

THIAGO LUIZ SALLES BARROS FERREIRA

Determinação do Fator de Potência e Aquisição de Dados utilizando Arduino

Thiago Luiz Salles Barros Ferreira

Determinação de Potência e Aquisição de Dados utilizando Arduino

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo

F383d

Ferreira, Thiago Luiz Salles Barros

Determinação de potência e aquisição de dados utilizando arduino / Thiago Luiz Salles Barros Ferreira. – Guaratinguetá, 2018.

45 f : il.

Bibliografia: f. 44

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo

1. Arduino (Controlador programável). 2. Fator de potência. 3. Detectores

I. Título

CDU 621.381

THIAGO LUIZ SALLES BARROS FERREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof^a. Dr^a. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO
Orientador – UNESP/FEG



Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS
UNESP/FEG



Prof. MSc. EVALDO CHAGAS GOUVÊA
UNESP/FEG

Dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

THIAGO LUIZ SALLES BARROS FERREIRA

NASCIMENTO	18.03.1992 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Celestino Ferreira Analice Salles Barros Ferreira
2011/2018	Curso de Graduação – Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista - UNESP

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre forneceram todo o apoio e estrutura para que eu pudesse me desenvolver, e sempre acreditaram em mim, até nos momentos em que eu mesmo duvidava.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por tudo o que me proporcionaram. Durante minha vida inteira, sempre colocaram meus estudos em primeiro lugar, e sempre me incentivaram a buscar aperfeiçoamento e disponibilizaram todas as ferramentas que eu precisava para o sucesso. Os meus pais sempre foram meu norte, sempre serviram como referência de ética e responsabilidade. Sem eles nada seria possível, e eu não seria nem metade da pessoa que me tornei, e é a eles que eu sou eternamente grato.

Agradeço também ao Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo, pelo auxílio na elaboração deste trabalho, e pela prestatividade em me receber a qualquer momento para me orientar e propor novas ideias.

“Liberdade – essa palavra que o sonho humano alimenta: que não há ninguém que explique, e ninguém que não entenda.”

Cecília Meireles

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um protótipo para medição e monitoramento de grandezas elétricas em tempo real, como corrente, tensão, potência e fator de potência em instalações de 127 V, de até 23 A rms. O protótipo consiste no uso de sensores de tensão, corrente e fase, que enviam informações para a plataforma Arduino, na qual são calculadas as grandezas restantes. Os valores numéricos obtidos são expostos em uma tela de LCD. O projeto também tem por objetivo a aquisição de dados para gerar representações gráficas das formas de onda de tensão e corrente, e o software Excel é utilizado para esta finalidade. Um circuito analógico foi construído para criar os sensores usados no protótipo. Um *software* também foi desenvolvido para a plataforma Arduino, com o objetivo de adquirir os dados gerados pelos sensores e calcular as grandezas desejadas. Os testes apresentados neste trabalho demonstram com sucesso que o protótipo funciona do modo esperado, com uma margem de erro muito pequena quando comparado com instrumentos de medição profissionais.

PALAVRAS-CHAVE: Arduino. Monitoramento. Fator de potência. Sensores. Aquisição de dados. Formas de onda.

ABSTRACT

In this work, a prototype is presented for measuring and monitoring electrical quantities in real time, such as current, voltage, power and power factor in 127 V installations, up to 23 A rms. The prototype consists in using voltage, current and phase sensors that send information to the Arduino platform, in which are calculated the remaining quantities. The numerical values obtained are displayed on a LCD screen. The project also aims to data acquisition in order to generate graphical representations of the voltage and current waveforms, and the software Excel is used in order to accomplish this task. An analog circuit was built in order to create the sensors used in the prototype. A software was also developed for the Arduino platform in order to acquire the data generated by the sensors and to calculate the desired quantities. The tests presented in this work successfully demonstrate that the prototype works as intended, with a very small margin of error when compared to professional measuring instruments.

KEYWORDS: Arduino. Monitoring. Power factor. Sensors. Data acquisition. Waveforms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de geração e transporte de energia.....	18
Figura 2 – Corrente e tensão alternadas	19
Figura 3 – Formas de onda de corrente, tensão e potência para uma carga resistiva	20
Figura 4 – Formas de onda de corrente, tensão e potência para uma carga reativa	21
Figura 5 – Triângulo de potências	22
Figura 6 – Formas de onda de tensão e corrente defasadas.....	23
Figura 7 – Modelos de Arduino disponíveis no mercado	24
Figura 8 – Arduino MEGA 2560	25
Figura 9 – Arduino IDE.....	26
Figura 10 – Modelo do projeto proposto	27
Figura 11 – Aplicação de uma tensão de <i>bias</i> para deslocamento do referencial.....	28
Figura 12 – Obtenção da tensão de <i>bias</i> com divisor de tensão e buffer unitário	29
Figura 13 – Sensor de corrente	30
Figura 14 – Circuito do sensor de corrente	31
Figura 15 – Transformador de tensão	31
Figura 16 – Circuito utilizado para o sensor de tensão.....	32
Figura 17 – Ondas quadradas referentes aos sinais de tensão e corrente	33
Figura 18 – Lógica da porta XOR	33
Figura 19 – Sensor de defasagem.....	34
Figura 20 – Etapas do programa.....	35
Figura 21 - <i>Parallax Data Acquisition tool</i> (PLX-DAQ).....	37
Figura 22 – Formas de onda de tensão e corrente do liquidificador em velocidade 3	40
Figura 23 – Formas de onda de tensão e corrente do ventilador em velocidade 3	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relações entre corrente e tensão para diferentes cargas	20
Quadro 2 – Especificação técnica do Arduino MEGA 2560	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Testes com liquidificador em velocidade 1	38
Tabela 2 – Testes com liquidificador em velocidade 2.....	39
Tabela 3 – Testes com liquidificador em velocidade 3.....	39
Tabela 4 – Testes com ventilador em velocidade 1	40
Tabela 5 – Testes com ventilador em velocidade 2	41
Tabela 6 – Testes com ventilador em velocidade 3	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 QUESTÃO DE PESQUISA	15
1.3 OBJETIVO GERAL.....	15
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 ENERGIA ELÉTRICA E CORRENTE ALTERNADA	16
2.2 RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE COM DIFERENTES CARGAS.....	17
2.3 RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E APARENTE	19
2.4 FATOR DE POTÊNCIA.....	21
2.5 ARDUINO	22
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 MODELO PROPOSTO.....	25
3.2 SENSORES	26
3.3 LÓGICA DO SOFTWARE	33
3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA O EXCEL	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos últimos tempos, tem estado em alta o debate sobre consumo racional de energia, como parte de uma crescente preocupação com sustentabilidade. Isso se deve ao fato de que a maior parte da energia disponível para consumo é originada a partir de fontes não renováveis. O conceito de sustentabilidade prega um conjunto de ideias para desenvolvimento de serviços, produtos e tecnologias que contribuam para diminuir ou até mesmo erradicar os impactos ao meio ambiente.

Em razão das grandes dimensões geográficas e de seu potencial hídrico a matriz energética brasileira tem como principal fonte de produção de energia a energia hidrelétrica (REIS, 2011). O contraponto é que a distância é muito grande entre os locais de consumo e os locais de produção de energia, havendo necessidade de investimento em grandes redes de transmissão de energia elétrica.

A tendência, com o passar do tempo, é que o sistema de geração de energia elétrica fique saturado. Tendo isso em mente, é imprescindível que se aproveite da melhor maneira possível as instalações já existentes, de forma a otimizar o consumo de energia elétrica.

Um dos indicadores de mau aproveitamento de energia é o fator de potência. Um baixo fator de potência indica desperdício de recursos, além de provocar queda de tensão e aquecimento da rede.

Para as concessionárias de energia, afirma-se que o fator de potência é a relação entre as energias reativa e ativa. Essa relação permite verificar se os clientes estão consumindo energia elétrica de forma adequada, monitorando o uso da energia ativa e reativa, sendo este um dos principais indicadores de eficiência energética.

Os custos da energia elétrica também são alterados pelo fator de potência, tanto para os consumidores quanto para os fornecedores. Em grandes instalações, um baixo fator de potência tem consequências aumentadas proporcionalmente à escala do consumo. Para evitar sobrecargas na rede de distribuição de energia, as concessionárias adotam como base que o fator de potência seja maior que 0,92 (ANEEL, 2010), com a preferência de que se aproxime o máximo possível de 1.

Para que o fator de potência de um sistema se aproxime de 1, que é o valor ideal, muitas vezes se faz necessário a prática de correção do fator de potência, que se dá ao fornecer potência reativa de sinal oposto à do sistema que deve ser corrigido. Para tanto, em ambientes

industriais, utilizam-se bancos de capacitores para atuarem no balanceamento dos efeitos indutivos das cargas presentes no sistema, assim como a utilização de máquinas síncronas e conversores estáticos.

A energia reativa indutiva não realiza trabalho, e é apenas armazenada no campo eletromagnético da bobina. Portanto, equipamentos que utilizam bobina, como motores de indução, transformadores e fornos a arco, são responsáveis pela queda do valor do fator de potência do sistema.

Essa energia reativa é, então, devolvida ao gerador, e ocasiona a geração de uma corrente nos cabos de transmissão, o que ocupa sem finalidade a sua capacidade de transmissão, e sobrecarrega o sistema. Se alguma medida de redução da geração de potência reativa, e consequente correção do fator de potência, não for adotada pelos consumidores de energia elétrica, as distribuidoras necessitam superdimensionar o sistema, a fim de atender a demanda.

Para redução da quantidade de energia reativa devolvida à rede distribuidora, as concessionárias passaram a impor aos consumidores comerciais e industriais a observação de um fator de potência superior a 0,92 (ou 92%) (ELETROPAULO, 2018). A não conformidade com essa exigência, e consequente aumento da demanda em ambientes industriais, é passível de penalidade aplicada pela concessionária de energia elétrica.

No caso de ocorrência de altos valores de potência reativa, haverá limitação na transmissão de potência ativa, o que leva a acentuadas quedas de tensão que, por sua vez, gera nas instalações perdas que podem ser em forma de calor ou até mesmo interrupção nos serviços de fornecimento de energia elétrica.

Do ponto de vista matemático, para a correção do fator de potência, tenta-se igualar a potência reativa fornecida por elementos externos, com sinal oposto à potência reativa requerida pelas máquinas, de forma a tornar a potência reativa total igual a zero. Dessa forma, aproxima-se da situação ideal, onde a potência aparente tem o mesmo valor da potência ativa.

O excesso de energia reativa indutiva ocasiona também a subutilização da capacidade instalada, bem como a necessidade de sobredimensionamento de condutores e transformadores para transportar e suprir a mesma potência ativa, e a necessidade de sobredimensionamento de dispositivos de manobra e proteção (SIEMENS, 2016).

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Como pode ser desenvolvido um protótipo de medidor de energia elétrica consumida, desenvolvido utilizando a plataforma Arduino, e capaz de determinar os diferentes componentes de potência, bem como o fator de potência, e apresentar os resultados tanto em tempo real, assim como permitir a aquisição de dados para compartilhamento com o software Excel visando o aprofundamento da análise da energia consumida?

