre o conjunto é a soma dos fluxos individuais de cada espira, conforme apresentado na equação (10).

Equação 10 - Definição de fluxo concatenado

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \Phi_i \quad (10)$$

O fluxo de cada espira é Φi . Como esse valor varia entre as N espiras, utiliza-se o fluxo médio por espira, dado pela equação (11)

Equação 11 - Fluxo magnético médio por espira

$$\bar{\Phi} = \frac{\lambda}{N} \quad (11)$$

Portanto, a lei de Faraday pode ser escrita como na equação (12) logo abaixo:

Equação 12 - Lei de Faraday reescrita

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\Phi}}{dt} \quad (12)$$

Ao aplicar uma tensão alternada $V_1(t)$ no primário, o fluxo magnético médio do enrolamento $\bar{\Phi}_p$ varia diretamente com $V_1(t)$ e inversamente com o número de espiras N_p conforme expressa a equação (13).

Equação 13 - Fluxo magnético médio no primário em função da tensão aplicada

$$\bar{\Phi}_p = \frac{1}{N_p} \int V_1(t) dt \quad (13)$$

O fluxo médio no primário pode ser decomposto em duas componentes: o fluxo mútuo ϕ_m e o fluxo de dispersão do primário ϕ_{Dp} . ϕ_m é o fluxo que percorre o núcleo, atravessa a bobina secundária e retorna ao primário; ϕ_p corresponde às linhas de fluxo que se dispersam fora do núcleo e não acoplam ao secundário.

Portanto, o fluxo médio do primário é dado por:

Equação 14 - Decomposição do fluxo magnético do lado primário

$$\phi_P = \phi_m + \phi_{Dp} \quad (14)$$

De modo análogo, no secundário o fluxo médio também se divide em fluxo mútuo e fluxo de dispersão secundário:

Equação 15 - Decomposição do fluxo magnético do lado secundário

$$\phi_s = \phi_m + \phi_{Ds} \quad (15)$$

Reescrevendo a lei de Faraday incluindo o fluxo de dispersão, a tensão induzida no primário fica:

Equação 16 - Lei de Faraday aplicada ao primário com fluxo mútuo e fluxo de dispersão

$$v_1(t) = N_P \frac{d\phi_m}{dt} + N_P \frac{d\phi_{DP}}{dt} \quad (16)$$

Se o transformador for corretamente projetado com núcleo de alta permeabilidade magnética e operando abaixo da saturação o fluxo de dispersão torna-se desprezível frente ao fluxo mútuo. Assim, a tensão induzida no primário simplifica-se para:

Equação 17 - Tensão induzida no primário considerando apenas o fluxo mútuo

$$v_1(t) = N_P \frac{d\phi_m}{dt} \quad (17)$$

De forma análoga, no secundário a tensão induzida é:

Equação 18 - Tensão induzida no secundário considerando apenas o fluxo mútuo

$$v_2(t) = N_s \frac{d\phi_m}{dt} \quad (18)$$

Com as equações anteriores (17) e (18) é possível chegar à relação de transformação:

Equação 19 - Relação de tensões e número de espiras

$$\frac{V_P}{V_S}(t) = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (19)$$

2.3 Perdas

Umans (2014) menciona que no transformador real ocorrem perdas inevitáveis que não aparecem no modelo ideal e que reduzem sua eficiência. Essas perdas provêm, basicamente, da parte magnética do núcleo onde a variação do fluxo causa dissipação por fenômenos intrínsecos ao material e dos enrolamentos onde a passagem de corrente junto à resistência do fio gera aquecimento.

2.3.1 Perda no Núcleo

As perdas no núcleo, também conhecidas como perdas no ferro, são originadas por dois fenômenos principais: as correntes parasitas (ou correntes de Foucault) e a histerese magnética. Essas perdas representam a energia dissipada no material do núcleo durante o funcionamento do transformador (UMANS, 2014).

De forma geral, essas perdas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- **Perdas por correntes parasitas:** acontecem quando uma massa metálica é submetida à variação de fluxo magnético, o que induz correntes intensas em seu interior. Essas correntes circulam dentro do próprio material, opondo-se ao fluxo magnético principal e gerando perda de potência. Para minimizar esse efeito, o núcleo do transformador é construído com lâminas finas de material ferromagnético, isoladas entre si, o que reduz significativamente a circulação dessas correntes.
- **Perdas por histerese:** ocorrem sempre que o material ferromagnético percorre o ciclo de magnetização; parte da energia é consumida no realinhamento dos momentos magnéticos. Essas perdas diminuem ao empregar núcleos de alta permeabilidade.

As perdas no núcleo (perdas no ferro) são expressas por:

Equação 20 - Perdas no ferro (núcleo)

$$P_{fe} = P \cdot W_{tfe} \quad (20)$$

Onde W_{tfe} é o peso (massa) do núcleo em kg e P é a perda específica em W/kg.

A perda por unidade de massa é dada por:

Equação 21 - Lei de Steinmetz para perdas por histerese em materiais ferromagnéticos

$$P = K \cdot f^m \cdot B_m^N \quad (21)$$

K, M e N são coeficientes que dependem do material do núcleo

2.3.2 Perdas no Cobre

Perdas no cobre ocorrem nos enrolamentos pelo aquecimento resistivo e são proporcionais ao quadrado da corrente. Assim, as perdas no cobre em watts podem ser escritas por:

Equação 22 - Perdas no cobre (enrolamento)

$$P_{cu} = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S_c} \quad (22)$$

Onde ρ é a resistividade do cobre ($\Omega \cdot m$), l o comprimento do condutor (m), I a corrente (A) e S_c a área da seção transversal (m^2). As perdas no cobre permitem determinar a regulação de tensão do transformador, expressa em percentual pela equação (23).

Equação 23 - Relação entre perdas no cobre e potência útil entregue à carga

$$a = \frac{P_{cu}}{P_{saída}} (\%) \quad (23)$$

Em que $P_{saída}$ representa a potência total de saída do transformador.

2.3 Rendimento

O rendimento de um transformador representa a relação entre a potência útil entregue na saída e a potência total fornecida na entrada. Ele indica o quão eficientemente o equipamento converte energia elétrica, considerando as perdas inevitáveis que ocorrem em seu funcionamento. Quanto menores forem essas perdas, maior será o rendimento do transformador (CHAPMAN, 2013).

O rendimento do transformador é expresso pela equação:

Equação 24 - Cálculo do rendimento considerando todas as perdas

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{soma}} \times 100\% \quad (24)$$

Onde η representa o rendimento, $P_{saída}$ é a potência de saída e P_{soma} corresponde à soma das perdas no ferro e no cobre do transformador.

2.4 Circuito Equivalente de um Transformador

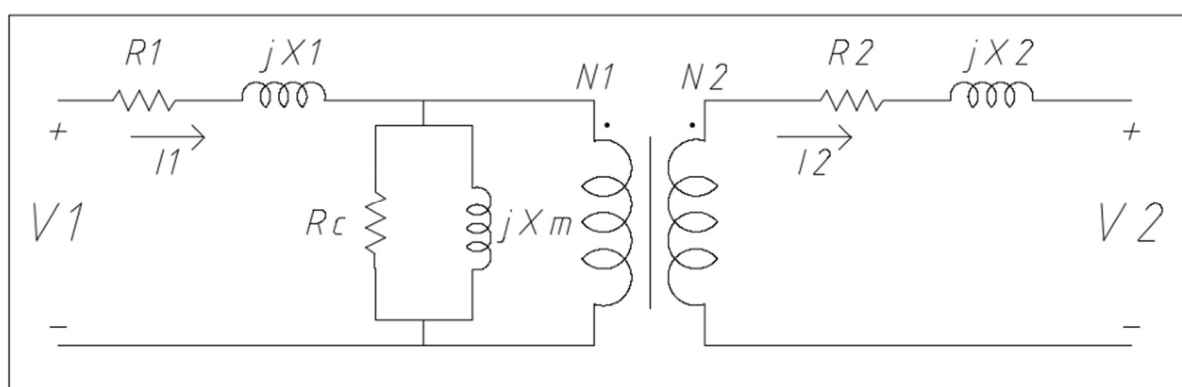
O circuito equivalente do transformador monofásico é uma representação elétrica que traduz as perdas e comportamentos físicos em elementos simples (resistências e reatâncias). Com esse modelo consegue-se calcular regulação de tensão, rendimento e interpretar ensaios de bancada em vazio e em curto circuito (CHAPMAN, 2013).

Os principais elementos que devem ser considerados na construção desse modelo incluem:

- **Perdas no cobre:** resultam do aquecimento resistivo nos enrolamentos primário e secundário e são representadas por resistências em série (R_1 e R_2) nos respectivos enrolamentos.
- **Perdas por correntes parasitas:** causadas pelo aquecimento resistivo no núcleo do transformador, são modeladas por uma resistência (R_c) em paralelo com o enrolamento.

- **Perdas por histerese:** ocorrem devido ao tempo necessário para que os domínios magnéticos se reorganizem a cada semiciclo da corrente alternada e são representadas por uma indutância (jX_m) em paralelo com o enrolamento.
- **Fluxo de dispersão:** é a parte do fluxo magnético que não percorre totalmente o núcleo, passando apenas por um dos enrolamentos, gerando indutâncias indesejadas (jX_1 e jX_2) em série com cada enrolamento.

Figura 12 - Circuitos equivalentes do transformador monofásico.



Fonte: Pereira & Herrera (2021).

2.5 Ensaios em Transformadores

Para caracterizar adequadamente o comportamento de um transformador real, é essencial realizar dois ensaios fundamentais: o ensaio a vazio e o ensaio de curto-circuito. Esses testes permitem determinar os parâmetros elétricos necessários para a construção do circuito equivalente, fundamental para análises de desempenho e eficiência (CHAPMAN, 2013).

No ensaio a vazio, aplica-se uma tensão no primário com o secundário aberto (ou vice-versa) e medem-se a corrente e a potência com amperímetro e wattímetro. Já no ensaio de curto-circuito, aplica-se uma tensão no primário com o secundário em curto (ou vice-versa) e também se registram a corrente e a potência.

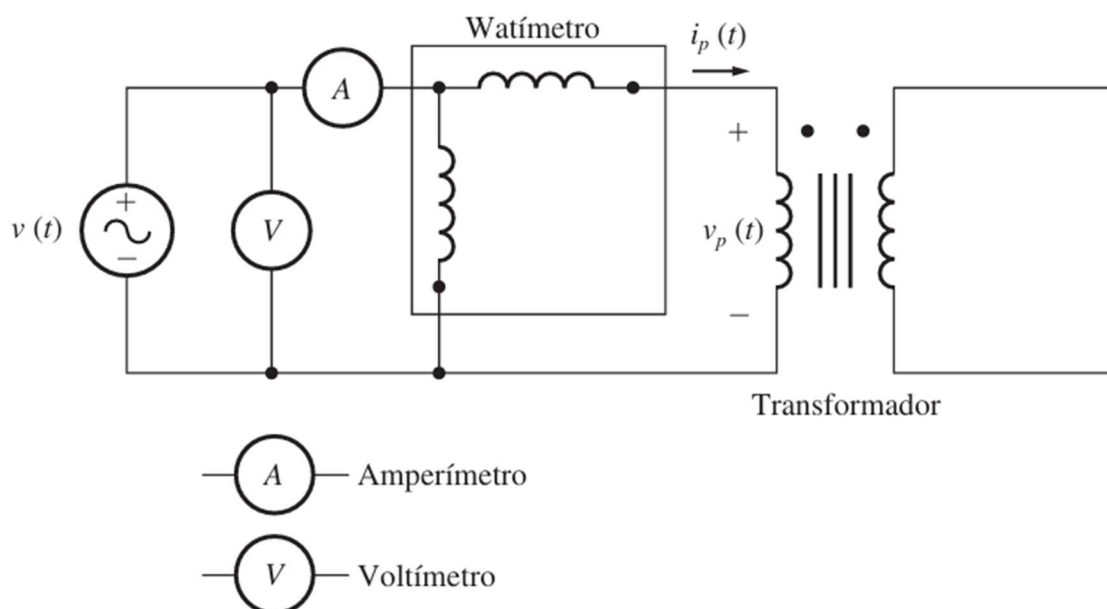
A partir desses ensaios, obtêm-se as grandezas necessárias para caracterizar o transformador:

- V_{ca} : tensão aplicada no ensaio a vazio.
- I_{ca} : corrente medida no ensaio a vazio.
- P_{ca} : potência medida no ensaio a vazio.
- V_{cc} : tensão aplicada no ensaio de curto-circuito.
- I_{cc} : corrente medida no ensaio de curto-circuito.
- P_{cc} : potência medida no ensaio de curto-circuito.

2.5.1 Ensaio em Vazio

No ensaio a vazio, um dos enrolamentos do transformador é deixado em circuito aberto, enquanto o outro é alimentado com a tensão nominal. Nessas condições, a corrente de entrada é predominantemente composta pela corrente de magnetização, que é pequena em comparação com a corrente de plena carga. Portanto, as perdas nos enrolamentos são mínimas, e a maior parte da potência fornecida é consumida pelas perdas no núcleo (CHAPMAN, 2013).

Figura 13 - Esquema de ligação para o ensaio de transformador em vazio.



Fonte: Chapman (2013).

O valor de R_c é obtido por:

Equação 25 - Resistência equivalente de perdas no núcleo

$$R_c = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad (25)$$

A impedância z_φ é calculada por:

Equação 26 - Impedância de magnetização do transformador

$$|z_\varphi| = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} \quad (26)$$

Com R_c e z_φ , determina-se a reatância magnetizante X_m .

Equação 27 - Reatância de magnetização do transformador

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{z_\varphi}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_c}\right)^2}} \quad (27)$$

A perda do núcleo é dada por:

Equação 28 - Potência dissipada no núcleo (ferro)

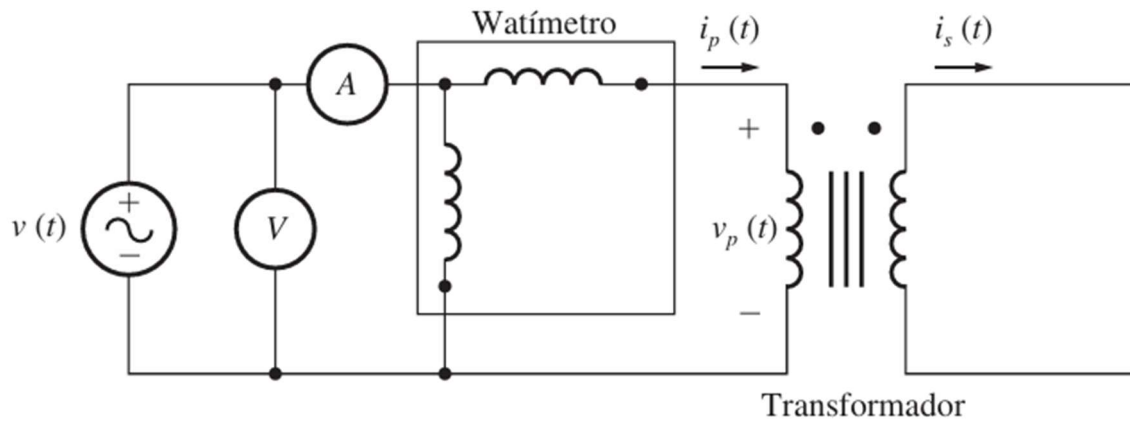
$$P_{Nucleo} = \frac{V_{ca}^2}{R_c} \quad (28)$$

2.5.2 Ensaio em Curto Circuito

No ensaio em curto-circuito, os terminais de baixa tensão do transformador são colocados em curto, e os terminais de alta tensão são conectados a uma fonte de tensão variável. A tensão é ajustada até que a corrente no enrolamento em curto-circuito atinja seu valor nominal. Nessas condições, a corrente de excitação é

desprezível, e a maior parte da tensão aplicada é consumida pelas perdas nos enrolamentos, permitindo a determinação das impedâncias de série do transformador (CHAPMAN, 2013).

Figura 14 - Esquema de ligação para o ensaio de transformador em vazio.



Fonte: Chapman (2013).

A impedância equivalente Z_{eq} é calculada por:

Equação 29 - Impedância equivalente referida ao primário

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (29)$$

A resistência equivalente R_{eq} é obtida por:

Equação 30 - Resistência equivalente do transformador referida ao primário

$$R_{eq} = R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (30)$$

A indutância equivalente X_{eq} é determinada a partir de Z_{eq} e R_{eq} (ou Z_{cc} e R_{cc}).

