

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

ALEXANDRE DOS SANTOS VASCONCELOS

**LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS QUE DEFINEM A QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

Manaus

2021

ALEXANDRE DOS SANTOS VASCONCELOS

**LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS QUE DEFINEM A QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

Monografia desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Fábio de Sousa Cardoso

Manaus

2021

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia - EST

Reitor:

Cleinaldo de Almeida Costa

Vice-Reitor:

Cleto Cavalcante de Souza Leal

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Israel Gondres Torne

Banca Avaliadora composta por:

Prof. Fábio de Sousa Cardoso (Orientador)

Prof. Jozias Parente de Oliveira

Prof. Israel Gondres Torne

Data da defesa: 16/12/2021.

CIP – Catalogação na Publicação

Vasconcelos, Alexandre dos Santos

Levantamento dos Parâmetros que Definem a Qualidade de Energia Elétrica e Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Consumo de Energia Elétrica Residencial / Alexandre dos Santos Vasconcelos; [orientado por] Fábio de Sousa Cardoso. – Manaus: 2021. 61 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2021.

1. Monitoramento de energia 2. Qualidade de energia. 3. Consumo de energia. I. Cardoso, Fabio de Sousa.

**LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS QUE DEFINEM A QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do Estado
do Amazonas como parte dos requisitos
necessários para a obtenção parcial do grau de
Engenheiro Eletricista em conformidade com as
normas ABNT.

Nota obtida: 8,5 (oito pontos e cinco décimos)

Aprovada em 16 / 12 / 2021

Área de concentração: Eficiência Energética

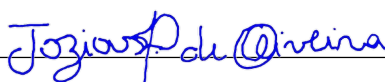
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Fábio de Sousa Cardoso



Avaliador 01: Prof. Dr. Israel Gondres Torné



Avaliador 02: Prof. Jozias Parente de Oliveira

Manaus

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a minha mãe que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e me incentivando a sempre persistir nos meus objetivos.

Agradeço também a Joanna que tem sido uma pessoa muito especial na minha vida e por diversas vezes me apoiou nos momentos difíceis que passei.

Por fim agradeço a todos os professores que fizeram parte do meu processo de formação como engenheiro e que sempre estiveram dispostos a ajudar e por muitas vezes se doaram e fizeram o máximo para nos preparar para o mercado de trabalho.

RESUMO

Neste projeto foi realizado um estudo e desenvolvimento de um sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica de baixo custo e acessível para qualquer cidadão que muitas vezes não pode investir em um sistema como este devido ao custo ser elevado. Este sistema possui as funções de medir a tensão, medir a corrente consumida, mostrar a potência consumida do sistema e a energia consumida em kWh. As medições são feitas através de sensores de tensão e corrente elétrica alternada, ambos com alto grau de confiabilidade e são muito utilizados em máquinas industriais por serem de fácil utilização e sempre estão disponíveis no mercado. Entre os sensores, foi utilizado o sensor de tensão ZMPT101B para realizar as medidas de tensão com maior precisão e tornar o sistema ainda mais confiável. Após serem realizadas todas as medições o sistema envia estes dados para um aplicativo de celular ou *dashboard* no computador através de protocolo MQTT para que possam ser acessados e monitorados pelo usuário.

Através do desenvolvimento deste projeto foi possível realizar a criação do protótipo utilizando uma *proto board* para a realização dos testes necessário e com isso assegurar a funcionalidade do dispositivo. Foi possível criar um ambiente de testes com cargas de diferentes consumos nominais para que estes testes fossem realizados. Também foi criado um projeto de esquemático e Layout da placa do dispositivo para melhorar as conexões e assegurar a confiabilidade nas medidas realizadas pelo sistema.

Palavras-chave: Sistema de monitoramento de energia. qualidade de energia. sensores. consumo de energia.

ABSTRACT

In this project, a study and development of a low cost and accessible electric energy consumption monitoring system was carried out for any citizen who often cannot invest in a system like this due to the high cost. This system has the functions of measuring the voltage, measuring the current consumed, showing the power consumed by the system and also the energy consumed in kWh. The surveys are carried out using voltage and alternating current sensors, both with a high reliability and are widely used in industrial machines because they are easy to use and are always available on the market. Among the sensors, the ZMPT101B voltage sensor to perform voltage measurement more accurately and make the system even more reliable. After all acceptances are carried out, the system sends these data to a cell phone application or a computer panel through the MQTT protocol so that they can be accessed and monitored by the user.