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver o sistema de *hardware* e *software* de um medidor de tensão e corrente utilizando a plataforma Arduino, bem como a criação de uma lógica capaz de analisar os dados obtidos e fornecer em tempo real os valores das potências medidas e o fator de potência, e também fazer a conexão desses dados com o Excel, para a geração de gráficos que facilitem a análise do sistema.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Medir os valores de corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência;
- Ajustar os sensores para melhor aproximação dos resultados obtidos aos valores reais;
- Realizar testes para verificação da precisão do protótipo, comparado a medidores de marcas confiáveis disponíveis no mercado;
- Disponibilizar os valores obtidos para consulta pelo usuário, em display de cristal líquido (LCD) e através de conexão com o computador.

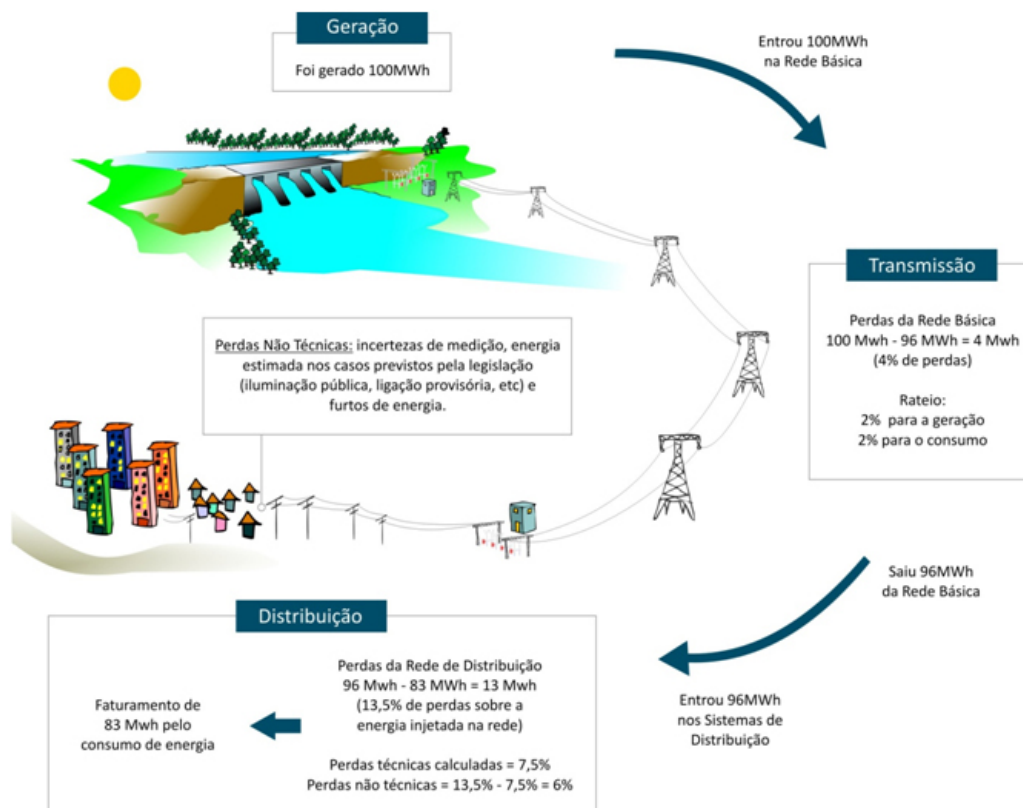
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a compreensão do que significa o fator de potência, bem como da metodologia utilizada para obtê-lo, é primeiramente necessário que se compreenda conceitos fundamentais da eletricidade, tais como corrente, tensão, potência, além da compreensão dos componentes de hardware utilizados no desenvolvimento do projeto.

2.1 ENERGIA ELÉTRICA E CORRENTE ALTERNADA

No Brasil, assim como na maior parte do mundo, a transmissão e distribuição de energia elétrica se dá na maior parte em forma de corrente alternada, e chega até os consumidores com essa mesma forma, ou, em menor escala, em sistemas de transmissão de corrente contínua com valores muito elevados de tensão. No Brasil, a corrente alternada é descrita por uma tensão que varia no tempo de forma senoidal, e com frequência de 60 Hz nos geradores (CREDER, 2013).

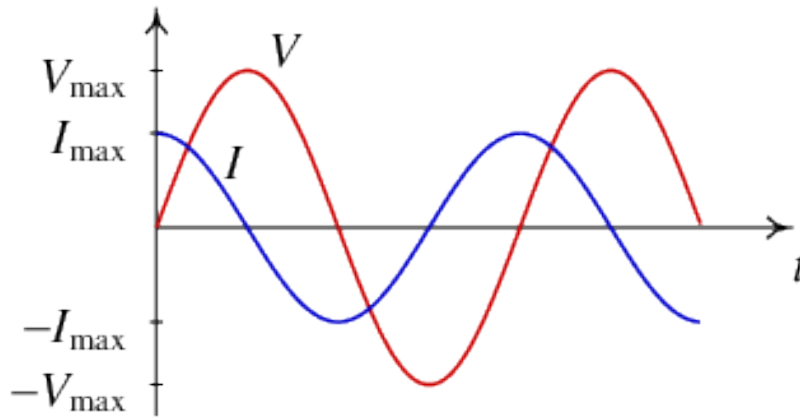
Figura 1 - Etapas de geração e transporte de energia



Fonte: ANEEL (2018)

Quando a tensão alternada é aplicada a uma carga, a corrente gerada e que passa pelo circuito também será uma onda senoidal, como podemos observar na Figura 2.

Figura 2 - Corrente e tensão alternadas



Fonte: FEUP (2018)

2.2 RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE COM DIFERENTES CARGAS

O sistema elétrico não se comporta da mesma forma para todos os tipos de carga. Em uma carga resistiva, por exemplo, toda a potência flui para a carga, e a corrente e tensão estão em fase. Uma análise mais detalhada sobre o comportamento da tensão e da corrente para diferentes tipos de carga é apresentada a seguir.

A partir do gerador, teremos uma força eletromotriz (f.e.m), representada por $v(t)$, que é gerada de forma senoidal e descrita em função do tempo e do ângulo de rotação do gerador, como observado na equação (1) (ALBUQUERQUE, 2007).

$$v(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad [\text{V}], \quad (1)$$

sendo

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}]. \quad (2)$$

As relações de corrente e tensão para os diferentes tipos de carga são definidas conforme exposto no Quadro 1.

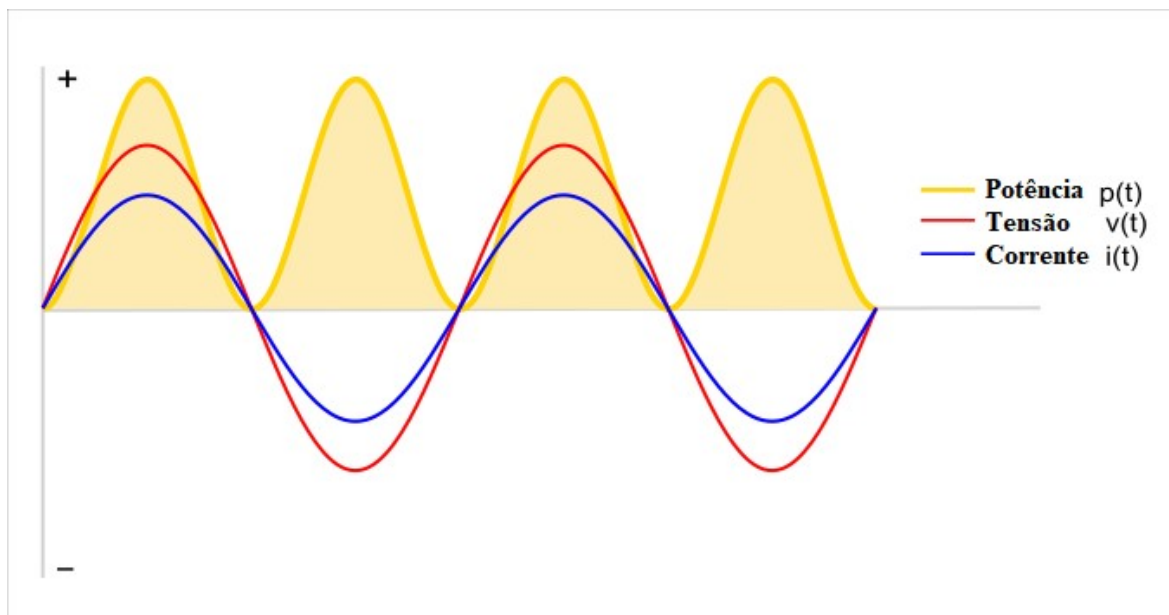
Quadro 1 – Relações entre corrente e tensão para diferentes cargas

Elemento	Tensão nos terminais	Corrente
Resistência – R	$v(t) = R \cdot i(t)$	$i(t) = \frac{v(t)}{R}$
Indutância – L	$v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int v(t) dt$
Capacitância – C	$v(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt$	$i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt}$

Fonte: Edminister; Nahvi (2014)

A Figura 3 apresenta as formas de onda de tensão e corrente para o caso de uma carga puramente resistiva, bem como a forma de onda da potência. Com a tensão sendo representada pela linha vermelha, e a corrente pela linha azul, percebemos que ambas estão em fase. A linha amarela representa a potência que, no caso de carga resistiva, flui totalmente para a carga, e é o resultado da multiplicação entre tensão e corrente.

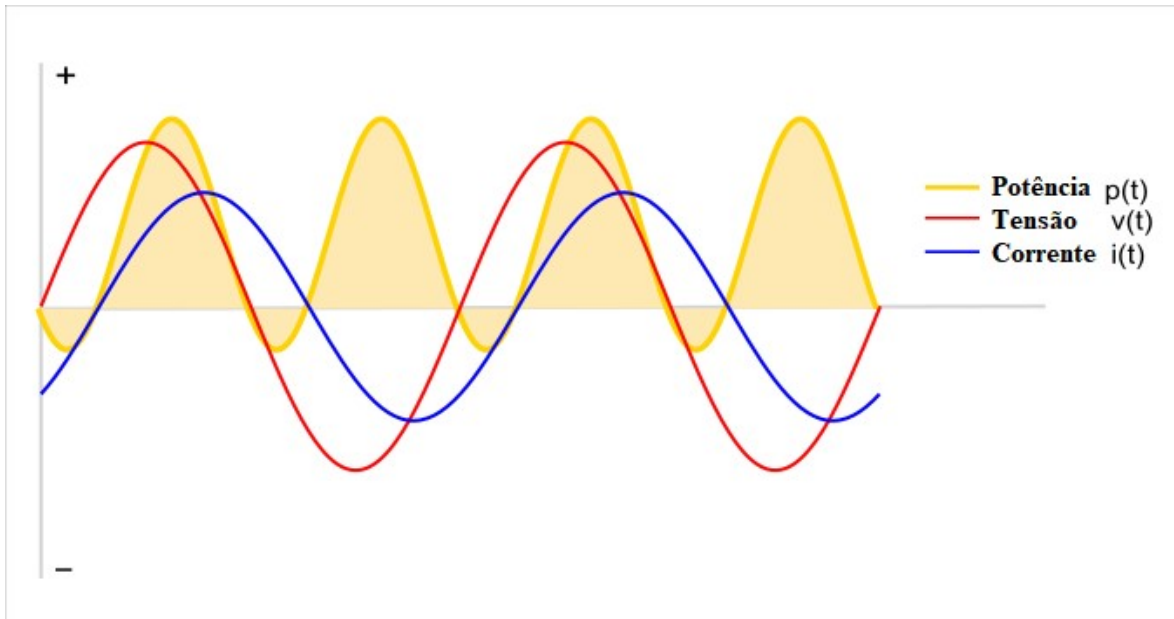
Figura 3 – Formas de onda de corrente, tensão e potência para uma carga resistiva



Fonte: Open Energy Monitor (2018)

Já para o caso de uma carga reativa, teremos as formas de onda representadas na Figura 4. Cargas reativas não têm o funcionamento tão direto quanto as cargas resistivas. Parte da potência aplicada a essas cargas não é transformada em trabalho, e acaba voltando para a rede. Percebemos na figura que corrente e tensão não estão em fase.