Equação 31 - Reatância equivalente do transformador referida ao primário

$$X_{eq} = \sqrt{|Z_{cc}|^2 - R_{cc}^2} \quad (31)$$

A perca do cobre é dada por:

Equação 32 - Potência dissipada no cobre (enrolamento)

$$P_{cobre} = I_{cc}^2 \cdot R_{eq} \quad (32)$$

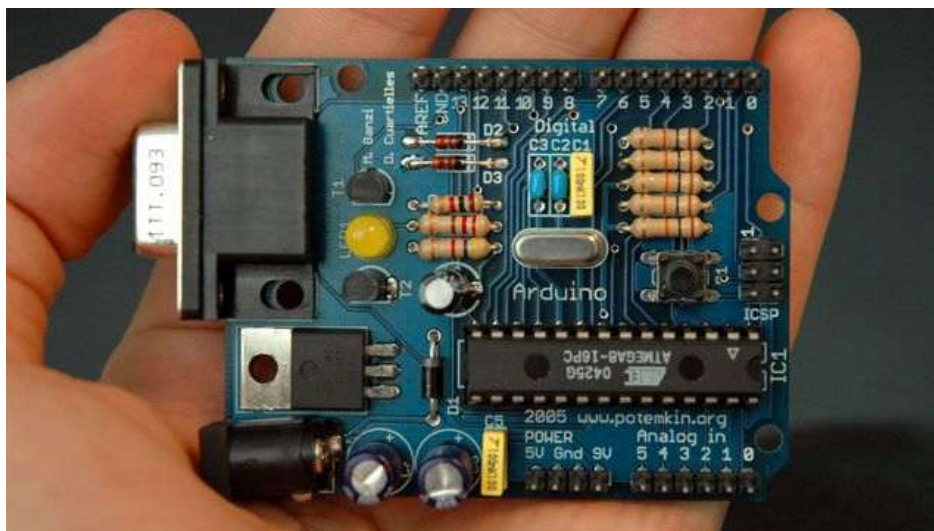
2.6 Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto criada para tornar a eletrônica e a programação mais acessíveis a estudantes, pesquisadores e makers. Desenvolvido em 2005 em Ivrea (Itália) por um grupo liderado por Massimo Banzi e David Cuartielles como parte de um projeto educativo do Instituto de Design Interativo, o Arduino nasceu da necessidade de oferecer uma ferramenta prática, de baixo custo e de fácil aprendizado para ensino de sistemas embarcados e automação.

Macedo (2025) aponta que tecnicamente, a plataforma consiste em placas com microcontroladores que podem ser programadas para ler sensores e controlar atuadores, servindo de ponte entre o mundo físico e o software. A linguagem usada no desenvolvimento é baseada em C/C++, o que permite que iniciantes comecem rapidamente e, ao mesmo tempo, que projetos mais complexos sejam implementados conforme o avanço do usuário.

Outro ponto chave é o Arduino IDE (Integrated Development Environment), o ambiente oficial que integra escrita, compilação e gravação do código na placa. Essa integração simplificada foi essencial para a rápida difusão da plataforma em ambientes acadêmicos e em projetos experimentais.

Figura 15 - Imagem de uma placa Arduino



Fonte: Canaltech (2025).

2.6.1 Placa Arduino Mega 2560

O Arduino Mega 2560 é uma das placas mais completas da família Arduino, muito utilizada em projetos que exigem maior capacidade de processamento e número de entradas e saídas. Seu componente central é o microcontrolador ATmega2560, responsável por executar o programa gravado e gerenciar as interfaces da placa.

Em termos de hardware, o Mega 2560 oferece 54 pinos digitais configuráveis como entrada ou saída, dos quais 15 podem ser utilizados como saídas PWM, além de 16 entradas analógicas para leitura de sinais de sensores. A placa também dispõe de pinos de alimentação (5 V e 3,3 V), um pino AREF para referência analógica e uma entrada para alimentação externa (tensão recomendada entre 7 e 12 V), permitindo que seja alimentada tanto via USB quanto por fonte independente.

A comunicação e o upload de código são realizados pela porta USB, utilizando o conversor ATmega16U2 para intermediar a troca de dados entre o computador e o ATmega2560. Essa configuração possibilita também o monitoramento serial em tempo real enquanto a placa está alimentada via USB. A integração entre hardware e software torna o desenvolvimento mais prático, especialmente em projetos complexos que demandam múltiplos sensores, módulos e atuadores.

Figura 16 - Placa Arduino Mega 2560



Fonte: Saravati (2025).

2.6.2 Ambiente de Desenvolvimento Arduino IDE

O Arduino IDE (Integrated Development Environment) é o ambiente oficial para escrever, compilar e carregar programas nas placas Arduino. Foi pensado para simplificar a programação, tornando o desenvolvimento de projetos eletrônicos acessível tanto para quem está começando quanto para quem já tem experiência.

A interface é um editor de código onde se escreve o sketch, botões para verificação (compilação) e upload, uma área de mensagens que mostra o status da compilação e erros, e o Monitor Serial, uma janela que permite ler em tempo real os dados enviados pela placa durante a execução do programa.

O fluxo de trabalho é simples e didático, escreve-se o código em uma linguagem baseada em C/C++; a IDE compila esse código transformando-o em instruções para o microcontrolador; e, por fim, ao fazer o upload via USB o programa é gravado na memória da placa e passa a rodar no hardware (MACEDO 2025).

Figura 17 - Exemplo de uma interface IDE



Fonte: Oku Electronics (2025).

2.6.3 Linguagem de Programação C/C++

O Arduino emprega uma versão simplificada de C/C++, feita para facilitar o desenvolvimento embarcado. Essa escolha traz o poder e a difusão das linguagens usadas na engenharia, porém reduz a complexidade típica dos ambientes profissionais, tornando a programação mais acessível para projetos práticos.

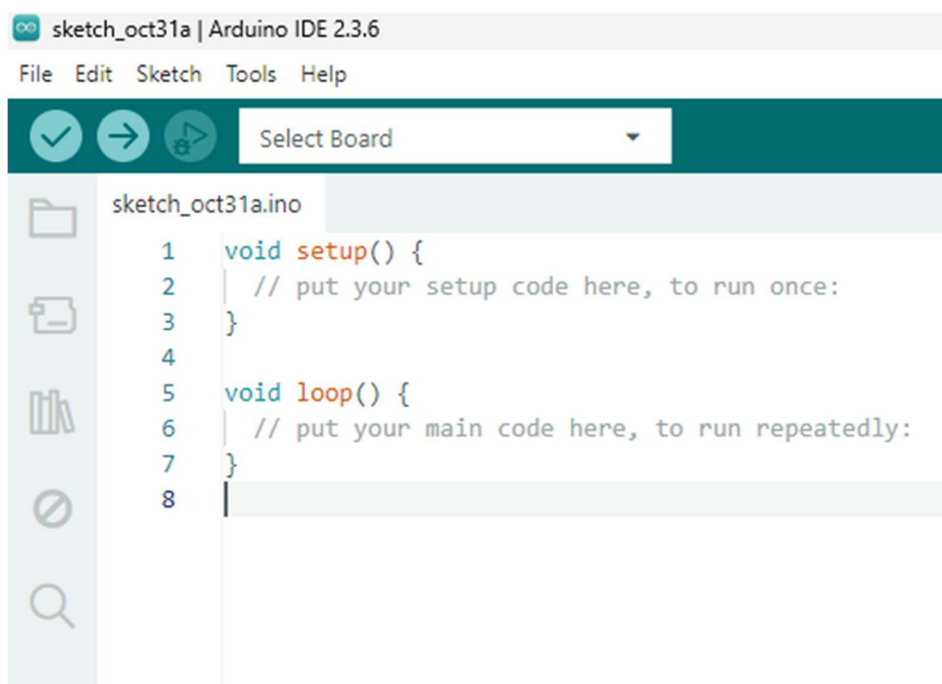
A principal característica dessa linguagem no Arduino é o uso de bibliotecas (libraries), que são conjuntos de funções prontas que simplificam tarefas comuns, como leitura de sensores, controle de displays, comunicação serial ou uso de protocolos como I²C e SPI. o I²C, que permite a comunicação serial entre vários dispositivos usando apenas dois fios, e o SPI, que possibilita a troca de dados em alta velocidade por meio de múltiplos fios entre o microcontrolador e seus periféricos.

Essas bibliotecas economizam tempo de programação e reduzem a chance de erros, permitindo que o foco do desenvolvedor esteja no comportamento do projeto e não nos detalhes técnicos da codificação (MACEDO 2025).

A estrutura básica de um código Arduino é composta por duas funções principais:

- **Setup** - é executada apenas uma vez, logo após a inicialização da placa, e serve para configurar pinos, iniciar comunicações ou definir parâmetros iniciais.
- **Loop** - roda continuamente enquanto o Arduino está ligado, sendo responsável pela execução repetitiva das ações do programa como leitura de sensores, cálculos e exibição dos resultados.

Figura 18 - Funções setup e loop



Fonte: Própria Autoria (2025)

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do protótipo envolveu a integração entre hardware, software e os procedimentos necessários para automatizar os ensaios em transformadores monofásicos. Nesta etapa, descreve-se como o dispositivo foi idealizado, construído e preparado para uso em ambiente didático, sempre com foco em simplicidade, segurança e eficiência.

Este capítulo apresenta, de forma objetiva, os principais elementos do projeto: a descrição do protótipo, explicando o que ele é e qual problema busca resolver; os componentes utilizados, incluindo seus custos e a justificativa de uso; a arquitetura e o desenvolvimento do software, que estruturam o funcionamento lógico do sistema; e, por fim, a montagem do protótipo, detalhando como os elementos físicos foram organizados e integrados.

3.1 Descrição do protótipo

O protótipo desenvolvido consiste em um dispositivo microcontrolado baseado no Arduino Mega 2560, projetado para auxiliar na realização dos ensaios tradicionais de transformadores monofásicos: ensaio em vazio, ensaio de curto-circuito e ensaio em carga. Ele foi construído dentro de uma estrutura compacta, abrigando dois wattímetros digitais capazes de medir simultaneamente tensão, corrente, potência e fator de potência, além de um display LCD e um teclado matricial que formam a interface direta com o usuário.

O funcionamento do dispositivo foi pensado para seguir o mesmo raciocínio utilizado nos laboratórios didáticos. Ao ser ligado, o protótipo exibe uma tela inicial e solicita ao usuário os parâmetros básicos do transformador a ser ensaiado, como potência aparente e tensões nominais do primário e do secundário. Após inserir essas informações, o sistema realiza automaticamente os primeiros cálculos essenciais, como a relação de espiras e as correntes nominais em cada enrolamento. Esses dados servem de base para os ensaios subsequentes.

A lógica de uso envolve a interação direta do aluno com o circuito físico do transformador. O protótipo não realiza a comutação elétrica; ele orienta o estudante sobre qual montagem deve ser feita e aguarda a confirmação para iniciar as medições. Em cada etapa o usuário prepara o circuito correspondente, e o dispositivo apenas

passa a registrar os valores de tensão, corrente, potência e fator de potência quando recebe o comando para prosseguir. Ao final de cada ensaio, o Arduino processa e grava internamente a média das medições coletadas.

Após a conclusão das três etapas, o protótipo utiliza os dados obtidos para calcular automaticamente o rendimento do transformador e estimar seus parâmetros internos, como resistências, reatâncias, perdas no ferro e perdas no cobre.

3.2 Componentes utilizados

Para a construção do protótipo, foi selecionado um conjunto de componentes que atendesse tanto às necessidades de medição dos ensaios quanto às exigências de processamento e interface com o usuário. O elemento central do sistema é o Arduino Mega 2560, escolhido por oferecer um número elevado de entradas e saídas digitais, permitindo a integração simultânea dos dois wattímetros, do teclado matricial e do display LCD. A capacidade adicional de memória do Mega também foi fundamental para armazenar as medições realizadas durante os ensaios e executar os cálculos internos de rendimento e parâmetros equivalentes do transformador.

Figura 19 - Arduino Mega 2560 R3 ATmega2560

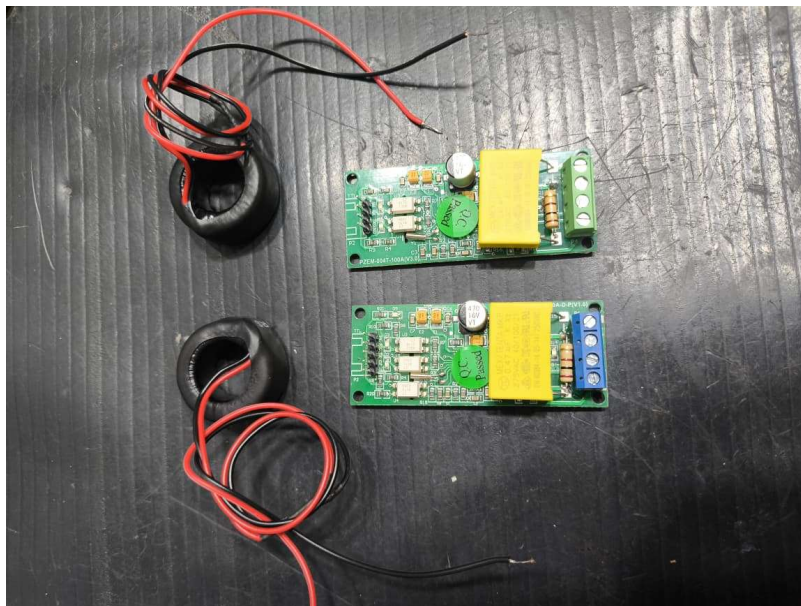


Fonte: Própria Autoria (2025)

Os dois wattímetros digitais desempenham um papel essencial no funcionamento do protótipo, pois são responsáveis pela coleta dos quatro principais parâmetros elétricos utilizados em cada etapa do ensaio: tensão, corrente, potência e fator de

potência. As informações medidas por esses módulos são enviadas diretamente para o Arduino, que processa e armazena os valores médios antes de avançar para a próxima etapa.

Figura 20 – Par de voltímetro amperímetro PZEM-004T



Fonte: Própria Aatoria (2025)

A interface com o usuário é composta por um display LCD, utilizado para exibir instruções, solicitar os parâmetros do transformador e apresentar os resultados finais, e por um teclado matricial, que permite inserir dados e confirmar a execução de cada etapa do ensaio. Para complementar a interface, foi adicionado um potenciômetro responsável pelo ajuste de brilho do LCD, garantindo boa visualização em diferentes ambientes de laboratório.

Figura 21 - Display LCD



Fonte: Própria Autoria (2025)

Figura 22 - Teclado matricial 12 dígitos

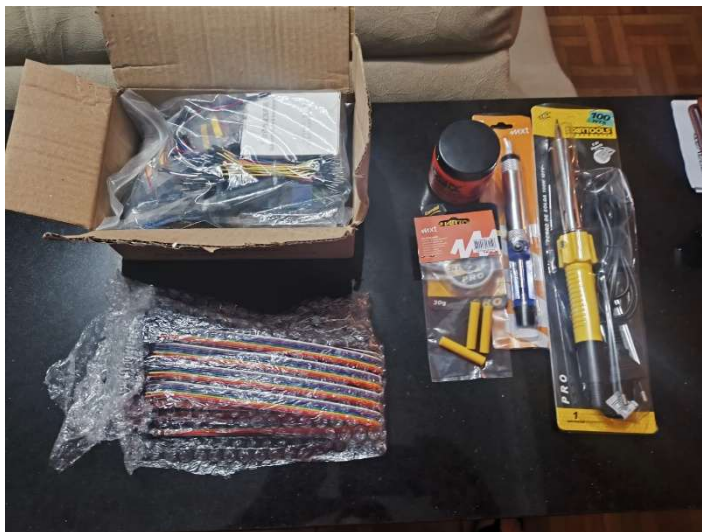


Fonte: Própria Autoria (2025)

Durante a montagem, foram utilizados cabos jumpers para as interligações internas do protótipo, bem como uma protoboard que facilitou a fase inicial de testes antes da soldagem definitiva. Plugs tipo banana foram empregados para conectar o protótipo ao transformador didático, garantindo praticidade e segurança. Também foram utilizados cabos flexíveis de 2,5 mm², adequados para suportar as correntes envolvidas nos ensaios, além de tubos termo retrátil para isolamento das conexões, assegurando maior confiabilidade ao conjunto.