Through the development of this project, it was possible to create the prototype using a protoboard to carry out the necessary tests and thus ensure the functionality of the device. It was possible to create a test environment with loads of different nominal consumption for these tests to be carried out. A schematic and layout project of the device board was also created to improve the connections and ensure the reliability of the measurements carried out by the system.

Keywords: Energy monitoring system. power quality. sensors. energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidores de Energia.	15
Figura 2 - Esquema de um Wattímetro.....	17
Figura 3 - Circuito para exemplificar o funcionamento do SCT-013.	18
Figura 4 - Sensor de corrente SCT-013.	19
Figura 5 - Componentes Internos do Sensor SCT-013.....	19
Figura 6 - Representação de Funcionamento do sensor de corrente.	20
Figura 7 - ZMPT101B.	20
Figura 8 - Diagrama ZMTP101B.	21
Figura 9 - Comparativo entre um sinal senoidal e uma tensão com DHT.....	23
Figura 10 - ESP32 Devkit.....	25
Figura 11 - Diagrama de blocos de funções do ESP32.	25
Figura 12 - Infraestrutura de comunicação em MQTT.....	26
Figura 13 - Logomarca KiCad.....	27
Figura 14 – Exemplo de esquemático feito com o KiCad, 2016.	27
Figura 15 - Fritzing.....	28
Figura 16 - Organização do Blynk.	29
Figura 17 - Exemplo de aplicativo feito com o Blynk.	30
Figura 18 - Arduino IDE.	31
Figura 19: Diagrama de blocos de execução do projeto.....	33
Figura 20 – Arquitetura do sistema.	34
Figura 21 - Diagrama de funcionamento do sistema de monitoramento de energia.	36
Figura 22 - Representação do circuito do sensor de corrente.....	38
Figura 23 - Esquema do protótipo de testes.	39
Figura 24 - Protótipo de testes.....	40
Figura 25 - Multímetro utilizado nos testes.....	41
Figura 26 - Multímetro HD2400 medindo a tensão da rede.....	41
Figura 27 - Esquema do protótipo de teste.....	42
Figura 28 - Protótipo de testes junto ao sistema de testes.	43
Figura 29 - Sensor de corrente montado junto ao multímetro.....	43
Figura 30 - Esquemático da placa do sistema.....	44
Figura 31 - Layout da placa do sistema.....	44
Figura 32 - 3D da placa do sistema sem os componentes.	45

Figura 33 - Modelo 3D da placa do sistema.	45
Figura 34 - Modelo 3D da placa do Sistema.	46
Figura 35 - Modelo 3D da placa do Sistema.	46
Figura 36 - Segunda versão do protótipo de hardware do sistema.	47
Figura 37 - Segunda versão do protótipo de hardware do sistema.	48
Figura 38 - Aplicativo de celular mostrando informações de consumo de energia.	48
Figura 39 - Esquema de testes com as duas lâmpadas desligadas.	49
Figura 40 - Sistema de testes com lâmpada de 7 W acionada.	51
Figura 41 - Monitoramento dos valores medidos com a lâmpada de 7 W ligada.	52
Figura 42 - Sistema de testes com a lâmpada de 15 W acionada.	52
Figura 43 - Sistema de testes com as duas lâmpadas acionadas.	54
Figura 44 - Aplicativo de celular mostrando as medições do sistema.	55
Figura 45 - Segunda versão do protótipo do sistema.	56
Figura 46 - Medidor de Energia WEG MMW02.	56
Figura 47 - Medidor de Energia KS-3000.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores medidos para as duas lâmpadas desligadas.....	50
Tabela 2 - Valores medidos com a lâmpada de 7 W ligada.	51
Tabela 3 - Valores medidos com a lâmpada de 15 W ligada.	53
Tabela 4 - Valores medidos com as duas lâmpadas ligadas.....	54
Tabela 5 - Comparação de valores de medidores de energia	57

LISTA DE ABREVIATURAS

AC - Alternating Current

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DC - Direct Current

CAD – Computer aided design

GND - Graduated neutral density filter or Ground

GPIO - General Purpose Input/Output

IDE - Integrated Development Environment

IoT – Internet of Things

LoRa – Long Range

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

SCT - Split Core Current Transforme

SoC - System on Chip

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 REFERENCIAL TEÓRICO	15
1.1 Parâmetros de Monitoramento de Energia Elétrica	15
1.1.1 Corrente Elétrica	16
1.1.2 Diferença de Potencial ou Tensão	16
1.1.3 Potência Elétrica	16
1.1.4 Energia Consumida	18
1.2 HARDWARE PARA A MEDIÇÃO DE ENERGIA	18
1.2.1 Sensor de Corrente SCT-013	18
1.2.2 Sensor ZMPT101B	20
1.3 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	21
1.3.1 Parâmetros que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica	22
1.4 MICROCONTROLADOR ESP32	24
1.5 Protocolo <i>MQTT</i>	26
1.6 SOFTWARES	27
1.6.1 Kicad	27
1.6.2 Fritzing	28
1.6.3 Blynk	28
1.6.4 Arduino IDE	30
2 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3 REALIZAÇÃO DO PROJETO	35
3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados	37
3.2 Dimensionamento de Componentes	38
3.3 Desenvolvimento do Protótipo	39
4 TESTES E RESULTADOS	49
CUSTO DA SOLUÇÃO	56
CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	59

INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o consumo de energia elétrica vem crescendo devido ao uso de equipamentos elétricos, ao desenvolvimento econômico mundial e ao aumento do consumo de eletrodomésticos e eletroeletrônicos em residências e indústrias (EPE, 2021).

Devido a isso, novas formas de geração e gerenciamento de energia vêm sendo estudadas com a finalidade de desenvolver tecnologias responsáveis por diminuir o impacto ambiental da geração de energia, de forma a garantir o não esgotamento dos recursos naturais existentes (CABRAL et al, 2014).

Com o passar dos anos, o tema de energia elétrica vem sendo discutido com mais frequência por diversos ramos da sociedade. Energia elétrica se tornou um assunto importante para todos que se preocupam com o meio ambiente, economia e eficiência energética em geral.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, o consumo de energia elétrica no Brasil em setembro de 2020 foi de 40.227 GWh, o que representa um aumento de 2,6% em relação ao mesmo mês do ano anterior. Com este constante crescimento, também deve-se aumentar a preocupação com a crise energética que pode ocorrer (SANT'ANA, 2021).

Esse crescimento vem sendo observado a cada ano no Brasil, mostrando que o consumo de energia se tornou algo de grande importância para a sociedade em geral. Diante disto, estudos realizados na área vêm crescendo constantemente, bem como, investimentos buscando soluções inovadoras para o desenvolvimento tecnológico na área de eficiência energética tem crescido bastante (SANT'ANA, 2021).

O Brasil nos últimos anos passa por uma crise econômica, o que afetou, entre diversos outros ramos da economia, o setor industrial. As empresas tem a grande missão de aumentar a produtividade e baixar os custos de produção. Um dos principais custos de produção da indústria é com energia elétrica. Empresas estão investindo constantemente em tecnologias e estratégias para monitoramento e redução do consumo de energia (EPE, 2021).

Esse comportamento também está sendo adotado por cidadãos comuns em suas residências. Cada vez mais pessoas estão buscando soluções tecnológicas para reduzir seus gastos com energia elétrica. Seja investindo em geração de energia, como sistema solar fotovoltaico, por exemplo, ou até mesmo sistemas de monitoramento de consumo de energia.

Além disso, o Brasil passa por uma crise hídrica que afeta diretamente a geração de energia elétrica e que, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a crise hídrica enfrentada pelo país neste ano de 2021 pode ocasionar um aumento de pelo menos 5% na conta de energia dos brasileiros no ano de 2022.

O monitoramento do consumo de energia elétrica é a ação de registrar e processar os dados do consumo de energia em tempo integral e no momento em que ele ocorre. Além disso, permite que gestores identifiquem onde estão os potenciais de economia que devem ser aproveitados (GIRARDI, 2019).

As principais vantagens de se monitorar o consumo de energia elétrica são o acesso em tempo real aos dados de consumo de energia, demanda, fator de potência, realizar projeções de consumo, identificação e diagnósticos de desvios do consumo em relação a curva típica, simulação de faturas (GIRARDI, 2019).

Diante disso, este trabalho tem como o objetivo realizar o estudo de parâmetros que definem a qualidade da energia elétrica residencial e desenvolver um sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica residencial de baixo custo.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Parâmetros de Monitoramento de Energia Elétrica

Antes de aprofundarmos nossos conhecimentos e estudos no sistema de monitoramento de consumo de energia primeiramente precisamos entender o princípio de medição de energia, entender o funcionamento do medidor de energia e quais as grandezas e princípios que compõem tal equipamento.

Existem atualmente dois tipos de medidores de energia, os eletromecânicos e os medidores eletrônicos. O medidor eletromecânico tem seu funcionamento baseado no eletromagnetismo, que faz com que o disco seja acionado e que seja possível a contagem dos ciclos. Por conta de seu baixo custo e eficiência, o medidor eletromecânico é mais utilizado em todo o mundo (ITC, 2018).