Figura 4 – Formas de onda de corrente, tensão e potência para uma carga reativa



Fonte: *Open Energy Monitor* (2018)

Percebe-se também que durante parte do tempo, a potência tem valor positivo, o que indica que está fluindo para a carga, e parte do tempo tem valor negativo, o que indica que está fluindo de volta para a rede.

2.3 RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E APARENTE

Primeiramente, precisamos definir os valores de tensão e corrente eficazes (ou rms – *root mean square*). Esses são obtidos através dos valores de pico de tensão (V) e corrente (I) (ALBUQUERQUE, 2007):

$$V_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}} \text{ [V]} \quad \text{e} \quad I_{ef} = \frac{I}{\sqrt{2}} \text{ [A]} \quad . \quad (3)$$

A partir desses valores, obtemos a potência média, também conhecida como potência aparente, dada pela equação (4) (ALBUQUERQUE, 2007):

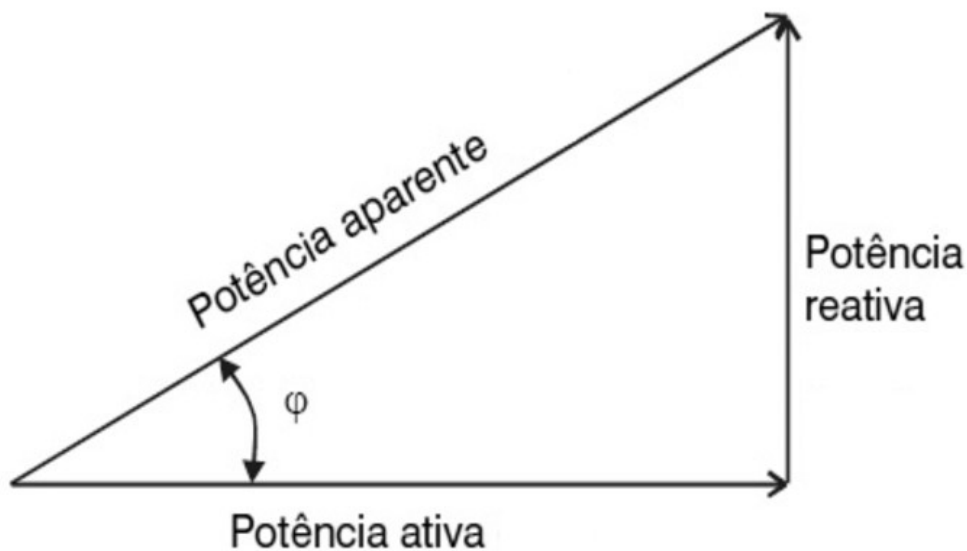
$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I}{\sqrt{2}} = \frac{V \cdot I}{2} \text{ [VA]} \quad . \quad (4)$$

A potência ativa (P) é a potência efetivamente convertida de uma forma elétrica para uma não elétrica. Ou seja, é a potência que realmente é transformada em trabalho (NILSSON; RIEDEL, 2008).

Em circuitos onde é necessário a criação ou manutenção de um campo eletromagnético, como reatores e motores, entra em ação a potência reativa (Q), presente tanto em circuitos indutivos quanto capacitivos. Esta potência circula entre a carga e a fonte, nunca sendo efetivamente transformada em trabalho (NILSSON; RIEDEL, 2008).

Para a análise matemática da potência, adota-se a notação de números complexos. A potência ativa é a parte real, e a potência reativa é a parte imaginária. O conjunto complexo das potências ativa e reativa resultam na potência aparente, ou seja, a potência total absorvida por uma instalação. Na Figura 5 observamos as relações entre as potências, também conhecido como triângulo de potências.

Figura 5 – Triângulo de potências



Fonte: *ResearchGate* (2018)

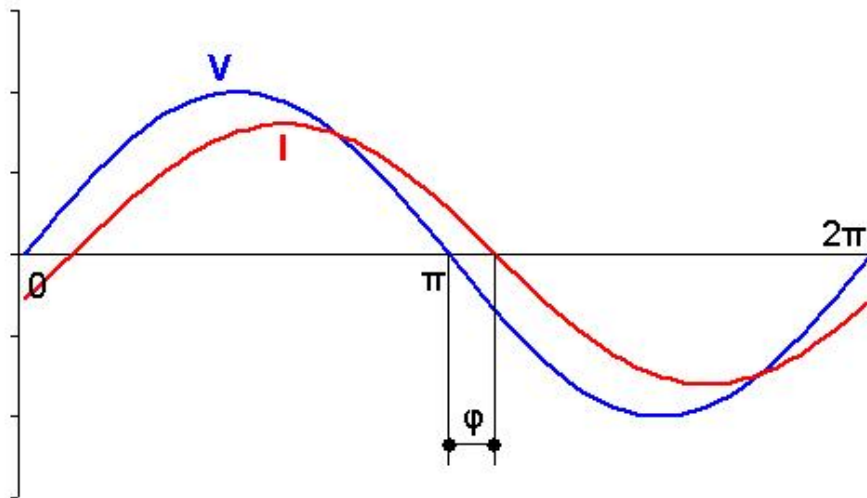
Temos então as expressões das potências ativa e reativa, em função da potência aparente:

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad [W], \quad (5)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad [VAr], \quad (6)$$

onde φ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente, como observado na Figura 6.

Figura 6 – Formas de onda de tensão e corrente defasadas



Fonte: DMESG (2018)

2.4 FATOR DE POTÊNCIA

A energia reativa, que é trocada com o gerador, gera uma corrente no sistema que não realiza trabalho. Essa corrente, que não é aproveitada, se soma à corrente que de fato realiza trabalho, e circula pelo sistema, aumentando a corrente total. Levando em consideração que os condutores têm capacidade limitada, a presença de corrente reativa ocupa capacidade que poderia ser utilizada pela corrente ativa. Como não se deseja sobredimensionar o sistema, surge a necessidade de eliminar os efeitos gerados pela presença da potência reativa.

O fator de potência de deslocamento considera a defasagem entre tensão e corrente na frequência fundamental. Para cargas sem distorção (chamadas de cargas lineares), o fator de potência de deslocamento é numericamente igual ao fator de potência aparente. Como nesta análise serão consideradas apenas cargas lineares, o termo utilizado será apenas fator de potência. A razão entre a potência reativa e potência ativa constitui o fator de potência, que é dado por:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi . \quad (7)$$

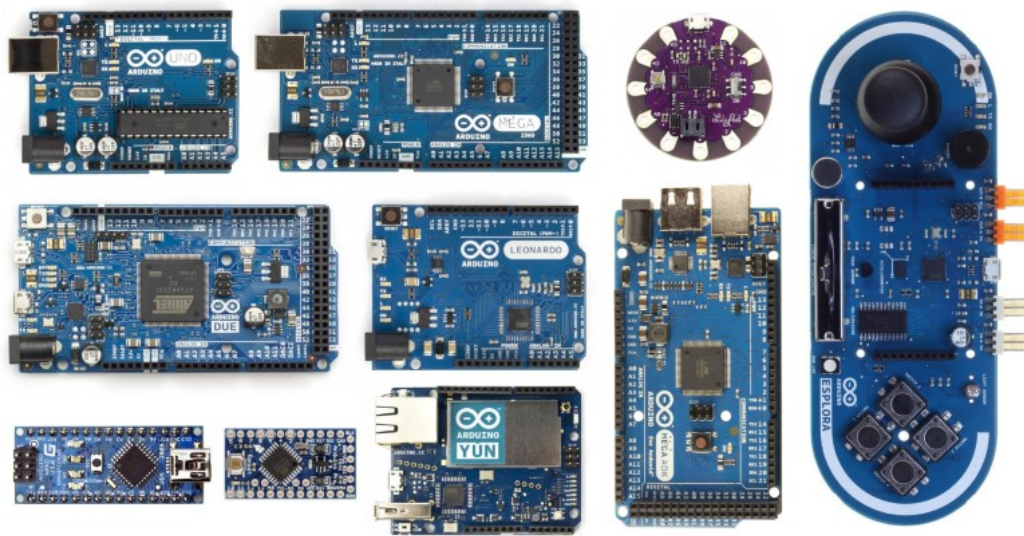
O fator de potência indica quanto da potência aparente é ativa, e pode variar de 0, quando o ângulo de fase for 90°, até 1, quando o ângulo de fase for 0°.

Para corrigir o fator de potência, de forma a aproximá-lo o máximo possível de 1, deve-se eliminar a potência reativa do sistema. É possível, por exemplo, introduzir capacitores paralelamente à carga, fazendo com que a energia reativa fique restringida entre a carga e o capacitor, não sendo devolvida para a rede.

2.5 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de hardware de código aberto, que pode ser programado em linguagem de programação baseada em C/C++. Através do Arduino, é possível programar aplicações que manipulem entradas e saídas, convertendo as medidas físicas desejadas em sinais elétricos para posterior tratamento. No mercado, existem diversos modelos, exemplificados na Figura 7.