Complementam a lista de materiais os itens de soldagem como: ferro de solda, estanho, pasta e sugador, que foram utilizados para fixar de maneira definitiva as conexões mais críticas.

Figura 23 - Kits e itens complementares



Fonte: Própria Aatoria (2025)

A estrutura física foi finalizada com um case acrílico, cuja função é proteger o Arduino e os demais componentes contra impactos, poeira e eventual manuseio incorreto no ambiente de laboratório.

Figura 24 - Caixa plástica ABS preta



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Embora o protótipo dependa de um computador para programar o Arduino, esse item não foi incluído no cálculo total do custo, uma vez que sua disponibilidade varia entre o uso de equipamentos pessoais ou da instituição de ensino. Da mesma forma, o software Arduino IDE é gratuito e acessível pelo site oficial, não representando custo adicional. A soma dos demais componentes empregados resultou em um investimento aproximado de R\$ 660,37.

Tabela 1 - Lista completa de todos os materiais utilizados no protótipo

Item	Quantidade	Valor unitário	Subtotal	Fornecedor
Software IDE arduino	1	R\$ -	R\$ -	www.arduino.cc
Caixa Plástica ABS 200x120x75MM (Preta)	1	R\$ 39,90	R\$ 39,90	Saravati
Arduino Mega 2560 R3 ATmega2560 ATmega16u2	1	R\$ 184,90	R\$ 184,90	Saravati
Voltímetro Amperímetro PZEM-004T V3.0 100A 260V AC Saída TTL	2	R\$ 139,90	R\$ 279,80	Saravati
Display LCD 1602A Backlight Azul	1	R\$ 21,90	R\$ 21,90	Saravati
Cabos Jumper Premium Macho / Fêmea 40cm 40 vias	2	R\$ 13,90	R\$ 27,80	Saravati
Plug Tipo Banana 4mm JT002 (Vermelho)	4	R\$ 2,32	R\$ 9,28	Saravati
Plug Tipo Banana 4mm JT002 (Preto)	4	R\$ 2,32	R\$ 9,28	Saravati
Teclado Matricial Rígido Karet 4x3 12 Teclas	1	R\$ 24,90	R\$ 24,90	Saravati
Módulo Potenciômetro 10K com Knob	1	R\$ 9,81	R\$ 9,81	Saravati
Fonte Bivolt 100-240V 12V 2A Plug P4	1	R\$ 24,90	R\$ 24,90	Saravati
Tubo Termo Retrátil Espaguete 1,5mm Preto	1 (metro)	R\$ 13,90	R\$ 13,90	Saravati
Cabo flexível 2 5mm vermelho - Sil	2 (metros)	R\$ 3,50	R\$ 7,00	Só Cabos
Cabo flexível 2 5mm Preto - Sil	2 (metros)	R\$ 3,50	R\$ 7,00	Só Cabos
Total	R\$		660,37	

Fonte: Própria Autoria (2025)

3.3 Desenvolvimento do Software

O software desenvolvido para o protótipo foi estruturado de forma a tornar o processo de ensaio totalmente guiado, automatizado e seguro para o usuário. Logo após a inicialização, o Arduino apresenta na tela uma interface simples, indicando que o sistema está pronto para iniciar o procedimento. Em seguida, o programa solicita ao usuário os parâmetros fundamentais do transformador que será ensaiado: potência aparente e tensões nominais de primário e secundário. A partir desses dados, o sistema calcula automaticamente a relação de espiras e as correntes nominais de cada lado do enrolamento, informações essenciais para orientar o aluno durante os ensaios.

Com esses valores iniciais definidos, o software entra no modo de orientação, conduzindo o usuário pelas três etapas experimentais: ensaio em vazio, ensaio em curto-circuito e ensaio em carga. Em cada fase, a lógica do código faz o Arduino aguardar a montagem do circuito, solicitando que o aluno confirme manualmente quando tudo estiver preparado. Somente após essa confirmação o sistema autoriza a leitura dos sensores, garantindo segurança e evitando erros por montagem incorreta.

Durante as medições, o Arduino coleta os dados enviados pelos dois wattímetros e calcula automaticamente a média dos valores recebidos, filtrando pequenas variações para obter resultados mais estáveis. Esses dados brutos são armazenados separadamente para cada etapa do ensaio, formando a base de cálculos utilizada na fase seguinte.

Após concluir as três medições, o software inicia o processamento matemático responsável por extrair todos os parâmetros elétricos característicos do transformador. Com base nos valores obtidos, o programa calcula as perdas no cobre (P_{cu}), as perdas no núcleo (P_{fe}), as resistências equivalentes R_1 e R_2 , as reatâncias X_1 e X_2 , a resistência de magnetização (R_c), a reatância de magnetização (X_m) e a impedância equivalente. Em seguida, é determinado o rendimento final do transformador, considerando as potências de entrada e saída em condição nominal. Após esse processamento, o protótipo passa a exibir no display um menu para cada parâmetro de forma simples, permitindo que o aluno anote com calma todos os valores obtidos para uso posterior em relatórios ou análises complementares.

Por fim, vale destacar que todo o código-fonte do software foi organizado em módulos através da figura abaixo (figura 25), separando funções de leitura, cálculos,

exibição e controle do fluxo do ensaio. Essa estrutura facilita futuras manutenções ou expansões do projeto.

Figura 25 - Fluxograma de funcionamento do software



Fonte: Própria Autoria (2025)

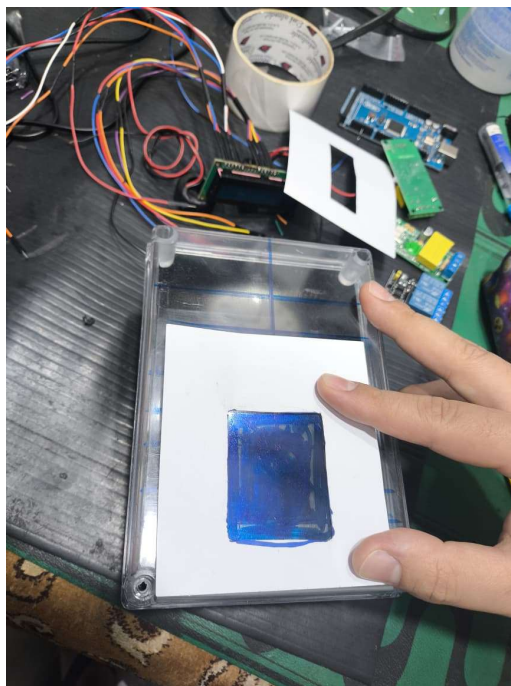
3.4 Montagem física do protótipo

Com todos os testes concluídos e a programação já validada, teve início a etapa de montagem física do dispositivo dentro da caixa acrílica. O processo começou com a organização dos materiais: todos os componentes, ferramentas, parafusos, cabos e módulos foram separados e dispostos na bancada para facilitar o acesso durante a montagem. Essa preparação inicial ajudou a evitar retrabalhos e garantiu um fluxo mais eficiente ao longo das etapas seguintes.

O primeiro passo prático foi trabalhar na tampa superior da caixa. Nessa tampa, seria instalado o teclado e o display LCD, responsáveis pela interface do usuário. Para

isso, foi elaborada uma moldura em acrílico, marcada de acordo com as dimensões exatas de cada componente.

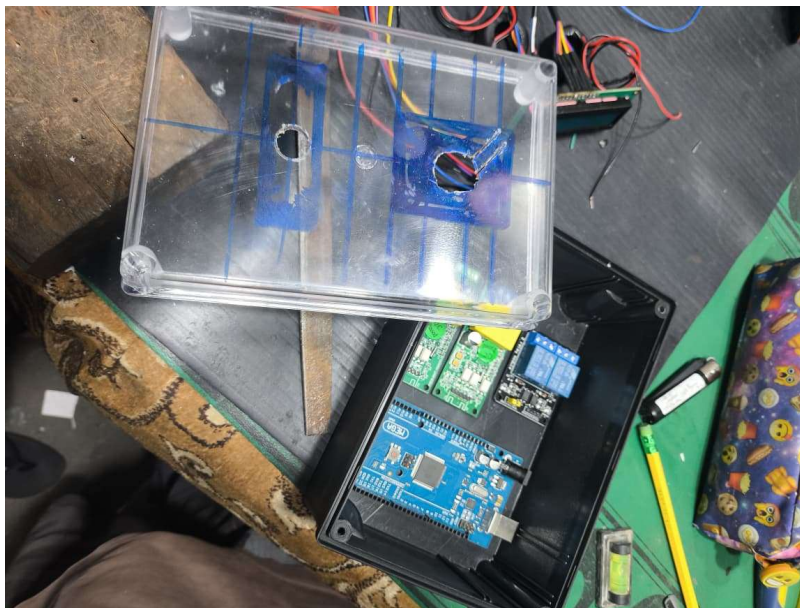
Figura 26 – Desenho do posicionando do teclado e LCD na tampa



Fonte: Própria Autoria (2025)

Em seguida, foram realizados os cortes, ajustes com lixa e a abertura dos furos de fixação, garantindo que tanto o teclado quanto a tela ficassem encaixados com precisão e bem alinhados.

Figura 27 - Recortes iniciais na tampa



Fonte: Própria Aatoria (2025)

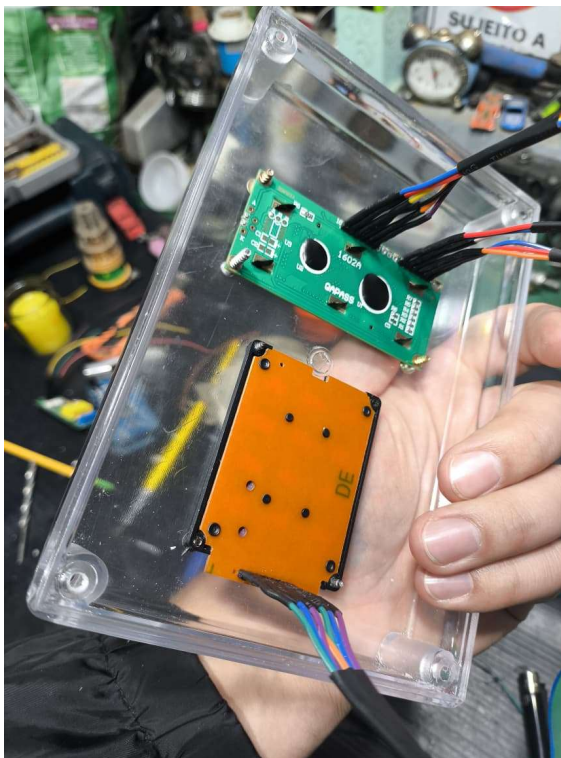
Após preparar a estrutura, os cabos de ambos os módulos foram soldados e protegidos com termo retrátil, prevenindo curtos e deixando o acabamento mais limpo e seguro. Com isso, a tampa da caixa box ficou finalizada e pronta para ser integrada ao restante do sistema.

Figura 28 - Tampa acrílica finalizada (frente)



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Figura 29 - Tampa acrílica finalizada (verso)



Fonte: Própria Autoria (2025)

A etapa seguinte envolveu a base da caixa, onde ficariam os módulos eletrônicos, o Arduino, os wattímetros e a organização interna dos cabos. Antes de qualquer instalação definitiva, foi feito um estudo de distribuição para determinar a melhor disposição de cada componente, considerando espaço para manuseio, soldagem, segurança e facilidade de manutenção. A partir desse planejamento, foi aberto o primeiro furo lateral, destinado à passagem do cabo do Arduino (alimentação e comunicação com o computador), além de reservar espaço para uma futura fonte dedicada.

Figura 30 - Posicionamento do Arduino dentro da caixa I



Fonte: Própria Autoria (2025)

Figura 31 - Posicionamento do Arduino dentro da caixa II

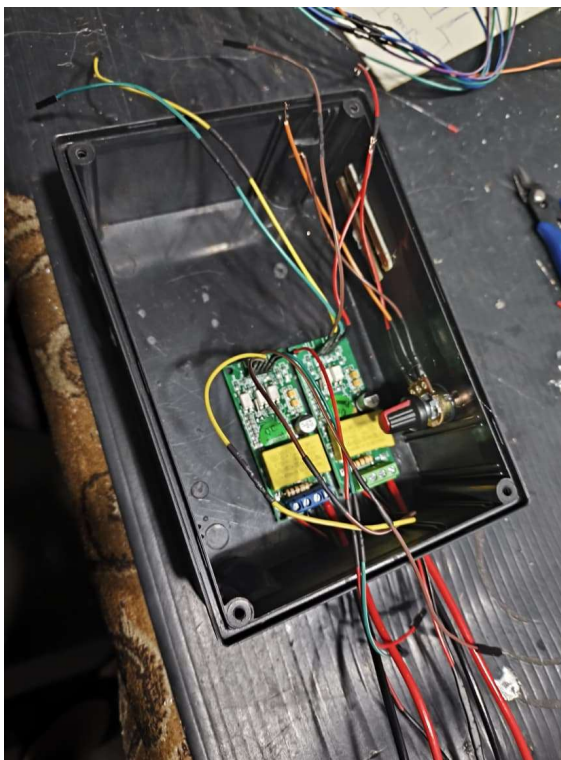


Fonte: Própria Autoria (2025)

Na parte frontal da caixa, foram perfurados dois orifícios que serviriam como saída dos cabos dos wattímetros, um para cada módulo, contemplando tanto o trecho da

toroide quanto o conjunto fase e neutro das medições. Com isso, cada wattímetro pôde receber uma saída individual, organizada e identificada.

Figura 32 - Posicionamento dos wattímetros dentro da caixa



Fonte: Própria Autoria (2025)

Também foi instalado o potenciômetro lateral que controla o brilho da tela. A organização interna seguiu o princípio de deixar o fluxo de cabos o mais limpo possível, evitando cruzamentos desnecessários e mantendo boa acessibilidade.

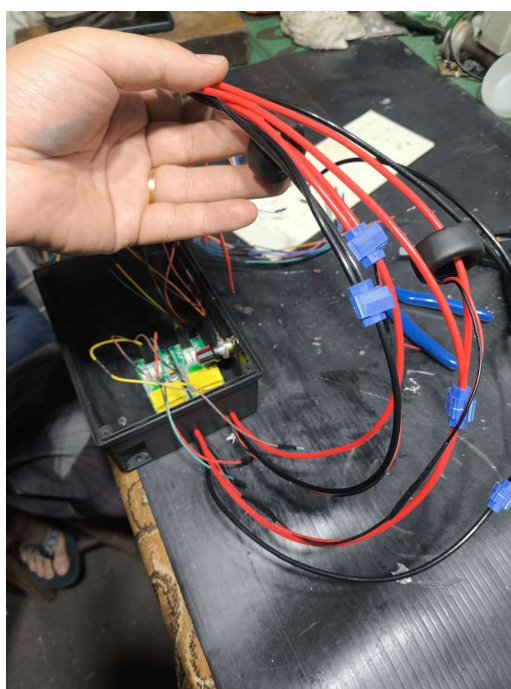
Figura 33 - Posicionamento do potenciômetro dentro da caixa



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Na sequência, foram montadas as garrinhas dos wattímetros, além da instalação de conectores que garantiram melhor estética, firmeza e proteção contra choques elétricos.