Já o medidor eletrônico tem sua medição feita eletronicamente. Além de ter uma medição muito mais precisa, esse medidor garante uma maior confiabilidade no seu uso, tendo como principal desvantagem o seu custo.

Figura 1 - Medidores de Energia.



Fonte: PUCRS, 2020.

1.1.1 Corrente Elétrica

A corrente elétrica é o deslocamento de cargas elétricas dentro de um condutor quando houver uma diferença de potencial entre suas extremidades. Então, a corrente é basicamente o fluxo de cargas elétricas que atravessa a seção de reta de um condutor, na unidade de tempo (CREDER, 2007). A unidade de corrente elétrica é o Ampere (A).

1.1.2 Diferença de Potencial ou Tensão

A tensão elétrica é a força necessária para movimentar os elétrons, ou seja, é uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos (SANTOS, 2021).

Para haver corrente elétrica é preciso que haja uma diferença de potencial, como já dito anteriormente. Caso o circuito esteja aberto, teremos uma diferença de potencial, mas não teremos corrente elétrica (CREDER, 2007).

A relação entre a energia elétrica e a corrente elétrica é dada pela seguinte equação, caracterizada como Lei de Ohm:

$$V = R \times I \qquad \text{Eq. 01}$$

Onde:

$V \rightarrow$ tensão elétrica

$R \rightarrow$ Resistência elétrica

$I \rightarrow$ Corrente elétrica

A unidade de tensão elétrica é o Volt (V).

1.1.3 Potência Elétrica

Potência é uma grandeza elétrica que mede a quantidade de trabalho que pode ser realizado em um certo período, onde:

$$P = V \times I \quad \text{Eq. 02}$$

$P \rightarrow$ Potência Elétrica.

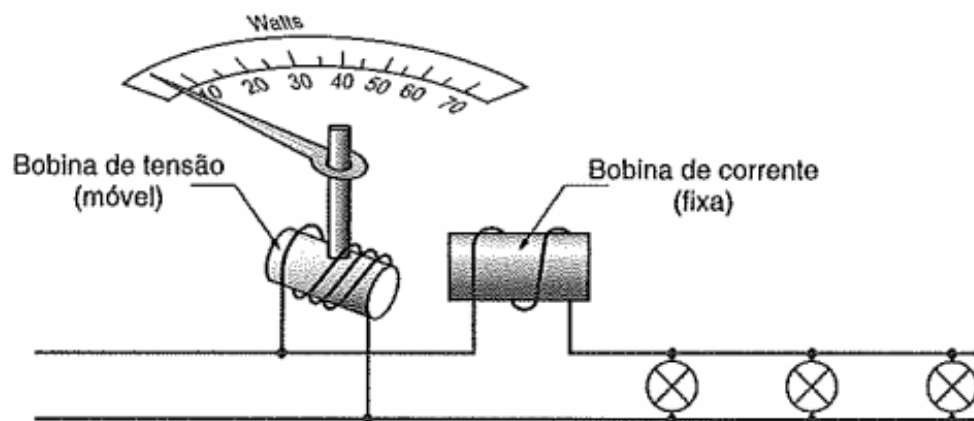
$V \rightarrow$ Tensão Elétrica.

$I \rightarrow$ Corrente Elétrica.

A unidade de potência elétrica é o Watt (W).

Na figura 2 pode-se visualizar o esquema do funcionamento de um Wattímetro, instrumento utilizado para medir a potência elétrica.

Figura 2 - Esquema de um Wattímetro.



Fonte: CREDER, 2007.

Verifique que, para realizar a medição da potência elétrica o equipamento utiliza tanto a medida de corrente elétrica quanto a medida de tensão elétrica.

1.1.4 Energia Consumida

É a quantidade de energia (potência) consumida em um intervalo de tempo. O cálculo da energia consumida é feito através da potência e do tempo, onde:

$$E = P \times \Delta t \quad \text{Eq. 03}$$

A unidade de medida de energia consumida é o kWh.

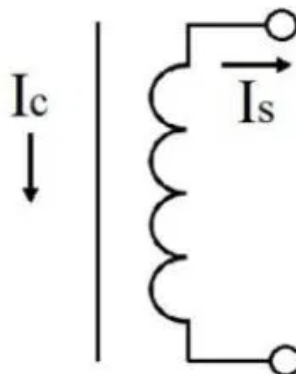
1.2 HARDWARE PARA A MEDIÇÃO DE ENERGIA

1.2.1 Sensor de Corrente SCT-013.

SCT vem da sigla *Split Core Current Transformer*, em português, Transformador de corrente de núcleo dividido.