Figura 7 – Modelos de Arduino disponíveis no mercado

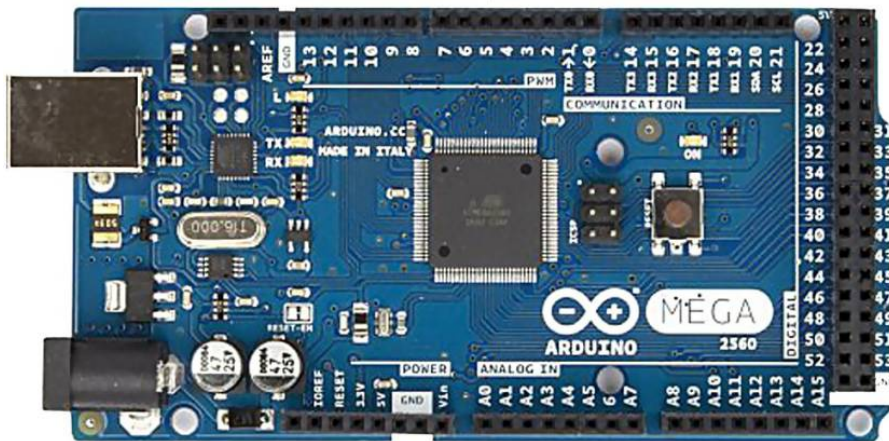


Fonte: FilipeFlop (2018)

O modelo utilizado para este trabalho foi o Arduino MEGA 2560 (Figura 8), que é baseado no microcontrolador ATmega2560. Este modelo conta com 54 pinos de entrada ou saída (I/O) digitais, sendo que 15 dessas podem ser utilizadas como saídas PWM, e 16 pinos para processamento de sinais analógicos.

O microcontrolador conta, ainda, com 4 kB de memória EEPROM, 256 kB de memória flash e 8 kB de memória SRAM. As especificações técnicas do modelo são encontradas no Quadro 2.

Figura 8 – Arduino MEGA 2560



Fonte: FlipKart (2018)

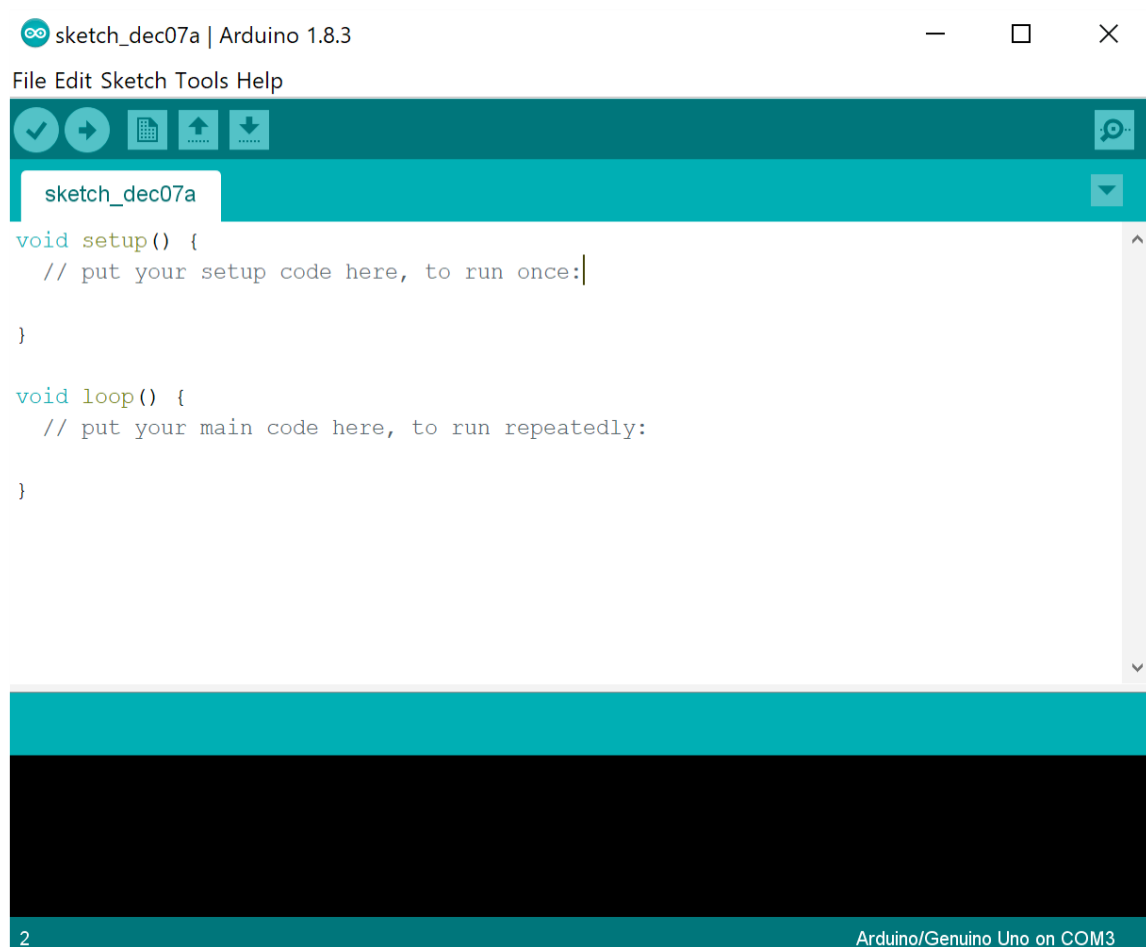
Quadro 2 – Especificação técnica do Arduino MEGA 2560

Item	Especificação
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7 – 12 V
Tensão de entrada (máxima)	6 – 20 V
Pinos I/O digitais	54 (dos quais, 15 podem ser utilizados como saída PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente DC por pino I/O	20 mA
Corrente DC para pino de 3,3 V	50 mA
Memória flash	256 kB (dos quais 8 kB são utilizados pelo bootloader)
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: ARDUINO (2018)

Para a programação necessária, é utilizado o IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino, como exibido na Figura 9. O IDE é uma aplicação em Java, e conta com recursos de realce de sintaxe, indentação automática e parênteses correspondentes. A linguagem de programação utilizada neste ambiente é específica para o Arduino, sendo baseada em C++, e permite compilar e carregar com facilidade os programas desenvolvidos para a placa do microcontrolador.

Figura 9 – Arduino IDE



Fonte: Microsoft (2018)

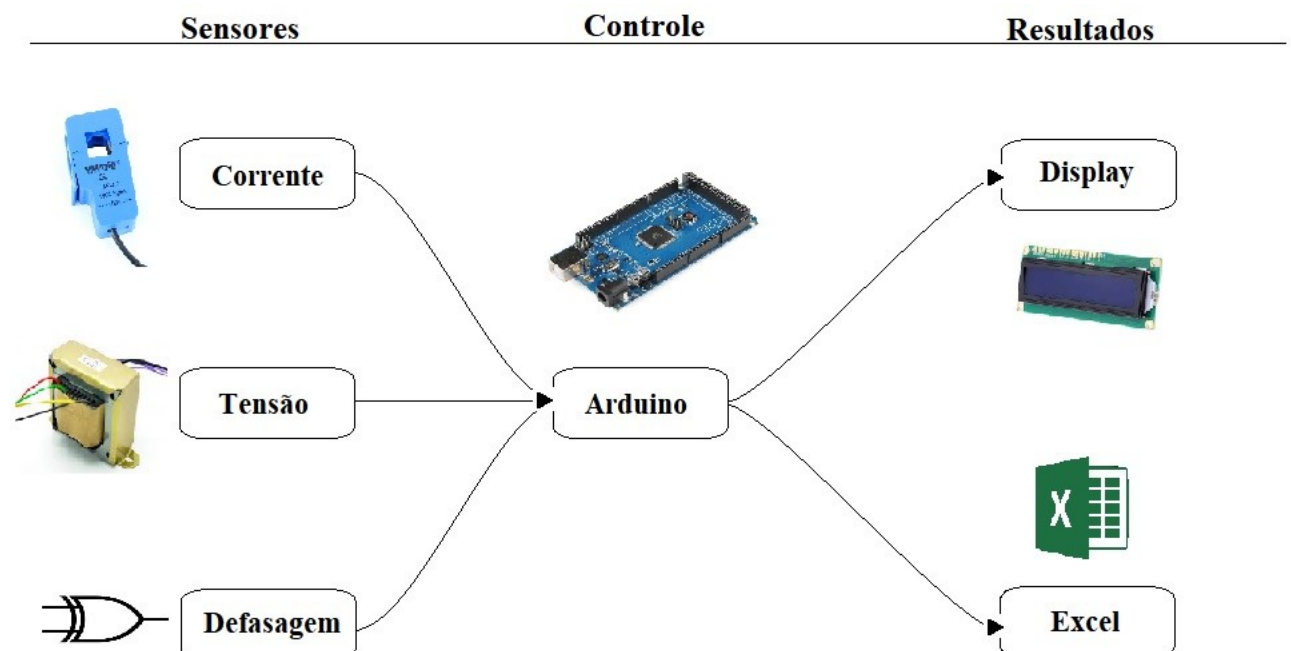
3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os componentes essenciais de *hardware* e *software* necessários para a realização do projeto, bem como a explicação dos procedimentos adotados para se atingir os resultados esperados.

3.1 MODELO PROPOSTO

O protótipo conta, inicialmente, com os sensores necessários para verificação dos valores de tensão, corrente e defasagem de sinais. Estes são os componentes primários de *hardware*, que fornecerão ao Arduino as informações necessárias para que o programa desenvolvido retorne ao usuário os valores desejados. A visualização dos valores será dada por meio de um *display*, e também será possível a visualização das formas de onda por meio da aquisição dos dados por meio do Excel. A Figura 10 esquematiza, resumidamente, a estrutura adotada para o projeto.

Figura 10 – Modelo do projeto proposto

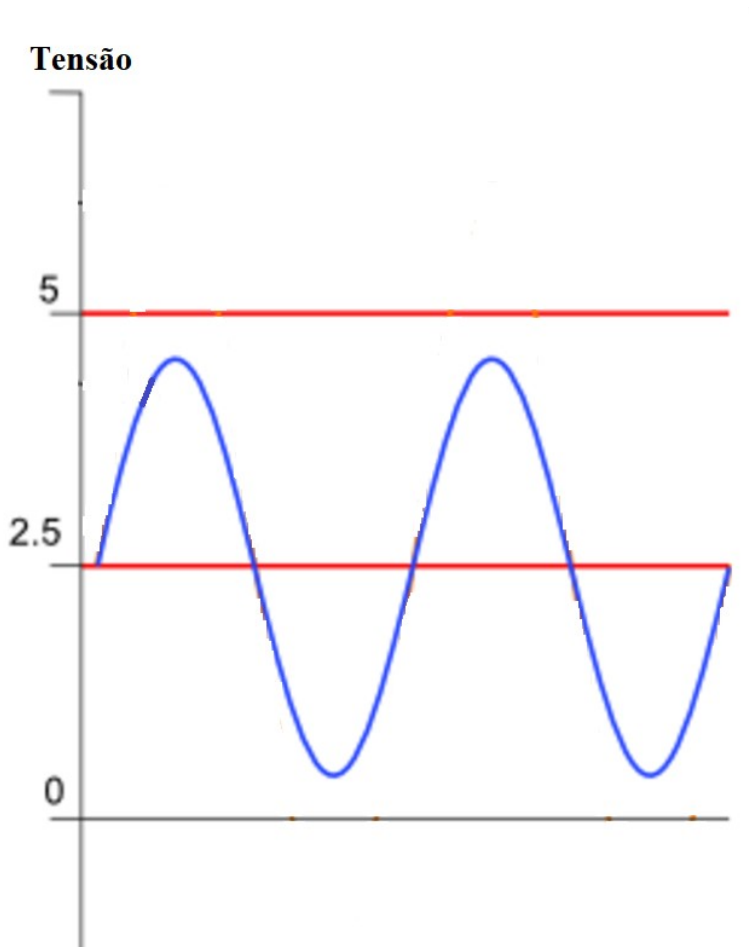


Fonte: Autoria própria

3.2 SENSORES

O Arduino é projetado para trabalhar com tensões de entrada variando de 0 a 5 V positivos. Portanto, primeiramente, deve-se levar em consideração os valores máximos e mínimos que os sinais de entrada dos sensores de tensão e corrente deverão apresentar. Embora a metodologia de projeto para esses sensores seja diferente, o que ambos têm em comum é que a forma de onda é senoidal. Como o Arduino não é capaz de tratar valores negativos, deveremos aplicar uma tensão de *bias* às saídas dos sensores. Isso nada mais é do que alterar o referencial para que as ondas senoidais deixem de ser simétricas em relação ao zero, e passem a ser simétricas em relação à nova tensão escolhida. Levando em consideração os limites inferior e superior de tensão suportadas pelo Arduino, a tensão de *bias* escolhida será de 2,5 V. A Figura 11 exemplifica o resultado do deslocamento do referencial de tensão.