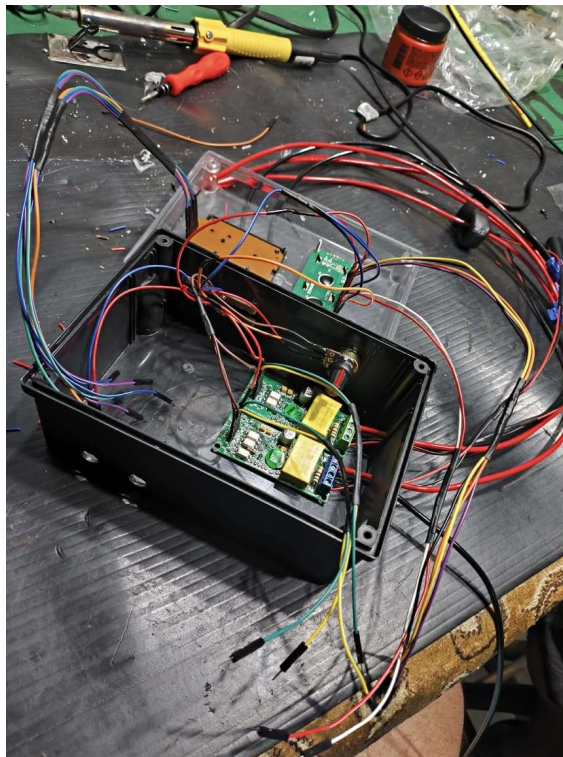
Figura 34 - Conexão dos cabos nos wattímetros



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Os cabos de alimentação positivo e negativo foram separados, cortados em comprimentos apropriados, soldados e igualmente protegidos com termo retrátil. Além disso, foram selecionados e organizados os fios que fariam parte das ligações do Arduino, mantendo tudo identificado pelas cores para facilitar futuras manutenções.

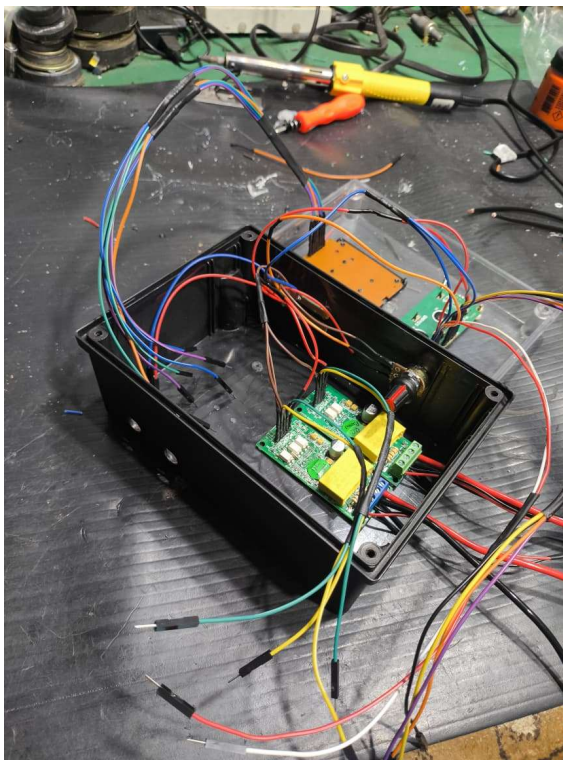
Figura 35 - Identificação dos cabos dentro da caixa



Fonte: Própria Autoria (2025)

Com todos os módulos e cabos no lugar, foi realizada a etapa de soldagem final, incluindo testes de continuidade em cada ligação. Esse procedimento evitou falhas, garantiu integridade nas conexões e reduziu riscos de curto-circuito. O termo retrátil foi aplicado em todos os pontos mais sensíveis, garantindo melhor acabamento e segurança ao conjunto.

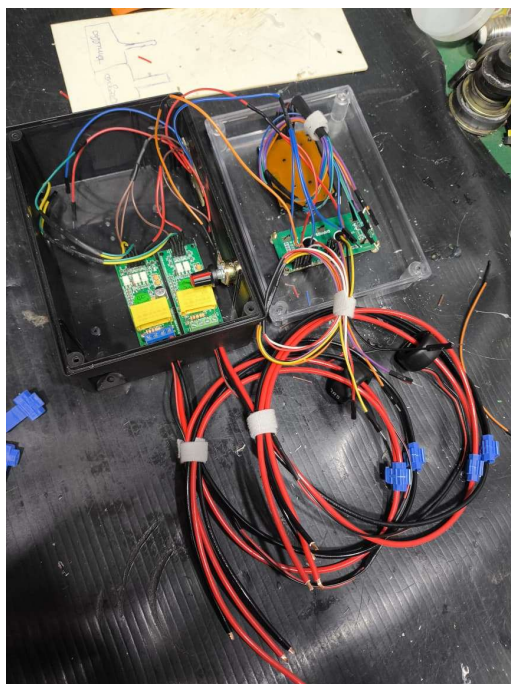
Figura 36 - Soldagem dos componentes



Fonte: Própria Autoria (2025)

Finalizada a parte elétrica e estrutural interna, os cabos foram agrupados e acondicionados de forma organizada, permitindo fechar a tampa superior sem esforço e mantendo a facilidade de transporte.

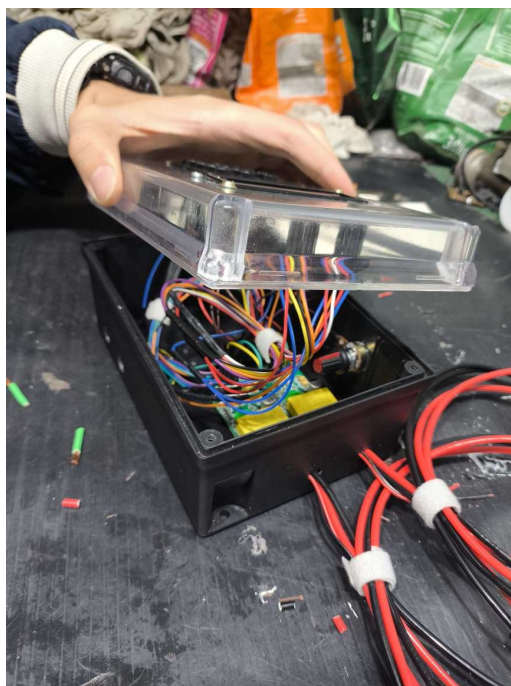
Figura 37 – Organização dos cabos



Fonte: Própria Aatoria (2025)

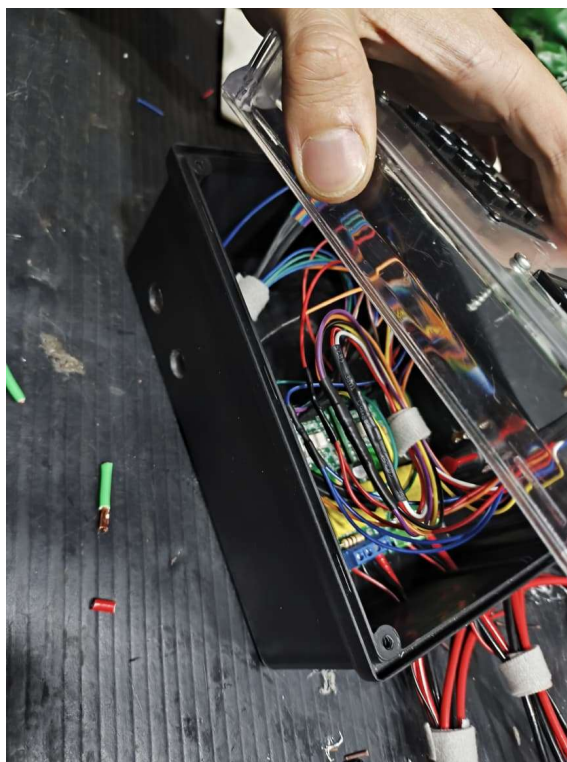
A caixa, agora montada, apresentou um aspecto limpo, funcional e preparado para uso no laboratório.

Figura 38 - Fechamento da tampa acrílica I



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Figura 39 - Fechamento da tampa acrílica II



Fonte: Própria Autoria (2025)

Figura 40 - Protótipo com a tampa acrílica fechada



Fonte: Própria Autoria (2025)

3.5 Resultado final da montagem

Após todas as etapas de corte, fixação, soldagem e organização interna, o protótipo atingiu sua configuração final. A caixa acrílica apresenta agora todos os componentes distribuídos de forma clara, funcional e segura, permitindo o uso adequado do equipamento durante os ensaios.

De forma geral, o conjunto final demonstra boa ergonomia, facilidade de acesso aos conectores, interface amigável por meio da tela LCD e teclado, além de um acabamento interno limpo e organizado. A estrutura final preserva a proteção dos cabos, a separação dos módulos e a identificação das saídas, garantindo praticidade no transporte e na utilização em laboratório.

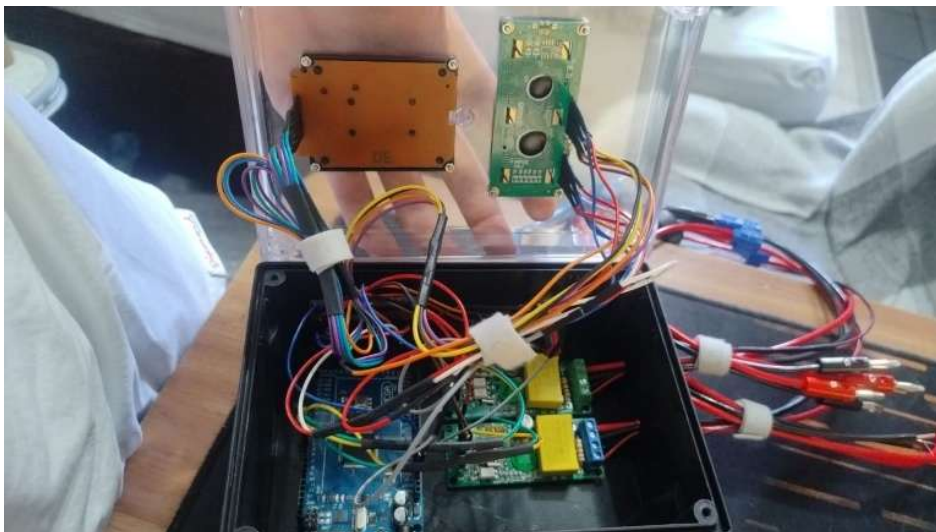
As imagens a seguir ilustram o resultado final da montagem, incluindo a tampa com a interface do usuário, a organização interna da caixa e a disposição completa do sistema já montado.

Figura 41 - Resultado final da tampa acrílica



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Figura 42 - Resultado final da organização interna dos cabos e componentes I



Fonte: Própria Autoria (2025)

Figura 43 - Resultado final da organização interna dos cabos e componentes II



Fonte: Própria Autoria (2025)

Figura 44 - Resultado final do protótipo



Fonte: Própria Autoria (2025)

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o protótipo desenvolvido para automatizar os ensaios de um transformador monofásico. Os testes foram executados no laboratório de eletricidade aplicada da Fatec São Paulo, localizado no terceiro andar, do prédio Santtiago.

A estrutura contou com o próprio dispositivo desenvolvido, um VariVolt (Variac) com tensão máxima de 240 V, um transformador monofásico de 500 VA (110/220 V) e uma carga puramente resistiva de 120 Ω . Esses elementos compuseram o arranjo experimental necessário para validar o desempenho do sistema.

4.1 Resultados ensaio em vazio

O ensaio em vazio foi conduzido com o objetivo de avaliar as perdas no núcleo e a corrente de magnetização do transformador. Para isso, o Variac foi conectado ao lado primário de 110 V, mantendo o lado secundário de 220 V em aberto. Essa configuração garante que apenas as características do núcleo sejam analisadas, sem influência de carga externa.

De acordo com o esquema elétrico apresentado abaixo, observa-se a ligação do Variac ao primário do transformador, enquanto o secundário permanece em aberto.

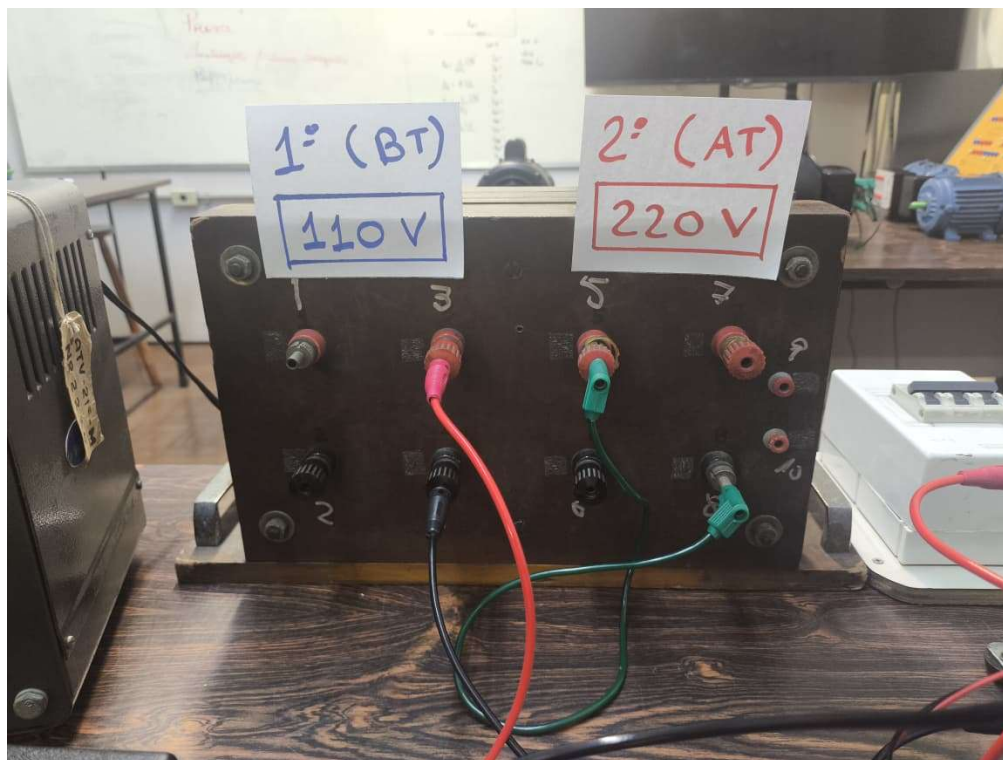
Figura 45 - Esquema elétrico ensaio em circuito aberto (CA)



Fonte: Própria Aatoria (2025)

O circuito final montado pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 46 – Ligação do transformador monofásico em circuito aberto (CA)



Fonte: Própria Autoria (2025)

Após a montagem e a aplicação gradual da tensão no primário, ajustada até aproximadamente 110 V, iniciaram-se as leituras de tensão, corrente e potência. Os valores obtidos estão organizados na tabela abaixo:

Tabela 2 - Valores obtidos no protótipo ensaio em aberto (CA)

Grandeza	Valor Medido
Tensão (VCA)	108.4 V
Corrente (ICA)	0.151 A
Potência (PCA)	9.10 W

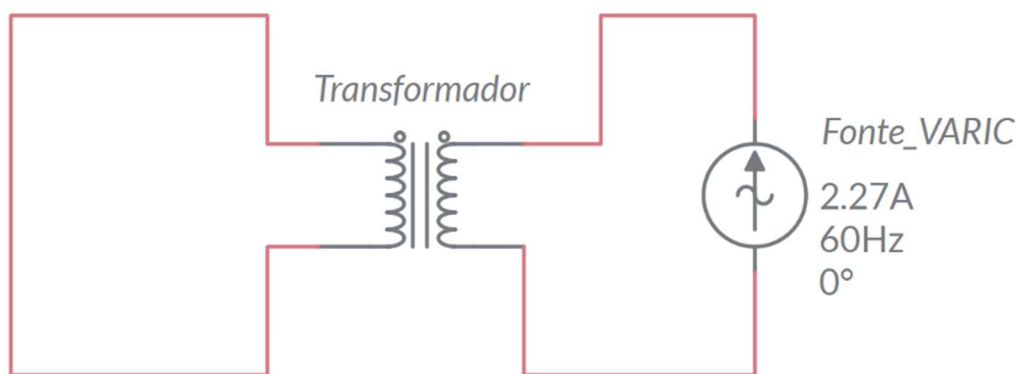
Fonte: Própria Autoria (2025)

4.2 Resultados ensaio em curto circuito

O ensaio em curto-circuito foi realizado com o objetivo de determinar as perdas no enrolamento e avaliar o comportamento do transformador sob condições de corrente nominal. Para isso, o lado secundário (220 V) foi energizado, enquanto o lado primário (110V) foi mantido em curto-circuito. Essa configuração permite analisar as perdas ôhmicas e a impedância equivalente do transformador.

De acordo com o esquema elétrico apresentado abaixo, observa-se a ligação da fonte de alimentação ao secundário, com o primário curto-circuitado.