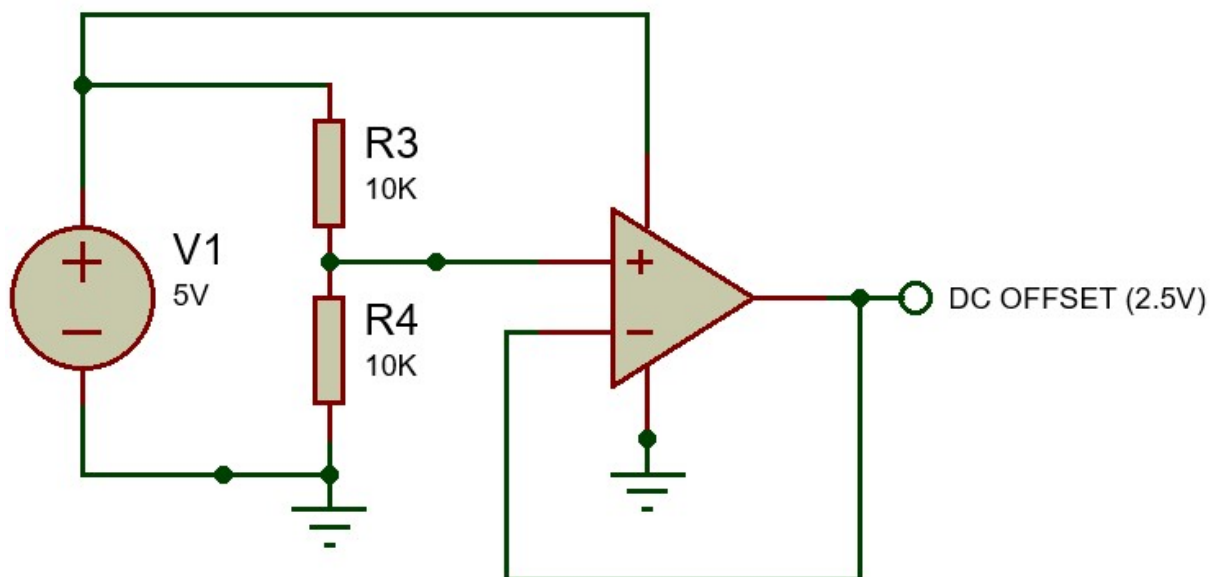
Figura 11 – Aplicação de uma tensão de *bias* para deslocamento do referencial



Fonte: Adaptado de *Open Energy Monitor* (2018)

Para gerar a tensão de 2,5 V que será usada como novo referencial, utiliza-se um pino de 5 V disponível no próprio Arduino. A partir deste ponto, é necessário apenas um divisor de tensão com dois resistores de igual valor para reduzir os 5 V até o valor desejado de 2,5 V. O sinal do divisor de tensão tem unicamente o objetivo de alterar o valor de referência sobre o qual os sinais dos sensores vão atuar. Não é desejável que haja qualquer interferência nos circuitos dos sensores e, portanto, deve-se impedir que haja fluxo de corrente entre o divisor de tensão e os circuitos dos sensores. Para tal finalidade, será aplicado um amplificador operacional com a função de *buffer* unitário, de forma a fazer proveito da alta impedância de entrada que lhes é característica, e isolar as duas etapas do circuito. A Figura 12 apresenta o modelo utilizado para a obtenção da tensão de *bias*.

Figura 12 – Obtenção da tensão de *bias* com divisor de tensão e *buffer* unitário



Fonte: Autoria própria

Para a obtenção dos valores de corrente foi utilizado o sensor não invasivo SCT013-000, cuja capacidade é de medições de até 100 A. O sensor é mostrado na Figura 13.

O sensor em questão é um transformador de corrente (TC), sendo que não há contato direto entre o sensor e a rede. Envolve-se o sensor no cabo que conduz a corrente a ser medida, e isso faz com que haja indução de corrente nos enrolamentos do sensor. Segundo o *datasheet* do fabricante, ao submeter o sensor a uma corrente de 100 A, será gerada uma corrente induzida de 50 mA rms, ou seja, uma relação de transformação de 2000.

Figura 13 – Sensor de corrente



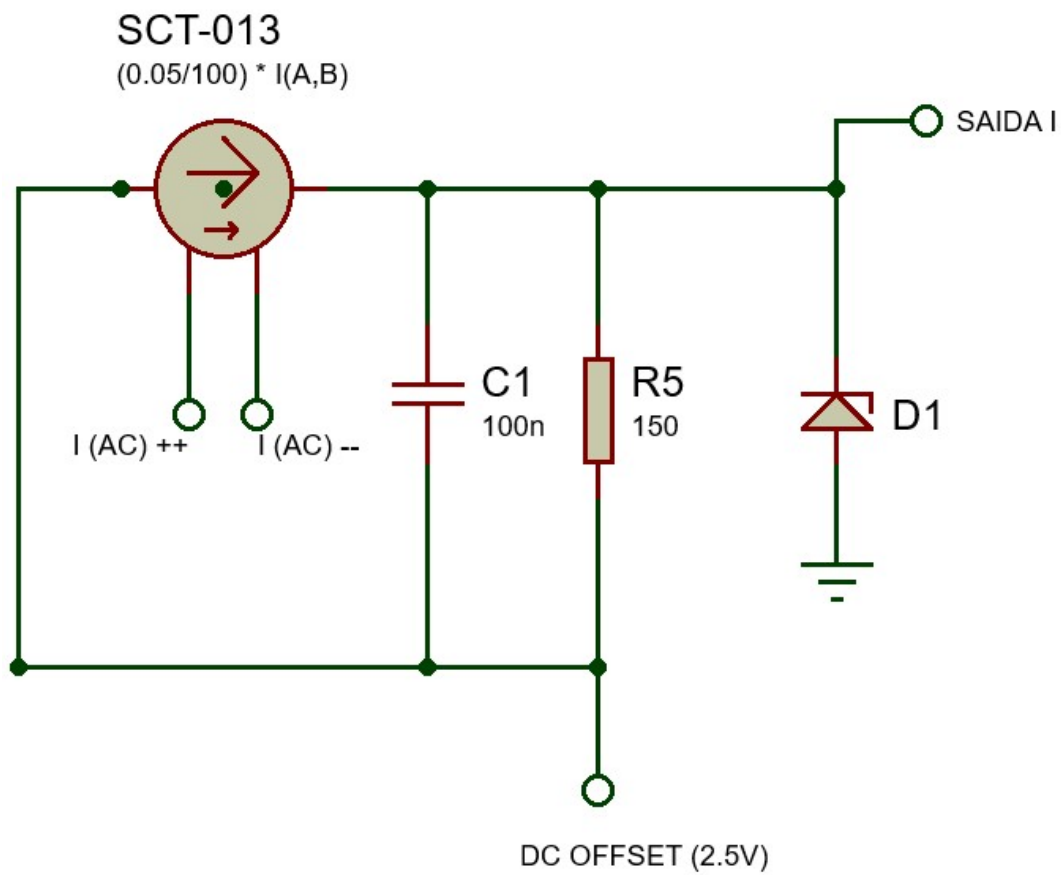
Fonte: FilipeFlop (2018)

Como o Arduino trabalha com valores de tensão, e não corrente, será utilizado um resistor de *burden* (também chamado de resistor de carga). A corrente elétrica que é gerada pelo sensor gera uma queda de tensão no resistor, que é justamente o valor que será utilizado. Como os valores alternados apresentam valores negativos, é aplicada neste circuito a tensão de *bias*. Com o valor central do sinal senoidal de tensão situado em 2,5 V, deve-se projetar o resistor de *burden* para que a tensão medida seja de 5 V pico a pico, de modo a ter seu valor máximo em 5 V e o valor mínimo em 0 V.

Para aumentar a precisão da leitura, o resistor de *burden* não é calculado com base no valor de 100 A, que é o máximo permitido pelo sensor. O circuito será projetado, então, para o valor de 20 A rms, ou valor de pico de 28,28 A. Levando em consideração a relação de transformação (2000 espiras), tem-se que a corrente máxima no sensor será de 0,01414 A. Como deseja-se que a tensão no resistor tenha um valor de pico de 2,5 V, para que atinja 5 V com a ação da tensão de *bias*, o resistor pelo qual a corrente do sensor irá passar deve ter o valor de 176 Ω . O valor disponível mais próximo foi de 150 Ω , o que corresponde a uma capacidade de medição de até 23 A rms, o que não está muito distante do objetivo inicial.

Na Figura 14 é apresentado o circuito utilizado para obtenção dos valores de corrente, com a adição de um capacitor de 100 nF para atenuação de ruídos, e um diodo Zener de 5,1 V para a proteção do Arduino contra eventuais picos de tensão.

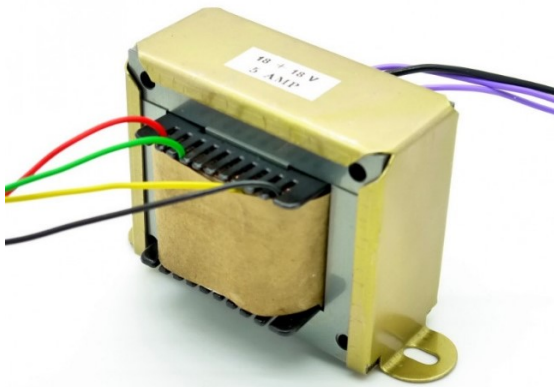
Figura 14 – Circuito do sensor de corrente



Fonte: Autoria própria

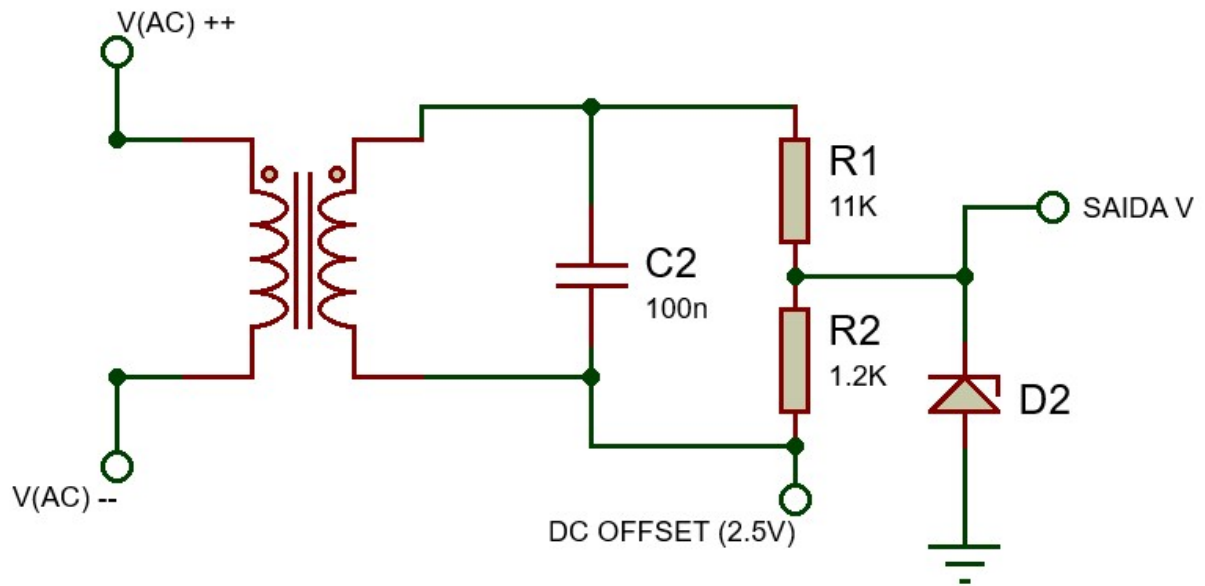
Para o sensor de tensão, é necessário, primeiramente, reduzir o valor de 127 V rms proveniente da rede. Para isso, é utilizado um transformador, como o da Figura 15, para obter uma tensão de 18 V rms.

Figura 15 – Transformador de tensão



Fonte: Multcomercial (2018)

Figura 16 – Circuito utilizado para o sensor de tensão



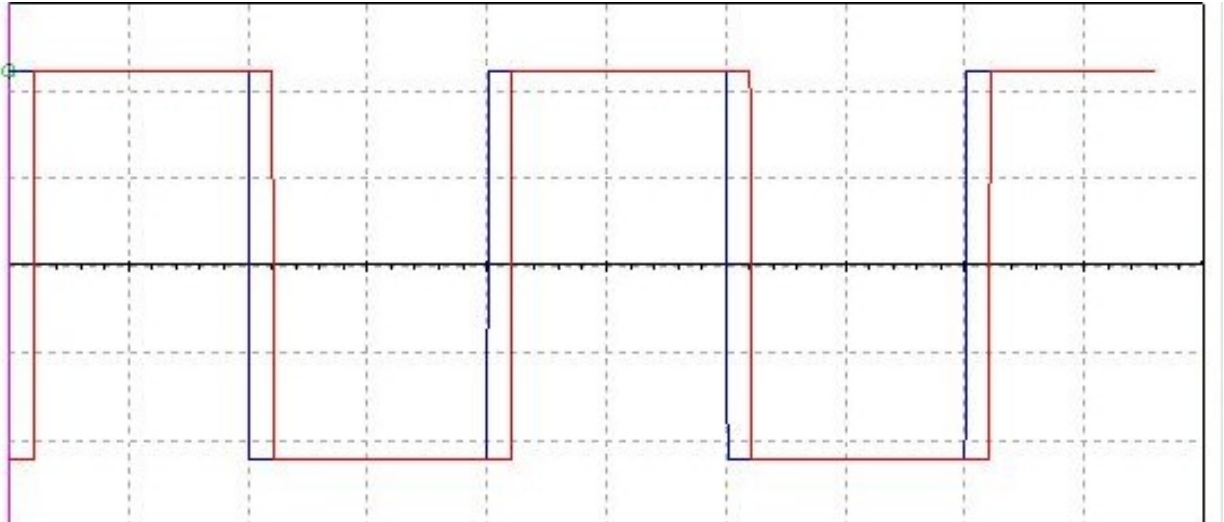
Fonte: Autoria própria

No secundário do transformador, é introduzido um capacitor de desacoplamento de 100 nF, cujo objetivo é atuar como filtro para eliminar componentes de alta frequência do sinal. Essa tensão do secundário é, então, aplicada a um divisor de tensão, cuja relação é de $1,2 \text{ k}\Omega / (1,2 \text{ k}\Omega + 11 \text{ k}\Omega)$, o que resulta em uma tensão de 1,76 V rms, ou 2,48 V pico. Somada à tensão de saída do divisor de tensão, a tensão de *bias* faz com que o sinal oscile entre valores de 0 V e 5 V, da forma que é necessário para o correto funcionamento do Arduino. Assim como anteriormente, é aplicado um diodo Zener de 5,1 V para como forma de proteção caso os valores de tensão da rede ultrapassem os limites para o qual o circuito foi projetado. O esquemático do sensor de tensão é apresentado na Figura 16.

Para a determinação do fator de potência, utiliza-se um sensor de defasagem, que detecta quando os sinais de tensão e corrente atingem o valor zero, migrando de valores positivos para negativos, e vice-versa.

Para detectar a transição no sinal dos valores de tensão e corrente, utiliza-se um amplificador operacional configurado como comparador, cuja tensão de comparação é 0 V. Quando o sinal senoidal encontra-se no semiciclo negativo, o comparador gera um sinal DC negativo, e quando o sinal senoidal é positivo, o comparador gera um sinal DC positivo. Isso resulta em duas formas de onda quadradas, que representam os semiciclos dos sinais de tensão e corrente, como exposto na Figura 17.

Figura 17 – Ondas quadradas referentes aos sinais de tensão e corrente



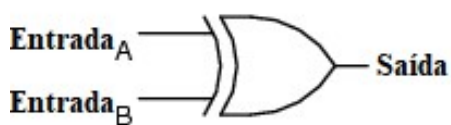
Fonte: *Instructables* (2018)

Essas duas ondas quadradas são aplicadas a uma porta lógica XOR (*exclusive-OR*), cuja lógica de operação é apresentada na Figura 18.

Sendo assim, a porta XOR terá como saída um pulso DC de 5V somente quando as duas ondas quadradas não estiverem sobrepostas. Quando as ondas quadradas forem coincidentes, a saída da porta XOR será 0 V.

Figura 18 – Lógica da porta XOR

Porta XOR

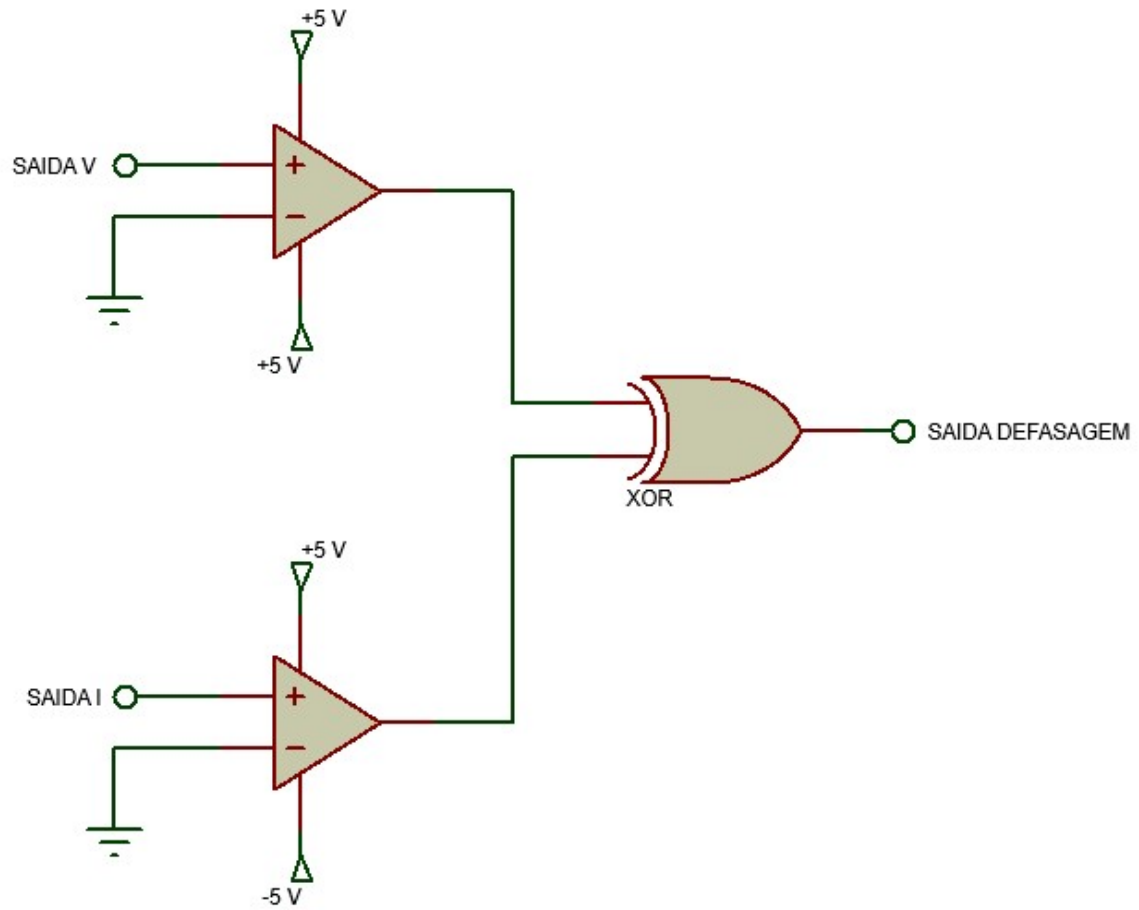


A	B	Saída
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fonte: *All About Circuits* (2018)

O circuito completo do sensor de defasagem é exposto na Figura 19.