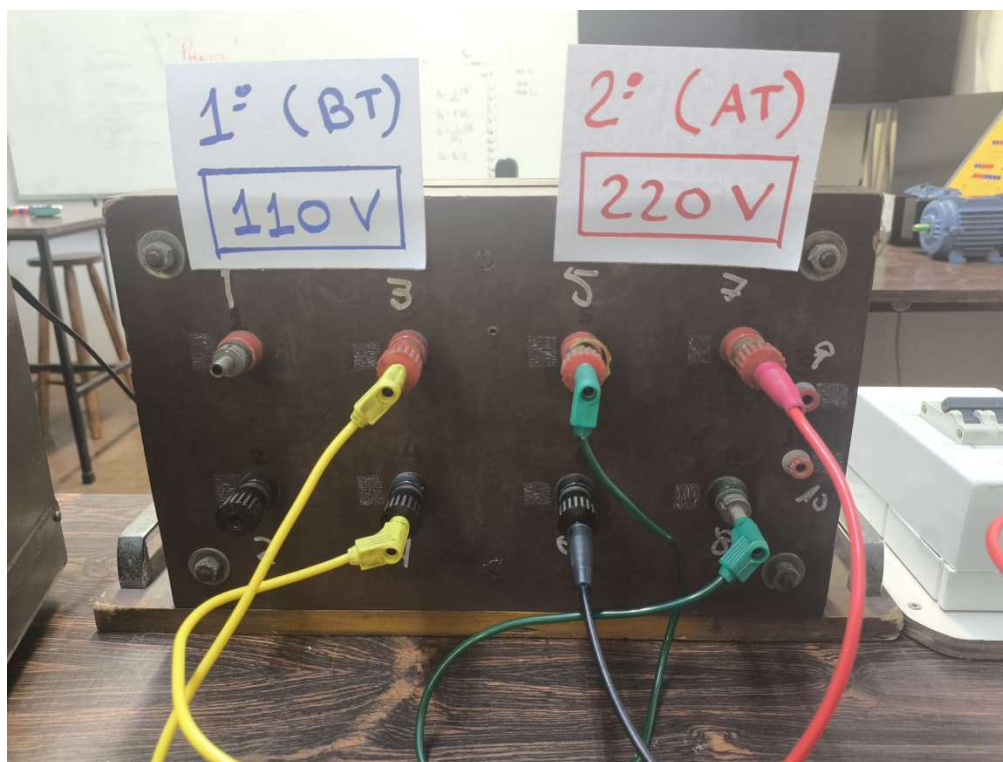
Figura 47 - Esquema elétrico ensaio em curto circuito (CC)



Fonte: Própria Autoria (2025)

O circuito final montado pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 48 - Ligação do transformador monofásico em curto circuito (CC)



Fonte: Própria Autoria (2025)

Após a montagem, a tensão foi aplicada gradualmente no secundário até que a corrente de curto-circuito atingisse o valor ideal previamente calculado, de aproximadamente 2.27 A. Com o ajuste concluído, foram realizadas as leituras de tensão, corrente e potência. Os valores obtidos estão organizados na tabela abaixo:

Tabela 3 - Valores obtidos no protótipo ensaio em curto circuito (CC)

Grandeza	Valor Medido
Tensão (VCC)	95.0 V
Corrente (ICC)	2.28 A
Potência (PCC)	28.28 W

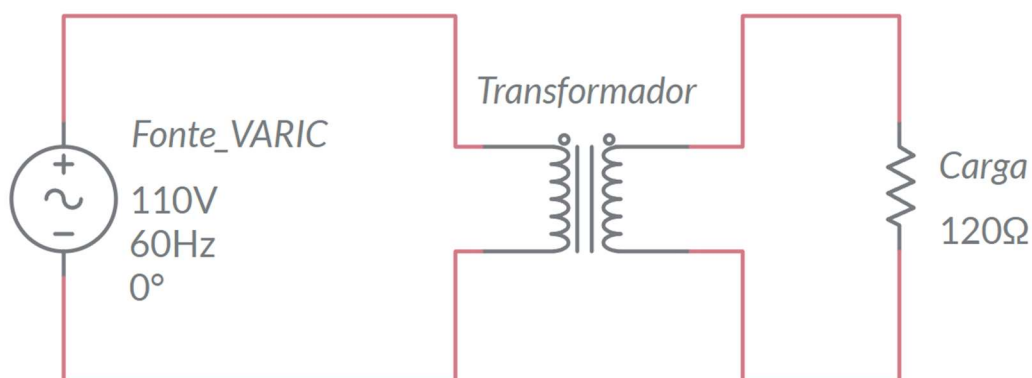
Fonte: Própria Autoria (2025)

4.3 Resultados ensaio em carga

O ensaio em carga foi realizado com o objetivo de avaliar o desempenho do transformador quando submetido a condições reais de operação, verificando sua eficiência e comportamento sob demanda de potência. Para isso, a tensão foi aplicada no lado primário do transformador (110 V), conforme o esquema de ligação preparado para este ensaio.

De acordo com o esquema elétrico apresentado abaixo, observa-se a conexão da fonte ao primário, enquanto o secundário alimenta a carga prevista. Esse arranjo permite analisar simultaneamente as grandezas elétricas de entrada e saída, possibilitando a determinação da eficiência e do fator de potência.

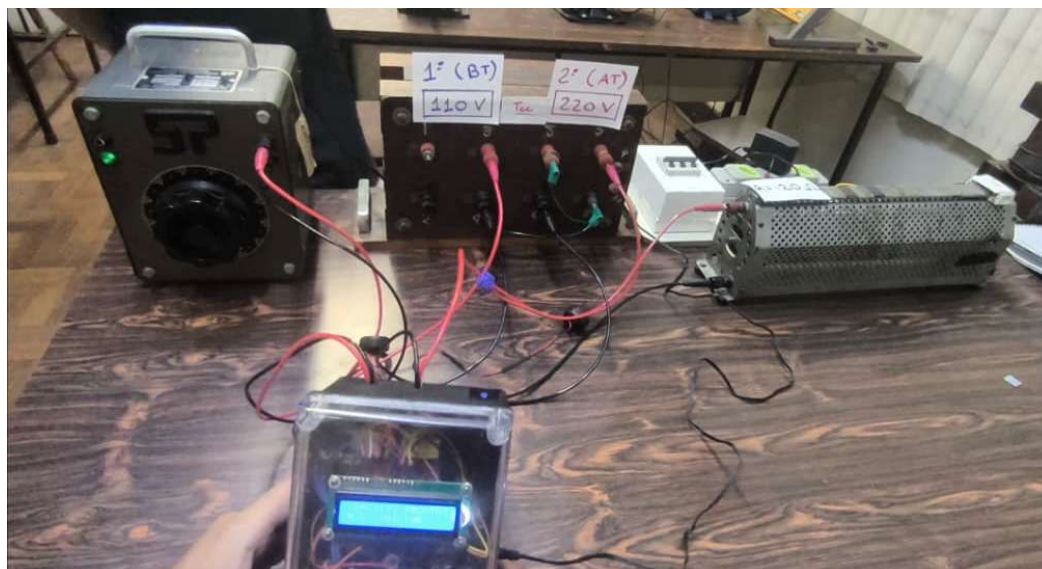
Figura 49 - Esquema elétrico ensaio em carga



Fonte: Própria Autoria (2025)

O circuito final montado pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 50 - Ligação do transformador monofásico em carga



Fonte: Própria Autoria (2025)

Após a montagem, a tensão do primário foi ajustada gradualmente até atingir aproximadamente o valor nominal de 110 V. Com o circuito estabilizado, foram realizadas as leituras de tensão, corrente e potência tanto no lado primário quanto no secundário. Os resultados obtidos estão organizados na tabela abaixo:

Tabela 4 - Valores obtidos no protótipo ensaio em carga

Grandeza	Valor Medido
Tensão Primário (V1)	110.4 V
Corrente Primário (I1)	3.46 A
Potência Primário (P1)	361.22 W
Tensão Secundário (V2)	201.7 V
Corrente Secundário (I2)	1.68 A
Potência Secundário (P2)	338.74 W
Fator de Potência (FP)	1.00

Fonte: Própria Autoria (2025)

4.4 Resultados circuito equivalente do transformador

Após a realização dos três ensaios foi possível determinar os parâmetros elétricos necessários para a construção do circuito equivalente do transformador. O protótipo desenvolvido calculou esses valores com base nas medições obtidas nos ensaios, permitindo a caracterização completa do equipamento.

Para validar os resultados, os parâmetros calculados pelo protótipo foram comparados com aqueles fornecidos pelo aplicativo “Resistência Interna Trafo Vercel App”, disponível em (<https://resistencia-interna-trafo.vercel.app>), onde os créditos são destinados ao aluno Nathan Pereira sob orientação da professora Victoria Alejandra Salazar Herrera da Faculdade UFMG. Esse aplicativo tem como finalidade reproduzir os cálculos do circuito equivalente de transformadores, oferecendo uma referência confiável para verificação dos dados experimentais.

De acordo com o quadro comparativo apresentado abaixo, observa-se lado a lado os valores medidos e calculados pelo protótipo e os valores fornecidos pelo aplicativo. Essa disposição facilita a análise das diferenças e confirma a proximidade entre os resultados.

Tabela 5 - Resultados obtidos no protótipo circuito equivalente do transformador

Parâmetro	Resultado Protótipo	Resultado Aplicativo
Resistência equiv. no núcleo (R_C)	1329,67 Ω	1290,00 Ω
Reatância de magnetização (jX_m)	870,79 Ω	863,65 Ω
Resistência do enrolamento Prim. (R_1)	2,71 Ω	2,72 Ω
Resistência do enrolamento Sec. (R_2)	10,86 Ω	10,88 Ω
Reatância de dispersão Prim. (jX_1)	20,62 Ω	20,65 Ω
Reatância de dispersão Sec. (jX_2)	82,49 Ω	82,62 Ω
Perdas no Ferro (P_{fe})	9,10 W	9,10 W
Perdas no Cobre (P_{cu})	28,28 W	28,28 W

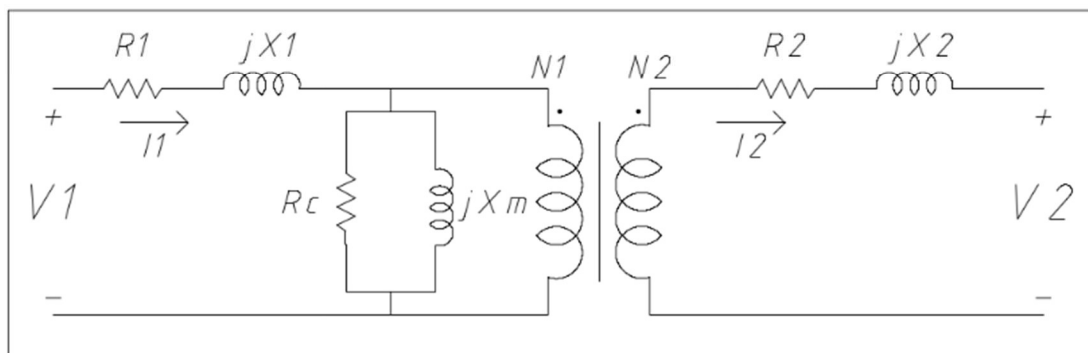
Fonte: Própria Autoria (2025)

Figura 51 - Valores obtidos no aplicativo

Valores utilizados:

$V_{ca} = 108.4 \text{ V}$, $I_{ca} = 0.151 \text{ A}$, $P_{ca} = 9.1 \text{ W}$, $V_{cc} = 95 \text{ V}$, $I_{cc} = 2.28 \text{ A}$, $P_{cc} = 28.28 \text{ W}$,
 $V_p = 110.00 \text{ V}$, $V_s = 220.00 \text{ V}$

Real Cir. T Primário Cir. T Secundário Cir. L Primário Cir. L Secundário



$R_1 = 2.72 \Omega$

$jX_1 = 20.65 \Omega$

$R_c = 1.29 \text{ k}\Omega$

$jX_m = 863.65 \Omega$

$R_2 = 10.88 \Omega$

$jX_2 = 82.62 \Omega$

Perdas no núcleo = 9.10 W

Perdas no cobre = 28.28 W

Fonte: Própria Autoria (2025)

A análise dos dados evidencia que os valores calculados pelo protótipo apresentam grande proximidade com os resultados fornecidos pelo aplicativo. As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas às condições práticas de ensaio e às tolerâncias dos instrumentos de medição. No entanto, a consistência geral confirma a confiabilidade do protótipo e valida sua metodologia de cálculo.

4.5 Resultados rendimento do transformador

O rendimento do transformador foi avaliado de duas formas distintas: por meio da medição direta com wattímetros durante o ensaio em carga e através do cálculo teórico considerando as perdas internas. Essa abordagem permitiu comparar o desempenho prático do protótipo com o resultado obtido a partir dos parâmetros de perdas.

Figura 52 - Resultado do rendimento do transformador ensaiado.



Fonte: Própria Aatoria (2025)

Tabela 6 - Resultados obtidos no protótipo rendimento do transformador

Parâmetro	Resultado Protótipo
η Medido	93,78%
η Calculado	84,98%

Fonte: Própria Aatoria (2025)

O rendimento medido foi determinado pela razão entre a potência de saída e a potência de entrada, utilizando os valores registrados pelos wattímetros. O Wattímetro 1 indicou a potência de entrada no primário, enquanto o Wattímetro 2 registrou a potência de saída no secundário. A divisão entre esses dois valores resultou em um rendimento de 93,78%, evidenciando que o transformador apresentou elevada eficiência em condições reais de operação.

Já o rendimento calculado foi obtido a partir da potência de saída medida pelo Wattímetro 2, dividida pela soma da potência de saída com as perdas internas do transformador. Nesse caso, foram consideradas as perdas no ferro (associadas ao ensaio em vazio) e as perdas no cobre (associadas ao ensaio em curto-circuito). O resultado desse cálculo foi um rendimento de aproximadamente 84,98%, inferior ao rendimento medido.

A discrepância entre os dois valores pode ser explicada pela metodologia empregada em cada caso. O rendimento medido reflete diretamente a relação entre entrada e saída durante o ensaio em carga, sem considerar explicitamente as perdas separadas. Já o rendimento calculado incorpora as perdas no ferro e no cobre de forma teórica, o que tende a reduzir o valor final, pois soma todas as contribuições de perdas ao cálculo. Além disso, pequenas variações experimentais, como tolerâncias dos instrumentos de medição e ajustes de tensão, também podem influenciar os resultados.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do protótipo apresentado neste trabalho demonstrou resultados altamente satisfatórios, tanto em termos de construção quanto de funcionalidade. Trata-se de um dispositivo bem acabado, com estrutura robusta e confiável, pensado para garantir longevidade e evitar problemas futuros, como maus contatos internos. O cuidado com detalhes, como soldas bem executadas e componentes fixados adequadamente, reforça a qualidade do projeto e sua viabilidade prática.

Do ponto de vista operacional, o protótipo mostrou-se intuitivo e eficiente. O teclado e o visor permitem ao usuário acompanhar passo a passo cada ensaio, orientando sobre qual lado deve ser energizado, qual tensão ou corrente deve ser atingida e quais parâmetros devem ser observados. Essa padronização elimina dúvidas durante a execução dos testes e garante que os procedimentos sejam realizados de forma correta e uniforme. Além disso, o dispositivo concentra em um único equipamento todas as medições necessárias, dispensando o uso de múltiplos instrumentos analógicos ou digitais, o que simplifica o ambiente de laboratório e aumenta a eficiência dos ensaios.

Outro aspecto relevante é a otimização do tempo. Enquanto anteriormente a realização completa dos ensaios e cálculos demandava entre duas e quatro aulas, agora é possível concluir todo o processo em apenas sete a dez minutos. Isso representa um avanço significativo para professores, alunos e orientadores, que podem dedicar mais tempo à análise e discussão dos resultados, em vez de se concentrarem em medições repetitivas e cálculos manuais. O protótipo também se destaca pelo custo reduzido em comparação a transformadores monofásicos didáticos disponíveis no mercado, tornando viável a aquisição de várias unidades para uso simultâneo por diferentes grupos de alunos.

Os resultados obtidos confirmam a confiabilidade do dispositivo. As medições realizadas e exibidas em sua tela mostraram-se consistentes com cálculos feitos manualmente e com os valores fornecidos por aplicativos de referência, validando sua precisão. Além disso, o protótipo não apenas realiza medições, mas também armazena os dados, calcula o rendimento e determina o circuito equivalente do transformador ensaiado, oferecendo uma solução completa e integrada.

É importante destacar que, por se tratar de um protótipo, ainda existem pontos de melhoria. A inclusão de recursos adicionais de segurança, como botões liga/desliga, fusíveis e relés de proteção, pode aumentar a robustez do sistema e proteger o Arduino e os módulos contra tensões e correntes superiores às suportadas. Essas melhorias são compreendidas como parte natural da evolução do projeto e não comprometem sua eficácia atual.

Como perspectiva futura, destaca-se a possibilidade de ampliação do dispositivo para a realização de ensaios em transformadores trifásicos. Essa evolução permitiria aplicar a mesma lógica de automação, padronização e cálculo automático em sistemas trifásicos, contemplando diferentes tipos de ligação (estrela e triângulo) e ampliando significativamente o uso do protótipo em atividades didáticas e laboratoriais, alinhando-o ainda mais às demandas encontradas na prática industrial e acadêmica.

Em síntese, o protótipo desenvolvido cumpre plenamente os objetivos estabelecidos. Ele padroniza os ensaios, reduz erros humanos, elimina a necessidade de cálculos demorados, otimiza o tempo de aula e apresenta resultados confiáveis e consistentes. O dispositivo representa uma contribuição significativa para o ensino e a prática experimental em laboratórios de transformadores, oferecendo uma alternativa acessível, eficiente e inovadora. O que foi idealizado no início do projeto foi concretizado com sucesso, consolidando o protótipo como uma ferramenta de grande valor acadêmico e didático.

REFERÊNCIAS

ASTH, Rafael. Lei de Lenz. **Toda Matéria**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/lei-de-lenz/>. Acesso em: 27 out. 2025

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5^a. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2013. p. 1-99.

DANTAS, Robson Alves. **"Regra da mão direita"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-regra-mao-direita.htm>. Acesso em 27 de outubro de 2025.

DELIUS, Rua Frederick; HERRERA-VICTORIA, Victoria Alejandra Salazar; BARBOSA, Praça Rui. **APLICAÇÃO WEB PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS**.

GOUVEIA, Rosimar. Lei de Faraday. **Toda Matéria**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/lei-de-faraday/>. Acesso em: 27 out. 2025

MORA, Jesús Fraile. **MÁQUINAS ELÉCTRICAS**. 5^a. ed. Aravaca - Madrid: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2003. p. 161-200.

PINTO, João Victor Araujo. **Medidas elétricas em um transformador monofásico**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PREPARAENEM. **Campo magnético de um solenoide**. Disponível em: <https://www.preparaenem.com/fisica/campo-magnetico-um-solenoide.htm>. Acesso em: 23 out. 2025.

UNESP - PROJETO EXPERIMENTOS DE FÍSICA COM MATERIAIS DO DIA A DIA. **Mapeamento de Campo Magnético**. Disponível em: <https://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/ele13.htm>. Acesso em: 23 out. 2025.

SILVA, Edson Pereira da. **A UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO COMO RECURSO DIDÁTICO NO ENSINO DE ELETRODINÂMICA**. 2022.

TORO, Vincent Del. **FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. 1^a. ed. Rio de Janeiro - RJ: Livros técnicos e científicos editora, 1994. p. 66-73.

UMANS, Stephen D.. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7^a. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2014. p. 63-78.

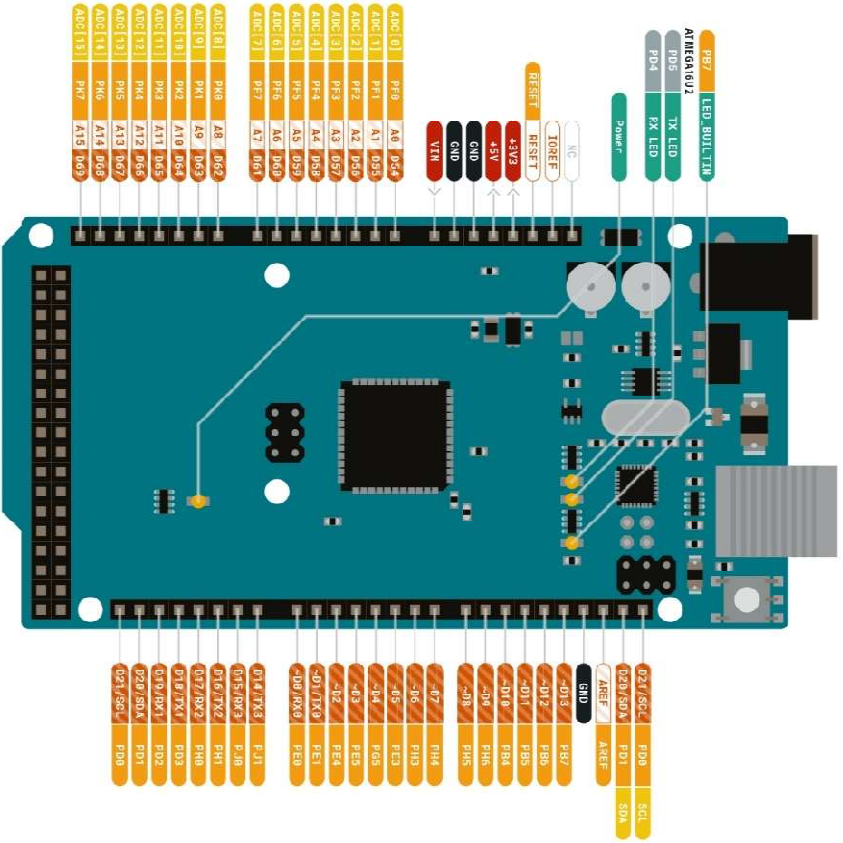
ANEXO A – DATASHEET DO ARDUINO E SENSORES



ARDUINO

MEGA 2560 REV3

10101.ARDUINO.COM/MEGA2560-REV3



Ground

Power

LED

Internal Pin

SMD Pin

Digital Pin

Analog Pin

Other Pin

Microcontroller's Port

Default

MAXIMUM current per I/O pin is 20mA

MAXIMUM current per +3.3V pin is 50mA

VIN 6-20 V input to the board.

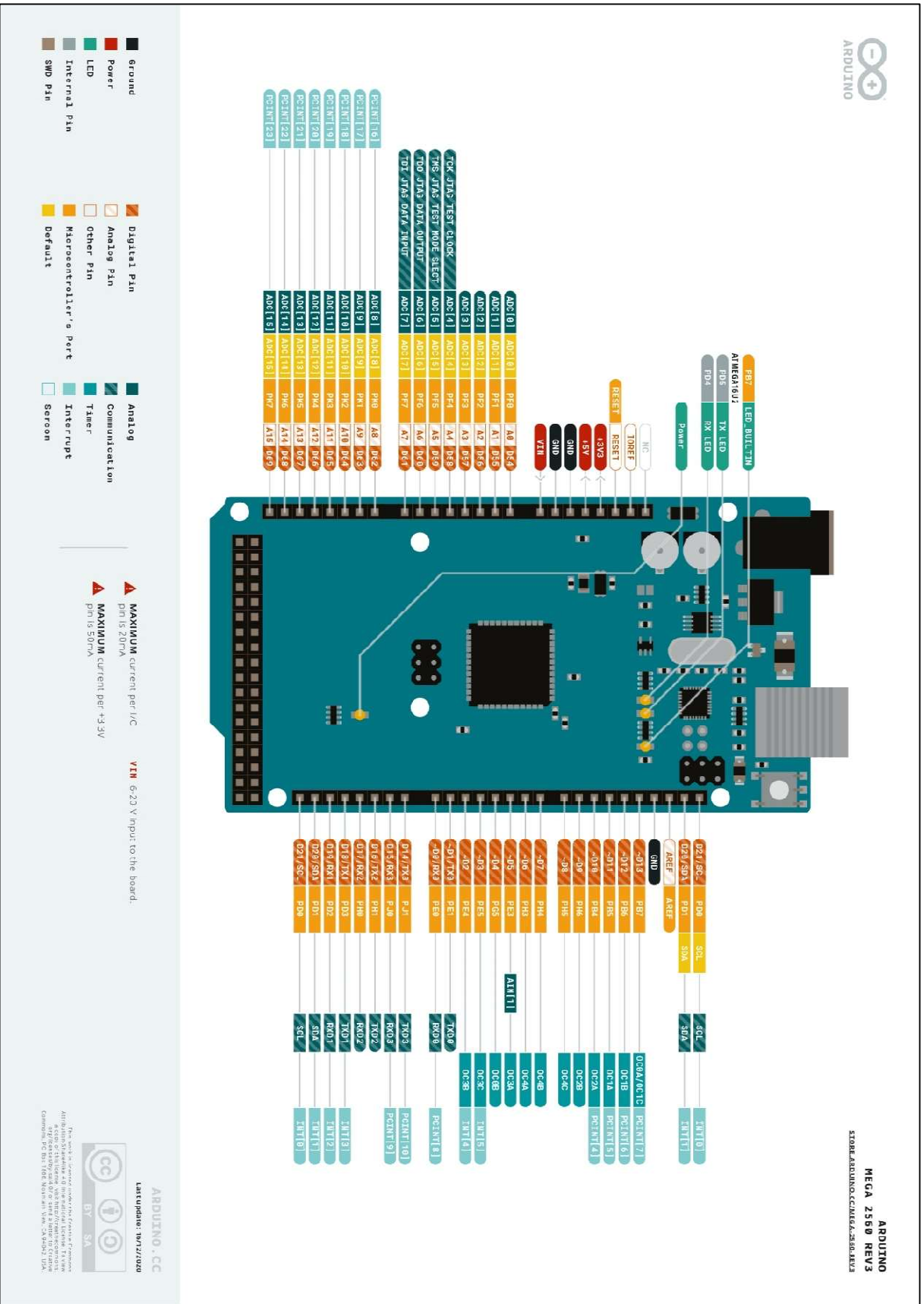
ARDUINO.CC

Last update: 16/12/2020



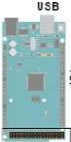
CC BY SA

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. For more information, see <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.
Copyright © 2016 Arduino LLC. All rights reserved. No part of this work may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage or retrieval system, without permission in writing from Arduino LLC.





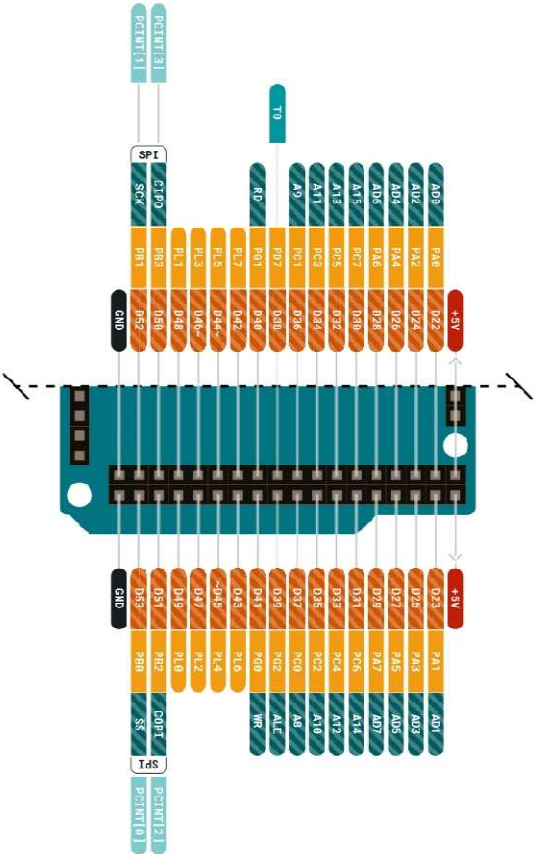
ARDUINO



TOP

ARDUINO
MEGA 2560 REV3
STORE.ARDUINO.COM/MEGA-2560-REV3

Digital pins D22-D53



Ground

Power

LED

Internal Pin

SWD Pin

Digital Pin

Analog Pin

Other Pin

Microcontroller's Port

Default

Analog

Communication

Timer

Interrupt

Sercom

MAXIMUM current per I/O pin is 20mA

MAXIMUM current per +5V pin is 500mA

NOTE: CPIO/COP1 have previously been referred to as MISCU/MDS1

ARDUINO.CC

License: BY-SA

ARDUINO.CC

License: BY-SA

ARDUINO.CC

License: BY-SA

ARDUINO.CC

License: BY-SA



VIN 6-23 V input to the board.

NOTE: CIPO/COP1 have previously been referred to as MISO/MO1

NOTE: CIPO/COP1 have previously been referred to as MISO/MO1

PZEM-004T V3.0 User Manual

Overview

This document describes the specification of the **PZEM-004T** AC communication module, the module is mainly used for measuring AC voltage, current, active power, frequency, power factor and active energy, the module is without display function, the data is read through the **TTL** interface.

PZEM-004T-10A: Measuring Range 10A (Built-in Shunt)

PZEM-004T-100A: Measuring Range 100A (external transformer)

1. Function description

1.1 Voltage

- 1.1.1 Measuring range: 80~260V
- 1.1.2 Resolution: 0.1V
- 1.1.3 Measurement accuracy: 0.5%

1.2 Current

- 1.2.1 Measuring range: 0~10A (**PZEM-004T-10A**) ; 0~100A (**PZEM-004T-100A**)
- 1.2.2 Starting measure current: 0.01A (**PZEM-004T-10A**) ; 0.02A (**PZEM-004T-100A**)
- 1.2.3 Resolution: 0.001A
- 1.2.4 Measurement accuracy: 0.5%

1.3 Active power

- 1.3.1 Measuring range: 0~2.3kW (**PZEM-004T-10A**) ; 0~23kW (**PZEM-004T-100A**)
- 1.3.2 Starting measure power: 0.4W
- 1.3.3 Resolution: 0.1W
- 1.3.4 Display format:
 - <1000W, it display one decimal, such as: 999.9W
 - ≥1000W, it display only integer, such as: 1000W
- 1.3.5 Measurement accuracy: 0.5%

1.4 Power factor

1.4.1 Measuring range: 0.00~1.00

1.4.2 Resolution: 0.01

1.4.3 Measurement accuracy: 1%

1.5 Frequency

1.5.1 Measuring range: 45Hz~65Hz

1.5.2 Resolution: 0.1Hz

1.5.3 Measurement accuracy: 0.5%

1.6 Active energy

1.6.1 Measuring range: 0~9999.99kWh

1.6.2 Resolution: 1Wh

1.6.3 Measurement accuracy: 0.5%

1.6.4 Display format:

<10kWh, the display unit is Wh(1kWh=1000Wh), such as: 9999Wh

≥10kWh, the display unit is kWh, such as: 9999.99kWh

1.6.5 Reset energy: use software to reset.

1.7 Over power alarm

Active power threshold can be set, when the measured active power exceeds the threshold, it can alarm

1.8 Communication interface

RS485 interface.

2 Communication protocol

2.1 Physical layer protocol

Physical layer use UART to RS485 communication interface

Baud rate is 9600, 8 data bits, 1 stop bit, no parity

2.2 Application layer protocol

The application layer use the Modbus-RTU protocol to communicate. At present, it only supports function codes such as 0x03 (Read Holding Register), 0x04 (Read Input Register), 0x06 (Write Single Register), 0x41 (Calibration), 0x42 (Reset energy).etc.

0x41 function code is only for internal use (address can be only 0xF8), used for factory calibration and return to factory maintenance occasions, after the function code to increase 16-bit password, the default password is 0x3721

The address range of the slave is 0x01 ~ 0xF7. The address 0x00 is used as the broadcast address, the slave does not need to reply the master. The address 0xF8 is used as the general address, this address can be only used in single-slave environment and can be used for calibration etc.operation.

2.3 Read the measurement result

The command format of the master reads the measurement result is(total of 8 bytes):

Slave Address + 0x04 + Register Address High Byte + Register Address Low Byte + Number of Registers High Byte + Number of Registers Low Byte + CRC Check High Byte + CRC Check Low Byte.