Figura 19 – Sensor de defasagem

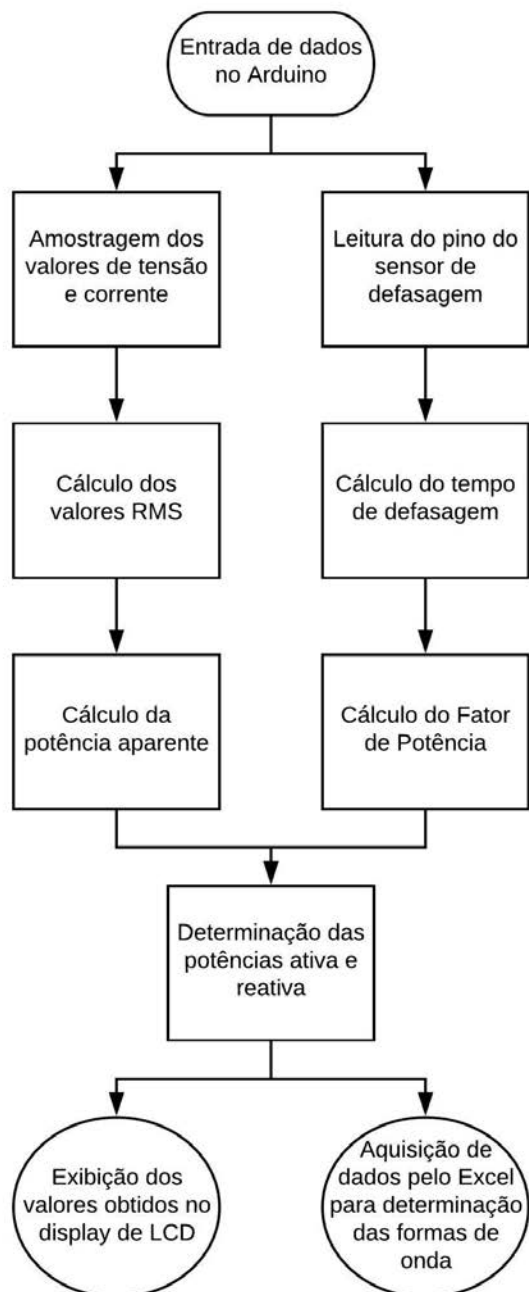


Fonte : Autoria própria

3.3 LÓGICA DO SOFTWARE

O programa desenvolvido para controle do Arduino segue a lógica apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Etapas do programa



Fonte: Autoria própria

O programa inicia a aquisição de dados por meio da amostragem de valores de tensão e corrente. Para a determinação dos valores eficazes (rms), utiliza-se no programa a lógica baseada na equação (8), que demonstra o cálculo para valores de tensão eficaz.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_N^2}{N}} \quad (8)$$

Onde os valores de tensão utilizados para o cálculo são instantâneos e obtidos pelo sensor. Para obtenção dos valores eficazes de corrente, segue-se a mesma lógica da equação (8).

Para obtenção dos valores reais de tensão e corrente, deve-se levar em consideração todos os cálculos efetuados na seção anterior para dimensionamento do circuito analógico, e proceder dentro do programa com o caminho inverso de cálculos.

Em posse dos valores eficazes de tensão e corrente, podemos calcular a potência aparente, utilizando a equação (4).

Para obtenção do fator de potência, utiliza-se os resultados do circuito analógico do sensor de defasagem. Por meio do programa, pode-se definir o período de tempo em que o sinal proveniente da porta XOR permanece em nível de 5 V. O ângulo de defasagem é, então, dado pela equação (9).

$$\varphi = f \cdot \Delta t \cdot 360 \quad (9)$$

Onde f é a frequência do sinal oferecido pela rede, Δt é o intervalo de tempo em que a tensão e a corrente têm sinais opostos, e 360 é o fator de conversão para obter o valor em graus. A partir do valor do ângulo de defasagem, o programa pode calcular o fator de potência.

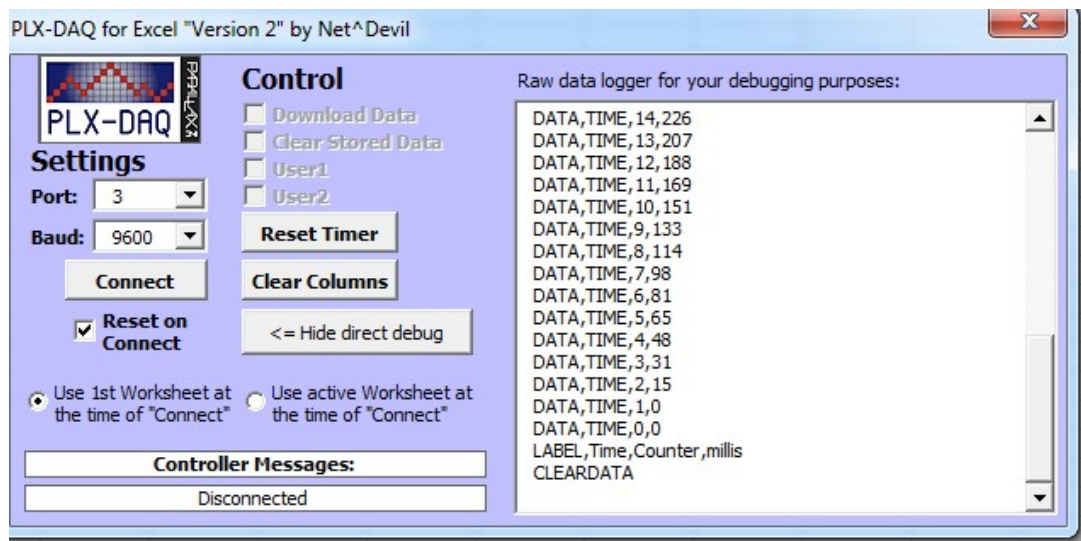
Com os valores de tensão, corrente, potência aparente e fator de potência, implementa-se uma lógica simples no programa para o cálculo das potências ativa e reativa.

3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA O EXCEL

Para obter os dados e transferi-los para o Excel, de forma a determinar as formas de onda de tensão e corrente, utiliza-se o *software Parallax Data Acquisition tool* (PLX-DAQ). Os valores amostrados pelo protótipo são aquisitados pelo software e distribuídos em uma

coluna na planilha do Excel. Um limitante é que o *software* pode ser utilizado apenas por aproximadamente 10 segundo, para que não haja uma sobrecarga de dados coletados sendo transferidos para o Excel. Entretanto, essa limitação não apresenta uma restrição prática na qualidade das formas de onda obtidas, visto que 10 segundos são mais que suficientes, levando em consideração a alta frequência de amostragem do protótipo. O *software* PLX-DAQ é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - *Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)*



Fonte: *Freebie Base* (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes com o protótipo. Foram utilizados equipamentos domésticos comuns, com o objetivo de comparar os valores apresentados pelo protótipo com os valores obtidos a partir de instrumentos de medição comerciais. Todos os equipamentos foram conectados diretamente à rede, sem qualquer tratamento quanto a ruídos e distorções.

Os seguintes equipamentos foram utilizados para a realização dos testes:

- Liquidificador Philips Walita, modelo Daily com 3 Velocidades, 500 W;
- Ventilador Arno, modelo Silence Force VF40 com 3 velocidades, 106 W;

Para comparação e verificação de resultados, foi utilizado o wattímetro digital da marca Politerm, modelo POL-64, com resolução de 0,1 V de tensão AC, 10 mA de corrente AC, 1 W de potência ativa AC e 0,01 de fator de potência.

Durante os testes com o wattímetro digital, foram obtidos os valores de tensão, corrente, potência ativa e fator de potência. Em posse desses valores, foram calculados, segundo as fórmulas apresentadas anteriormente, os valores de potência aparente e potência reativa. Para todos os testes, serão calculados os erros baseado no fator de potência medido pelo wattímetro digital, em comparação com o valor medido pelo protótipo.

O primeiro teste foi feito com o liquidificador, utilizando as três velocidades disponíveis. Os resultados são apresentados a seguir:

Tabela 1 – Testes com liquidificador em velocidade 1

Instrumento de medição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Aparente – S (VA)	Potência Ativa – P (W)	Potência Reativa – Q (VAr)	Fator de Potência - FP
Wattímetro digital	124,00	2,40	297,61	250,00	161,47	0,84
Protótipo	124,60	2,47	307,31	249,00	180,11	0,81

Fonte: Autoria própria

Neste primeiro teste, o valor do fator de potência medido pelo wattímetro digital é de 0,84, enquanto que o valor apresentado pelo protótipo é de 0,81. Isso representa um desvio de 3,57% da medida do protótipo em relação à medida do wattímetro.

Tabela 2 – Testes com liquidificador em velocidade 2

Instrumento de medição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Aparente – S (VA)	Potência Ativa – P (W)	Potência Reativa – Q (VAr)	Fator de Potência - FP
Wattímetro digital	124,00	3,10	384,40	298,00	242,81	0,77
Protótipo	124,50	3,22	401,33	301,00	265,45	0,75

Fonte: Autoria própria

Neste teste, o erro apresentado pelo protótipo é de 2,59% em relação ao valor apresentado pelo wattímetro.

Tabela 3 – Testes com liquidificador em velocidade 3

Instrumento de medição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Aparente – S (VA)	Potência Ativa – P (W)	Potência Reativa – Q (VAr)	Fator de Potência - FP
Alicate Wattímetro	124,00	3,40	421,60	317,00	277,95	0,75
Protótipo	124,50	3,48	433,78	321,00	291,76	0,74

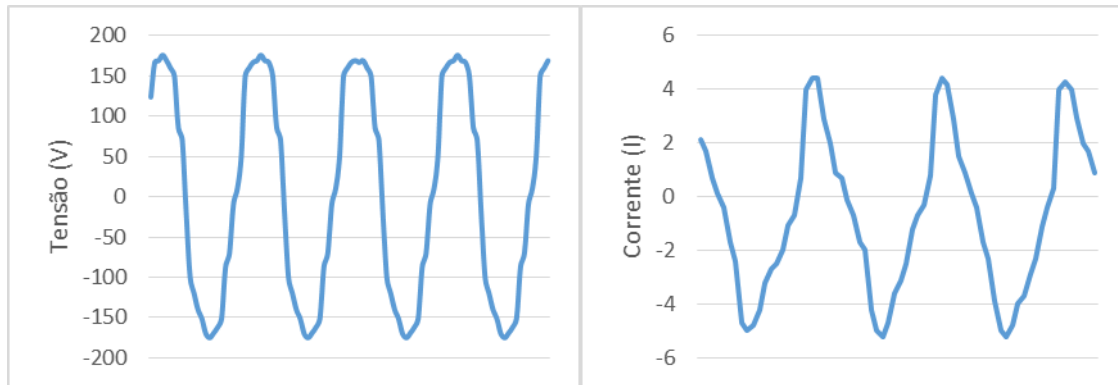
Fonte: Autoria própria

No último teste com o liquidificador, o desvio do valor do fator de potência obtido pelo protótipo é de 1,35%.

É importante observar que, durante os testes, os valores medidos não são estáticos em relação ao tempo. Foram escolhidos, portanto, os valores que aparentavam ser mais consistentes. Foi observado que, à medida que a corrente aumenta, os valores de fator de potência do protótipo se aproximam cada vez mais dos valores medidos com o wattímetro digital, o que diminui o erro calculado.