The command format of the reply from the slave is divided into two kinds:

Correct Reply: Slave Address + 0x04 + Number of Bytes + Register 1 Data High Byte + Register 1 Data Low Byte + ... + CRC Check High Byte + CRC Check Low Byte

Error Reply: Slave address + 0x84 + Abnormal code + CRC check high byte + CRC check low byte

Abnormal code analyzed as following (the same below)

- 0x01,Illegal function
- 0x02,Illegal address
- 0x03,Illegal data
- 0x04,Slave error

The register of the measurement results is arranged as the following table

Register address	Description	Resolution
0x0000	Voltage value	1LSB correspond to 0.1V
0x0001	Current value low 16 bits	1LSB correspond to 0.001A
0x0002	Current value high 16 bits	
0x0003	Power value low 16 bits	1LSB correspond to 0.1W
0x0004	Power value high 16 bits	
0x0005	Energy value low 16 bits	1LSB correspond to 1Wh
0x0006	Energy value high 16 bits	
0x0007	Frequency value	1LSB correspond to 0.1Hz
0x0008	Power factor value	1LSB correspond to 0.01
0x0009	Alarm status	0xFFFF is alarm, 0x0000is not alarm

For example, the master sends the following command (CRC check code is replaced by 0xHH and 0xLL, the same below)

0x01 + 0x04 + 0x00 + 0x00 + 0x00 + 0x0A + 0xHH + 0xLL

Indicates that the master needs to read 10 registers with slave address 0x01 and the start address of the register is 0x0000

The correct reply from the slave is as following:

0x01 + 0x04 + 0x14 + 0x08 + 0x98 + 0x03 + 0xE8 + 0x00 + 0x00 + 0x08 + 0x98 + 0x00 + 0x00 + 0x00 + 0x00 + 0x00 + 0x01 + 0xF4 + 0x00 + 0x64 + 0x00 + 0x00 + 0xHH + 0xLL

The above data shows

- Voltage is 0x0898, converted to decimal is 2200, display 220.0V
- Current is 0x000003E8, converted to decimal is 1000, display 1.000A
- Power is 0x00000898, converted to decimal is 2200, display 220.0W
- Energy is 0x00000000, converted to decimal is 0, display 0Wh
- Frequency is 0x01F4, converted to decimal is 500, display 50.0Hz
- Power factor is 0x0064, converted to decimal is 100, display 1.00
- Alarm status is 0x0000, indicates that the current power is lower than the alarm power threshold

2.4 Read and modify the slave parameters

At present, it only supports reading and modifying slave address and power alarm threshold

The register is arranged as the following table

Register address	Description	Resolution
0x0001	Power alarm threshold	1LSB correspond to 1W
0x0002	Modbus-RTU address	The range is 0x0001~0x00F7

The command format of the master to read the slave parameters and read the measurement results are same (described in details in Section 2.3), only need to change the function code from 0x04 to 0x03.

The command format of the master to modify the slave parameters is (total of 8 bytes):

Slave Address + 0x06 + Register Address High Byte + Register Address Low Byte + Register Value High Byte + Register Value Low Byte + CRC Check High Byte + CRC Check Low Byte.

The command format of the reply from the slave is divided into two kinds:

Correct Response: Slave Address + 0x06 + Number of Bytes + Register Address Low Byte + Register Value High Byte + Register Value Low Byte + CRC Check High Byte + CRC Check Low Byte.

Error Reply: Slave address + 0x86 + Abnormal code + CRC check high byte + CRC check low byte.

For example, the master sets the slave's power alarm threshold:

$0x01 + 0x06 + 0x00 + 0x01 + 0x08 + 0xFC + 0xHH + 0xLL$

Indicates that the master needs to set the 0x0001 register (power alarm threshold) to 0x08FC (2300W).

Set up correctly, the slave return to the data which is sent from the master.

For example, the master sets the address of the slave

$0x01 + 0x06 + 0x00 + 0x02 + 0x00 + 0x05 + 0xHH + 0xLL$

Indicates that the master needs to set the 0x0002 register (Modbus-RTU address) to 0x0005

Set up correctly, the slave return to the data which is sent from the master.

2.5 Reset energy

The command format of the master to reset the slave's **energy** is (total 4 bytes):

Slave address + 0x42 + CRC check high byte + CRC check low byte.

Correct reply: slave address + 0x42 + CRC check high byte + CRC check low byte.

Error Reply: Slave address + 0xC2 + Abnormal code + CRC check high byte + CRC check low byte

2.6 Calibration

The command format of the master to calibrate the slave is (total 6 bytes):

$0xF8 + 0x41 + 0x37 + 0x21 + \text{CRC check high byte} + \text{CRC check low byte}$.

Correct reply: $0xF8 + 0x41 + 0x37 + 0x21 + \text{CRC check high byte} + \text{CRC check low byte}$.

Error Reply: $0xF8 + 0xC1 + \text{Abnormal code} + \text{CRC check high byte} + \text{CRC check low byte}$.

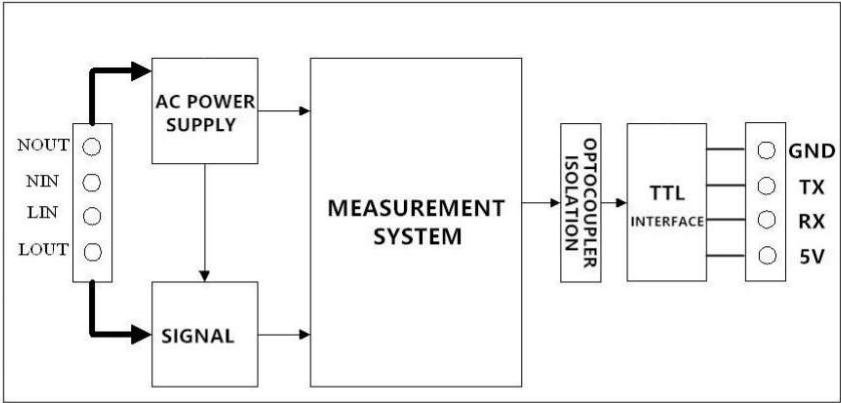
It should be noted that the calibration takes 3 to 4 seconds, after the master sends the command, if the calibration is successful, it will take 3 ~ 4 seconds to receive the response from the slave.

2.7 CRC check

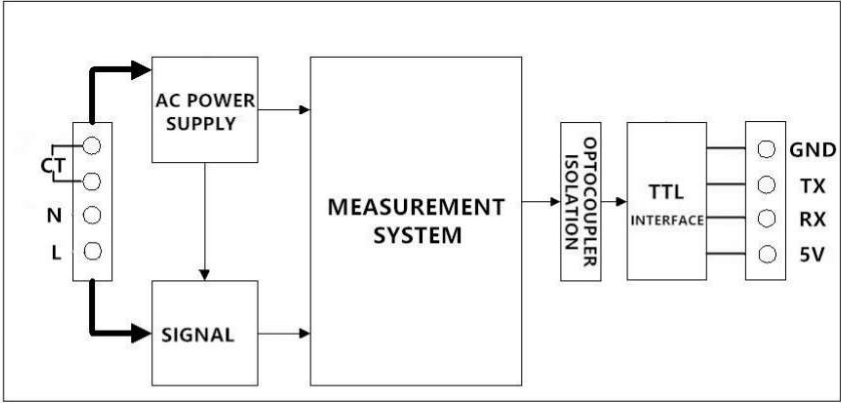
CRC check use 16bits format, occupy two bytes, the generator polynomial is $X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$, the polynomial value used for calculation is 0xA001.

The value of the CRC check is a frame data divide all results of checking all the bytes except the CRC check value.

3 Functional block diagram

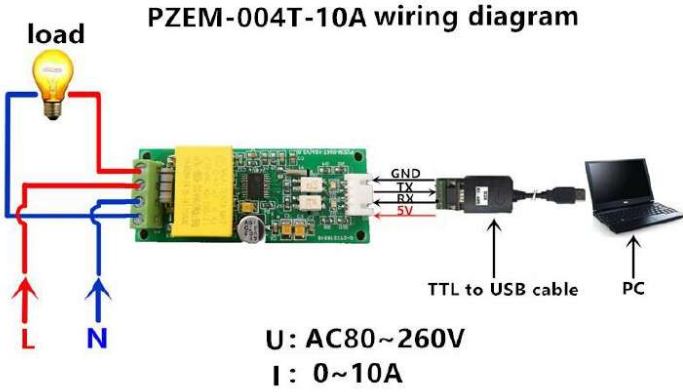


Picture 3.1 PZEM-004T-10A Functional block diagram

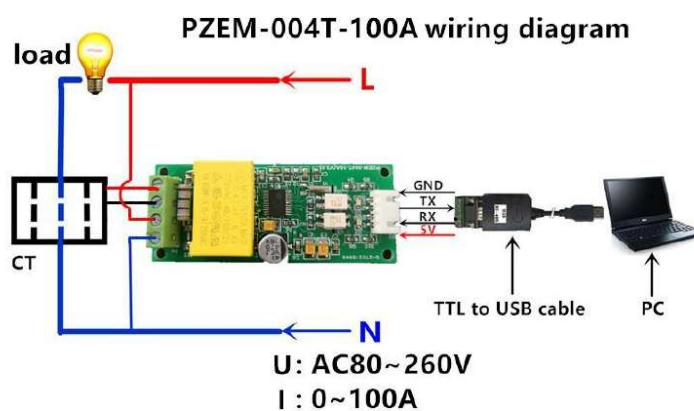


Picture 3.2 PZEM-004T-100A Functional block diagram

4 Wiring diagram



Picture 4.1 PZEM-004T-10A wiring diagram



Picture 4.2 PZEM-004T-100A wiring diagram

5 Other instructions

5.1 The TTL interface of this module is a passive interface, it requires external 5V power supply, which means, when communicating, all four ports must be connected (5V, RX, TX, GND), otherwise it cannot communicate.

5.2 Working temperature

-20°C ~ +60°C.



3x4 Matrix Keypad

PRODUCT ID: 3845

Punch in your secret key (or Jenny's number) into this numeric matrix keypad. This keypad has 12 buttons, arranged in a telephone-line 3x4 grid. The keys are connected into a matrix, so you only need 7 microcontroller pins (3-columns and 4-rows) to scan through the pad. Check the tutorials tab for links to an Arduino library and example code.

We include some header so you can plug this into a breadboard with ease, some light soldering is required to attach it. Or you can use plain wires if you like.

There's a great Matrix Keypad Arduino library that should work great with this item with minor adjustments. It's basically a sturdier version of our Membrane 3x4 Matrix Keypad. Note that the rows and columns are intermixed. The order from left to right is COL2, ROW1, COL1, ROW4, COL3, ROW2, ROW1

We also have a 4x4 version of this matrix keypad and a version that has phone-styling with letters printed over the numbers

If you dig our demo, check out the Adafruit FeatherWing OLED – 128x32 OLED

TECHNICAL DETAILS

- Force: 160–180g
- Contact Resistance: <100Ω

There is a very nice Matrix Keypad Arduino library that works great with this item. The only thing we suggest is to change the initialization code in the examples to this:

```
#include "Arduino.h"
#include "Keypad.h"

const byte ROWS = 4; //four rows
const byte COLS = 3; //three columns
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3'},
  {'4','5','6'},
  {'7','8','9'},
  {'*','0','#'}
};

byte rowPins[ROWS] = {12, 5, 6, 10}; //connect to the row pinouts of the keypad
byte colPins[COLS] = {11, 13, 9}; //connect to the column pinouts of the keypad

Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );

void setup(){
  Serial.begin(9600);
```

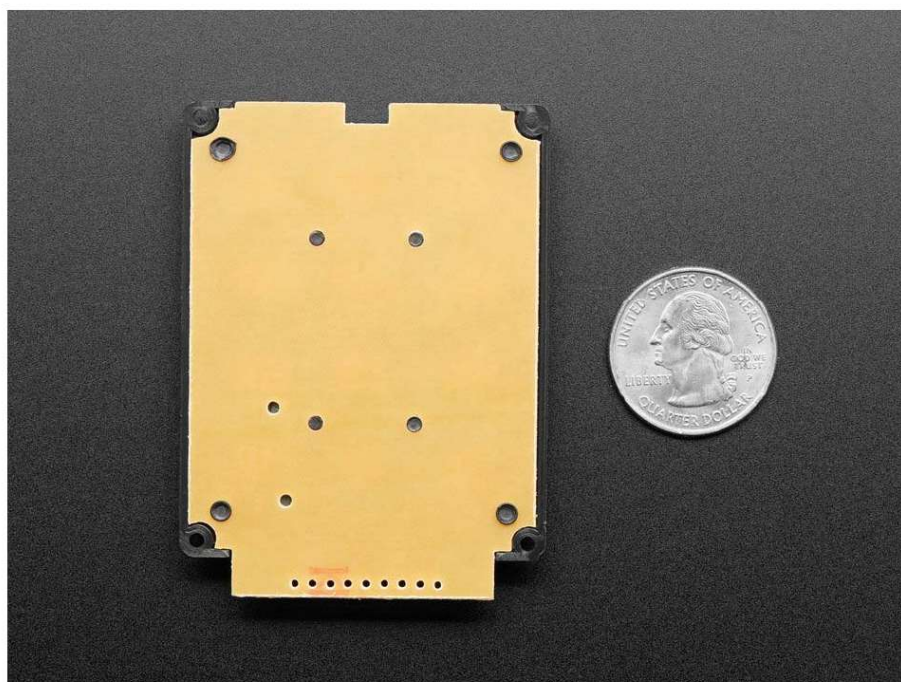


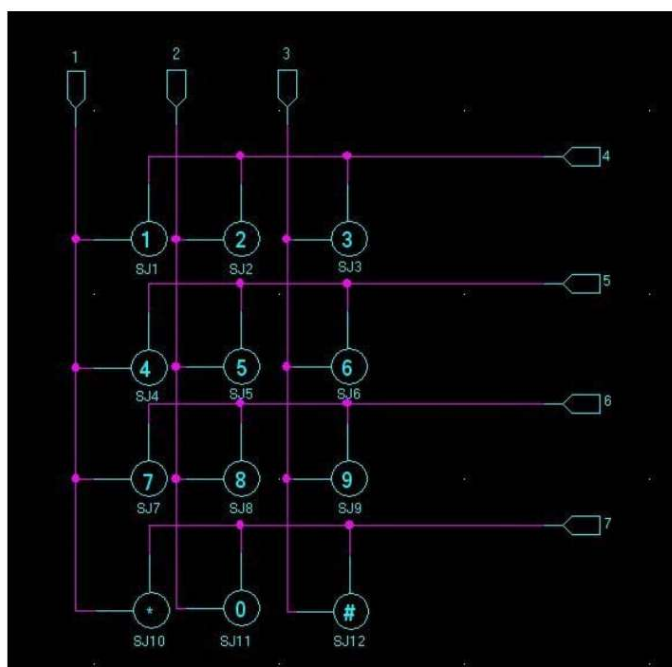
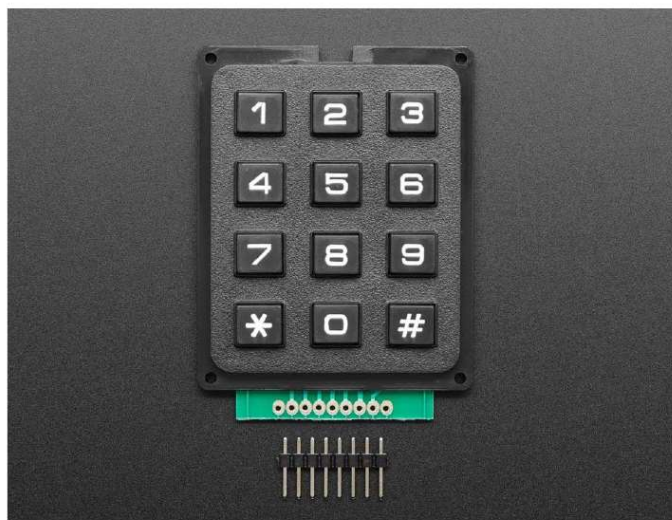
```
}  
  
void loop(){  
  char key = keypad.getKey();  
  
  if (key != NO_KEY){  
    Serial.println(key);  
  }  
}
```

This will swap the * and # keys and also let you connect to the Arduino with all the pins in order/in a row starting from digital 2 thru digital 9

Product Dimensions: 70.0mm x 51.0mm x 9.7mm / 2.8" x 2.0" x 0.4"

Product Weight: 17.6g / 0.6oz





<https://www.adafruit.com/product/3845> 8-13-18

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

Specification

for

LCD Module

**1602A-1
(V1.2)**

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

1. 0 FEATURES

- Display Mode: STN, BLUB
- Display Formate: 16 Character x 2 Line
- Viewing Direction: 6 O'Clock
- Input Data: 4-Bits or 8-Bits interface available
- Display Font : 5 x 8 Dots
- Power Supply : Single Power Supply (5V±10%)
- Driving Scheme : 1/16Duty,1/5Bias
- BACKLIGHT (SIDE) : LED (WHITE)

2.0 ABSOLUTE MAXIMUM

Item	Symbol	Min.	Max.	Unit
Power Supply for logic	Vdd	-0.3	+7.0	V
Power supply for LCD Drive	Vlcd	Vdd-10.0	Vdd+0.3	V
Input Voltage	Vi	-0.3	Vdd+0.3	V
Operating Temperature	Ta	0	+50	°C
Storage Temperature	Tstg	-10	+60	°C

3.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Ta=25°C; Vdd=3.0V±10%, otherwise specified)

Item	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Power Supply for Logic	Vdd	--	4.7	5.0	5.5	V
Operating Voltage for LCD	Vdd-Vo	--	--	5.0	--	V
Input High voltage	Vih	--	2.2	--	Vdd	V
Input Low voltage	Vil	--	-0.3	--	0.6	V
Output High voltage	Voh	-Ioh=0.2mA	2.4	--	--	V
Output Low voltage	Vol	Iol=1.2mA	--	--	0.4	V
Power supply current	Idd	Vdd=3.0v	--	1.1	--	mA

4.0 MECHANICAL PARAMETERS

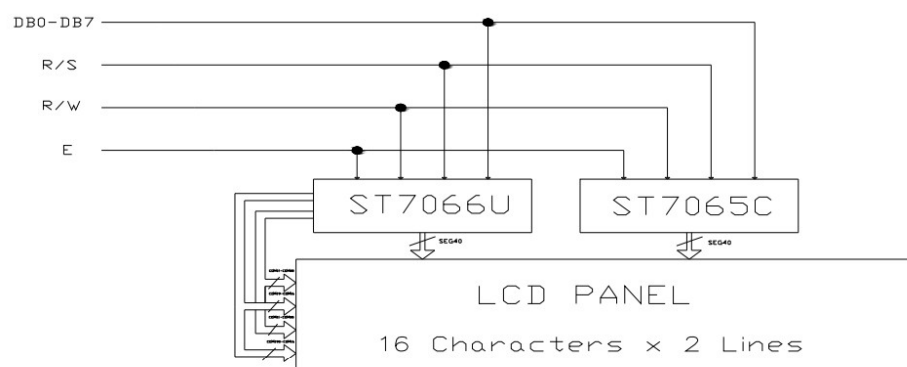
Item	Description	Unit
PCB Dimension	80.0*36.0*1.6	mm
View Dimension	69.5*14.5	mm

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

5.0 PIN ASSIGNMENT

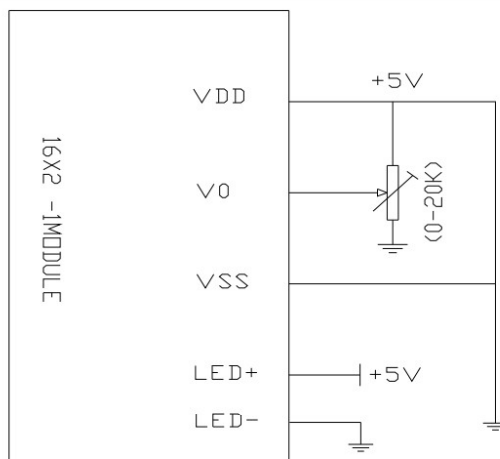
No.	Symbol	Level	Function	
1	Vss	--	0V	Power Supply
2	Vdd	--	+5V	
3	V0	--	for LCD	
4	RS	H/L	Register Select: H:Data Input L:Instruction Input	
5	R/W	H/L	H--Read L--Write	
6	E	H,H-L	Enable Signal	
7	DB0	H/L	Data bus used in 8 bit transfer	
8	DB1	H/L		
9	DB2	H/L		
10	DB3	H/L		
11	DB4	H/L	Data bus for both 4 and 8 bit transfer	
12	DB5	H/L		
13	DB6	H/L		
14	DB7	H/L		
15	BLA	--	BLACKLIGHT +5V	
16	BLK	--	BLACKLIGHT 0V-	

6.0 BLOCK DIAGRAM



7.0 POWER SUPPLY BLOCK DIAGRAM

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

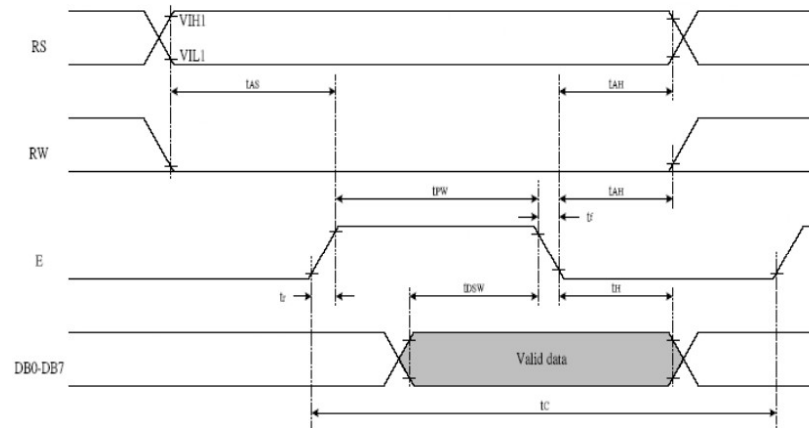


8.0 TIMING CHARACTERISTICS

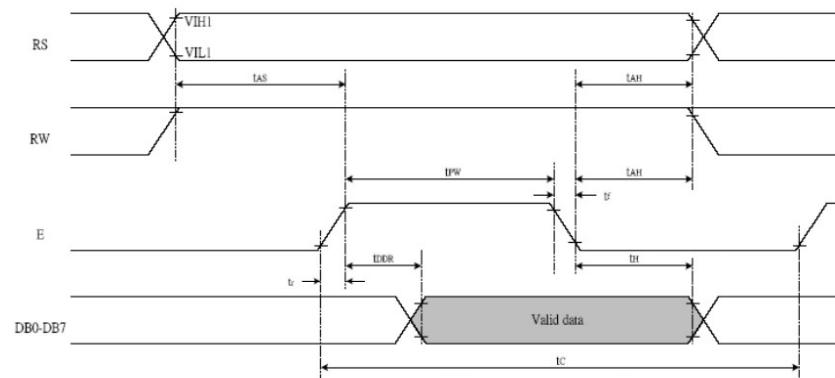
Write Mode (Writing data from MPU to ST7066U)						
T_C	Enable Cycle Time	Pin E	1200	-	-	ns
T_{PW}	Enable Pulse Width	Pin E	140	-	-	ns
T_R, T_F	Enable Rise/Fall Time	Pin E	-	-	25	ns
T_{AS}	Address Setup Time	Pins: RS,RW,E	0	-	-	ns
T_{AH}	Address Hold Time	Pins: RS,RW,E	10	-	-	ns
T_{DSW}	Data Setup Time	Pins: DB0 - DB7	40	-	-	ns
T_H	Data Hold Time	Pins: DB0 - DB7	10	-	-	ns
Read Mode (Reading Data from ST7066U to MPU)						
T_C	Enable Cycle Time	Pin E	1200	-	-	ns
T_{PW}	Enable Pulse Width	Pin E	140	-	-	ns
T_R, T_F	Enable Rise/Fall Time	Pin E	-	-	25	ns
T_{AS}	Address Setup Time	Pins: RS,RW,E	0	-	-	ns
T_{AH}	Address Hold Time	Pins: RS,RW,E	10	-	-	ns
T_{DDR}	Data Setup Time	Pins: DB0 - DB7	-	-	100	ns
T_H	Data Hold Time	Pins: DB0 - DB7	10	-	-	ns

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

● Writing data from MPU to ST7066U



● Reading data from ST7066U to MPU



9.0 Display control instruction

The display control instructions control the internal state of the ST7066U-0A. Instruction is received from MPU to ST7066U-0A for the display control. The following table shows various instructions.

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

There are four categories of instructions that:

- Designate ST7066U functions, such as display format, data length, etc.
- Set internal RAM addresses
- Perform data transfer with internal RAM
- Others

Instruction Table:

Instruction	Instruction Code										Description	Description Time (270KHz)
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
Clear Display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Write "20H" to DDRAM. and set DDRAM address to "00H" from AC	1.52 ms
Return Home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	x	Set DDRAM address to "00H" from AC and return cursor to its original position if shifted. The contents of DDRAM are not changed.	1.52 ms
Entry Mode Set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	Sets cursor move direction and specifies display shift. These operations are performed during data write and read.	37 us
Display ON/OFF	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	D=1:entire display on C=1:cursor on B=1:cursor position on	37 us
Cursor or Display Shift	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	x	x	Set cursor moving and display shift control bit, and the direction, without changing DDRAM data.	37 us
Function Set	0	0	0	0	1	DL	N	F	x	x	DL:interface data is 8/4 bits N:number of line is 2/1 F:font size is 5x11/5x8	37 us
Set CGRAM address	0	0	0	1	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Set CGRAM address in address counter	37 us
Set DDRAM address	0	0	1	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Set DDRAM address in address counter	37 us
Read Busy flag and address	0	1	BF	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Whether during internal operation or not can be known by reading BF. The contents of address counter can also be read.	0 us
Write data to RAM	1	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Write data into internal RAM (DDRAM/CGRAM)	37 us
Read data from RAM	1	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Read data from internal RAM (DDRAM/CGRAM)	37 us

Note:

Be sure the ST7066U is not in the busy state (BF = 0) before sending an instruction from the MPU to the ST7066U. If an instruction is sent without checking the busy flag, the time between the first instruction and next instruction will take much longer than the instruction time itself. Refer to Instruction Table for the list of each instruction execution time.

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

■ Instruction Description

● Clear Display

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Clear all the display data by writing "20H" (space code) to all DDRAM address, and set DDRAM address to "00H" into AC (address counter). Return cursor to the original status, namely, bring the cursor to the left edge on first line of the display. Make entry mode increment (I/D = "1").

● Return Home

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	0	0	0	0	0	1	x

Return Home is cursor return home instruction. Set DDRAM address to "00H" into the address counter. Return cursor to its original site and return display to its original status, if shifted. Contents of DDRAM does not change.

● Entry Mode Set

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S

Set the moving direction of cursor and display.

- **I/D : Increment / decrement of DDRAM address (cursor or blink)**
 When I/D = "High", cursor/blink moves to right and DDRAM address is increased by 1.
 When I/D = "Low", cursor/blink moves to left and DDRAM address is decreased by 1.
 * CGRAM operates the same as DDRAM, when read from or write to CGRAM.
- **S: Shift of entire display**
 When DDRAM read (CGRAM read/write) operation or S = "Low", shift of entire display is not performed. If S = "High" and DDRAM write operation, shift of entire display is performed according to I/D value (I/D = "1" : shift left, I/D = "0" : shift right).

S	I/D	Description
H	H	Shift the display to the left
H	L	Shift the display to the right

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

● Display ON/OFF

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B

Control display/cursor/blink ON/OFF 1 bit register.

- **D : Display ON/OFF control bit**
When D = "High", entire display is turned on.
When D = "Low", display is turned off, but display data is remained in DDRAM.
 - **C : Cursor ON/OFF control bit**
When C = "High", cursor is turned on.
When C = "Low", cursor is disappeared in current display, but I/D register remains its data.
 - **B : Cursor Blink ON/OFF control bit**
When B = "High", cursor blink is on, that performs alternate between all the high data and display character at the cursor position.
When B = "Low", blink is off.
- **Cursor or Display Shift**

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	x	x

Without writing or reading of display data, shift right/left cursor position or display. This instruction is used to correct or search display data. During 2-line mode display, cursor moves to the 2nd line after 40th digit of 1st line. Note that display shift is performed simultaneously in all the line. When displayed data is shifted repeatedly, each line shifted individually. When display shift is performed, the contents of address counter are not changed.

S/C	R/L	Description	AC Value
L	L	Shift cursor to the left	AC=AC-1
L	H	Shift cursor to the right	AC=AC+1
H	L	Shift display to the left. Cursor follows the display shift	AC=AC
H	H	Shift display to the right. Cursor follows the display shift	AC=AC

● Function Set

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	0	1	DL	N	F	x	x

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

- **DL : Interface data length control bit**
When DL = "High", it means 8-bit bus mode with MPU.
When DL = "Low", it means 4-bit bus mode with MPU. So to speak, DL is a signal to select 8-bit or 4-bit bus mode.
When 4-bit bus mode, it needs to transfer 4-bit data by two times.
- **N : Display line number control bit**
When N = "Low", it means 1-line display mode.
When N = "High", 2-line display mode is set.
- **F : Display font type control bit**
When F = "Low", it means 5 x 8 dots format display mode
When F = "High", 5 x 11 dots format display mode.

N	F	No. of Display Lines	Character Font	Duty Factor
L	L	1	5x8	1/8
L	H	1	5x11	1/11
H	x	2	5x8	1/16

- **Set CGRAM Address**

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	0	1	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0

Set CGRAM address to AC.

This instruction makes CGRAM data available from MPU.

- **Set DDRAM Address**

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	0	1	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0

Set DDRAM address to AC.

This instruction makes DDRAM data available from MPU.

When 1-line display mode (N = 0), DDRAM address is from "00H" to "4FH".

In 2-line display mode (N = 1), DDRAM address in the 1st line is from "00H" to "27H", and

DDRAM address in the 2nd line is from "40H" to "67H".

- **Read Busy Flag and Address**

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	0	1	BF	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

When BF = "High", indicates that the internal operation is being processed. So during this time the next instruction cannot be accepted.

The address Counter (AC) stores DDRAM/CGRAM addresses, transferred from IR.

After writing into (reading from) DDRAM/CGRAM, AC is automatically increased (decreased) by 1.

- **Write Data to CGRAM or DDRAM**

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	1	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Write binary 8-bit data to DDRAM/CGRAM.

The selection of RAM from DDRAM, CGRAM, is set by the previous address set instruction : DDRAM address set, CGRAM address set. RAM set instruction can also determine the AC direction to RAM.

After write operation, the address is automatically increased/decreased by 1, according to the entry mode.

- **Read Data from CGRAM or DDRAM**

	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
Code	1	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Read binary 8-bit data from DDRAM/CGRAM.

The selection of RAM is set by the previous address set instruction. If address set instruction of RAM is not performed before this instruction, the data that read first is invalid, because the direction of AC is not determined. If you read RAM data several times without RAM address set instruction before read operation, you can get correct RAM data from the second, but the first data would be incorrect, because there is no time margin to transfer RAM data.

In case of DDRAM read operation, cursor shift instruction plays the same role as DDRAM address set instruction : it also transfer RAM data to output data register. After read operation address counter is automatically increased/decreased by 1 according to the entry mode. After CGRAM read operation, display shift may not be executed correctly.

* In case of RAM write operation, after this AC is increased/decreased by 1 like read operation. In this time, AC indicates the next address position, but you can read only the previous data by read instruction.

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

NO.7066-0A

b7-b4 b3-b0	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
0000	CG RAM (1)			0	8	P	\	P				-	9	E	8	p
0001	(2)			!	1	0	a	a			a	7	7	4	a	q
0010	(3)			"	2	B	R	b	r			r	4	9	x	p
0011	(4)			#	3	C	S	c	s			j	7	f	e	s
0100	(5)			\$	4	D	T	d	t			\	I	t	p	a
0101	(6)			%	5	E	U	e	u			.	7	7	1	c
0110	(7)			&	6	F	V	f	v			7	0	=	3	p
0111	(8)			'	7	G	W	g	w			7	f	x	7	g
1000	(1)			(	8	H	X	h	x			4	7	8	9	f
1001	(2)			)	9	I	Y	i	y			8	7	7	0	1
1010	(3)			*	:	J	Z	j	z			x	0	0	k	j
1011	(4)			+	:	K	L	k	l			x	7	e	0	x
1100	(5)			,	<	L	M	l	m			7	2	7	7	x
1101	(6)			-	=	N	I	n	i			u	x	7	2	k
1110	(7)			.	>	N	^	n	+			3	e	7	7	n
1111	(8)			/	?	O	_	o	+			u	7	7	7	0

SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO., LTD

9. EXTERNAL DIMENSIONS