Ainda utilizando a terceira velocidade do liquidificador, foi realizado o teste de aquisição de dados pelo Excel para visualização em forma gráfica das formas de onda de tensão e corrente. O resultado é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Formas de onda de tensão e corrente do liquidificador em velocidade 3



Fonte: Autoria própria

Dada a alta carga de informação transferida do protótipo para o Excel, nos deparamos com limitações de processamento por parte do *software* utilizado. Sendo assim, não foi possível realizar a aquisição dos dados de tensão e corrente simultaneamente, fazendo-se necessário a realização do teste em duas etapas. Ainda devido ao grande volume de dados, as curvas apresentam algumas irregularidades, sendo necessário a suavização dos traçados, obtida através de manipulações no próprio Excel.

O próximo teste foi realizado com o ventilador, também com as três velocidades disponíveis.

Tabela 4 – Testes com ventilador em velocidade 1

Instrumento de medição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Aparente – S (VA)	Potência Ativa – P (W)	Potência Reativa – Q (VAr)	Fator de Potência - FP
Wattímetro digital	124,00	0,96	119,04	85,00	83,34	0,71
Protótipo	124,60	1,04	129,41	88,00	94,88	0,68

Fonte: Autoria própria

Para o primeiro teste realizado com o ventilador, o erro percentual em relação à medida do wattímetro foi de 4,22%.

Tabela 5 – Testes com ventilador em velocidade 2

Instrumento de medição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Aparente – S (VA)	Potência Ativa – P (W)	Potência Reativa – Q (VAr)	Fator de Potência - FP
Wattímetro digital	124,00	1,09	134,80	93,00	97,58	0,69
Protótipo	124,60	1,15	143,28	96,00	106,36	0,67

Fonte: Autoria própria

Já o teste na segunda velocidade do ventilador apresentou um erro de 2,89%. Percebemos novamente a tendência de diminuição do erro com o aumento da corrente utilizada pelo equipamento, embora a diferença das correntes deste e do primeiro teste não seja tão significativa.

Tabela 6 – Testes com ventilador em velocidade 3

Instrumento de medição	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Aparente – S (VA)	Potência Ativa – P (W)	Potência Reativa – Q (VAr)	Fator de Potência - FP
Wattímetro digital	124,00	1,21	150,00	99,00	112,68	0,66
Protótipo	124,50	1,30	162,5	104,00	128,20	0,64

Fonte: Autoria própria

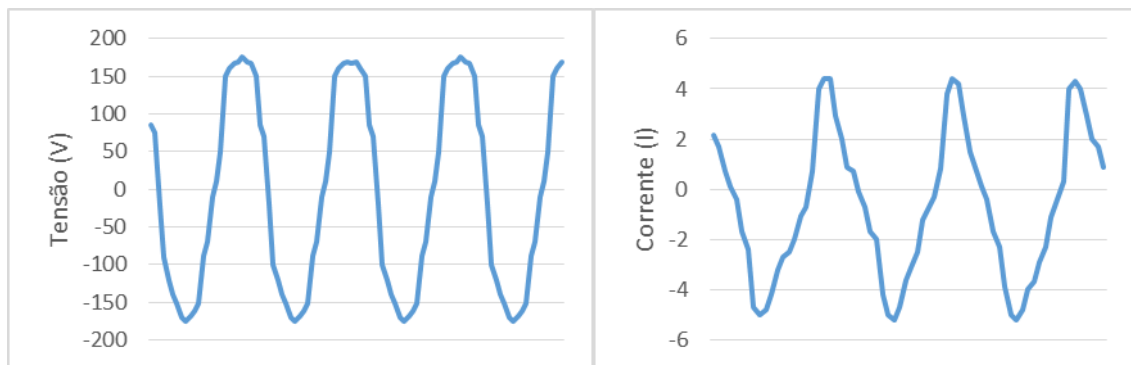
Já no teste com a velocidade mais alta do ventilador, obteve-se um erro de 3,03%. Apesar do aparente aumento do erro, vale frisar que a diferença entre o fator de potência obtido pelo wattímetro e o valor obtido pelo protótipo é de apenas 0,02. Ou seja, a diferença absoluta entre os valores permanece igual à do teste anterior.

Para este teste, uma observação se torna pertinente. Foi essencial a decisão de diminuir o *range* de medição de corrente para 23 A, como visto anteriormente. O Arduino discretiza os valores recebidos pela porta analógica, atribuindo valores de 0 a 1023 aos dados adquiridos. Portanto, caso fosse utilizado o *range* de 100 A possível para sensor de corrente, o incremento de corrente medida seria mais elevado, prejudicando a resolução do sensor. Como neste teste

trabalhou-se com correntes de menor magnitude, a resolução do sensor é essencial para obtenção de dados mais precisos.

O teste de aquisição de dados de forma gráfica com o Excel foi realizado com o ventilador em máxima velocidade. Mais uma vez, o traçado foi suavizado, a fim de melhorar a visualização, como observamos na Figura 23.

Figura 23 – Formas de onda de tensão e corrente do ventilador em velocidade 3



Fonte: Autoria própria

Uma observação importante de lembrar é que neste projeto não são levadas em consideração as distorções harmônicas nos sinais obtidos. Tais distorções influenciam nos valores obtidos de potência e fator de potência.

5 CONCLUSÃO

O processo de desenvolvimento do protótipo, apesar de satisfatório e educativo, não ocorreu sem seus imprevistos, fazendo com que fossem necessárias algumas alterações. A princípio, os resultados obtidos apresentaram desvios de valores maiores do que os resultados finais. No decorrer do projeto, foram feitas alterações de *hardware* para melhor aproveitamento dos sensores. Além disso, ao tornar o programa mais rápido e eficiente, foram obtidos, também, resultados mais precisos com o protótipo. Ao obter desvios menores do que 5%, foi possível provar que é possível utilizar o Arduino, de maneira eficaz, como substituto a medidores convencionais. Tal precisão nos resultados torna o protótipo com Arduino uma poderosa ferramenta. Isso porque o microcontrolador ainda permite diversas expansões, de acordo com a necessidade para qual ele será aplicado. Pode-se, por exemplo, controlar múltiplos bancos de capacitores de acordo com o valor do fator de potência ou, ainda, fazer uma transmissão de dados via *wi-fi* para monitoramento remoto. Portanto, com este protótipo como base, e o acréscimo de alguns itens de *hardware* e alguns blocos de código de programação, pode-se obter um produto extremamente versátil.

O objetivo inicial do projeto era produzir um protótipo capaz de fazer medições dos valores de tensão, corrente, potências e fator de potência de maneira precisa e em tempo real, além de propor uma solução para aquisição dos dados e visualização dos mesmos em forma gráfica. O projeto foi dividido em módulos, sendo eles: módulo de sensores, módulo de tratamento de dados, e módulo de transferência de dados para o computador. O desafio não foi apenas de fazer com que cada módulo funcionasse corretamente, e sim de fazer com que fossem interpretados pelos outros módulos e funcionassem em sincronia sem interferir nas funções dos demais.

Por fim, pode-se dizer que o protótipo superou as expectativas quanto à precisão dos valores numéricos obtidos. Entretanto, as limitações encontradas na etapa de aquisição de dados para análise gráfica fazem com que os resultados visuais obtidos não sejam suficientemente confiáveis. Para um resultado mais otimizado seria necessária uma solução diferente de aquisição de dados, por meio de um *software* capaz de processar o grande volume de dados fornecido pelo protótipo. Como proposta para aprimoramento do protótipo, um trabalho futuro poderia incluir uma análise mais aprofundada dos sinais obtidos, levando em consideração as distorções harmônicas presentes nos sinais. Outra proposta seria a implementação de bancos de capacitores controlados pelo Arduino em função dos valores de fator de potência obtidos, a fim de corrigir os valores e aproximá-los do valor unitário.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, R. O. **Análise de circuitos em corrente alternada**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2007. 240 p.
- ALL ABOUT CIRCUITS. **Multiple input gates**. 2018. Disponível em <<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-3/multiple-input-gates>>. Acesso em: 05 out. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Condições gerais de fornecimento de energia elétrica**. 2010. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2018.
- ARDUINO. **Arduino Pin Mapping**. 2018. Disponível em <<https://www.arduino.cc/en/Hacking/PinMapping2560>>. Acesso em: 01 out. 2018.
- CREDER, H. **Instalações elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 494 p.
- DMESG. **Fator de potência indutivo**. 2016. Disponível em <<https://www.dmesg.com.br/wp-content/uploads/2016/12>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- EDMINISTER, J. A.; NAHVI, M. **Circuitos elétricos**. 5.ed. São Paulo: Bookman, 2014. 504p.
- ELETROPAULO. **Energia reativa**. 2018. Disponível em: <<https://www.eletropaulo.com.br/poder-publico/sobre-energia/conteudo/energia-reativa>>. Acesso em: 17 out. 2018.
- FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO (FEUP). **Circuitos de corrente alternada**. 2015. Disponível em <https://def.fe.up.pt/eletricidade/img/prob_graficos_ca_320.png>. Acesso em: 04 out. 2018.
- FILIPEFLOP. **Medidor de corrente não invasivo com Arduino**. 2015. Disponível em <<https://www.filipeflop.com/blog/medidor-de-corrente-sct013-com-arduino>>. Acesso em: 05 out. 2018.
- FLIPKART. **Arduino Mega 2560**. 2018. Disponível em <<https://www.flipkart.com/revert-mart-arduino-mega-2560>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- FREEBIE BASE. **PLX-DAQ**. 2018. Disponível em <http://www.freebie-base.de/Pics/PLX_DAQ_v2.png>. Acesso em: 10 out 2018.
- INSTRUCTABLES. **How to measure AC power fator using Arduino**. 2017. Disponível em <<https://www.instructables.com/id/How-Measure-AC-Power-Factor>>. Acesso em: 04 out. 2018.

MICROSOFT. **Uploading board code and Arduino IDE**. 2018. Disponível em < <https://support.office.com/en-us/article/uploading-board-code-and-arduino-ide-a9723765-1314-49e0-a69b-bb5c3e1f628d>>. Acesso em: 01 out. 2018.

MULTCOMERCIAL. **Transformador de tensão 127-220V para 18-18V**. 2018. Disponível em <<https://loja.multcomercial.com.br/transformador-de-tens-o-127-220v-para-18v-18v-5a.html>>. Acesso em: 02 out. 2018.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos**. 8.ed. São Paulo: Pearson, 2008. 592 p.

OPEN ENERGY MONITOR. **AC Power Theory**. 2018. Disponível em <<https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ac-power-theory>>. Acesso em: 15 out. 2018.

OPEN ENERGY MONITOR. **CT Sensors: interfacing with an arduino**. 2018. Disponível em <<https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>>. Acesso em: 29 out. 2018.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2011. 536 p.

RESEARCH GATE. **Triângulo de potências**. 2018. Disponível em <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Triangulo-de-potencias_fig1_32072>. Acesso em: 04 out. 2018.

SIEMENS LTDA. **Soluções para correção do fator de potência**. 2016. Disponível em: <https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/downloads-bt/Documents/Corre%C3%A7%C3%A3o%20de%20fator%20de%20pot%C3%Aancia/Catalogo_CFP_2016_PT.pdf>. Acesso em: 17 out. 2018.