Um transformador de corrente é que um conjunto de espiras que são colocadas ao redor de um condutor em que se deseja medir a corrente. Como mostrado na Figura 3 e Figura 6, o transformador de corrente terá nos seus polos uma corrente induzida chamada I_s , que é proporcional a corrente que percorre o condutor em que se deseja medir a corrente elétrica, chamada I_c (Portal Vale do Silício, 2017).

Figura 3 - Circuito para exemplificar o funcionamento do SCT-013.



Fonte: DEMETRAS, 2017.

O sensor de corrente SCT-013, mostrado na Figura 4, é um transformador de corrente não invasivo. É uma ótima opção para medir corrente AC de 0 a 100 A. Por ter um bom custo benefício e ser não invasivo, ou seja, não precisar a abrir o circuito para realizar a medição, é muito utilizado em projetos de automação, monitoramento e proteção de motores e equipamentos.

Figura 4 - Sensor de corrente SCT-013.

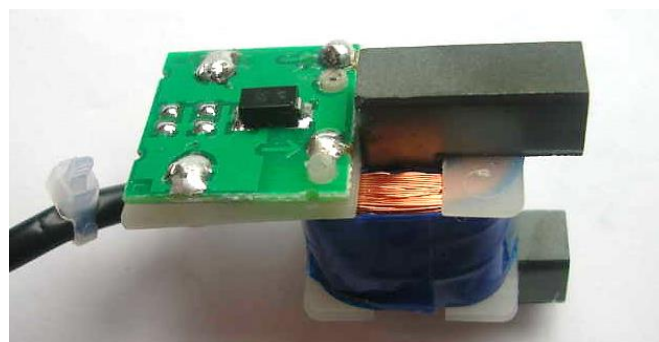


Fonte: YHDC - SCT013 *DataSheet*, 2016.

Sua especificação é de 100A na entrada (primário) e de 50 mA na saída, com temperatura de operação entre -25 °C e 70 °C.

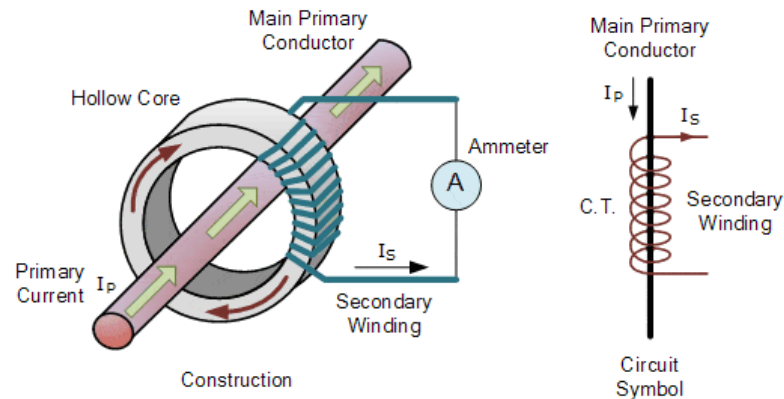
Na figura 5 é possível visualizar os componentes internos do sensor de corrente SCT013-020.

Figura 5 - Componentes Internos do Sensor SCT-013.



Fonte: Wall, 2017.

Figura 6 - Representação de Funcionamento do sensor de corrente.



Fonte: How2Electronics, 2021.

1.2.2 Sensor ZMPT101B

O sensor de tensão alternada ZMPT101B, mostrado na Figura 7, é o melhor para projetos e protótipos, onde precisamos medir a tensão alternada de forma precisa com um transformador de tensão. O ZMPT101B é a escolha ideal para medir a tensão alternada usando um Arduino, ESP8266, *Raspberry Pi* ou qualquer outro microcontrolador com uma plataforma de código aberto.

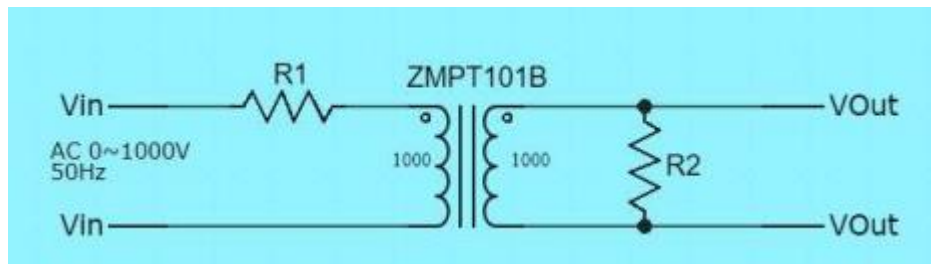
O ZMPT101B é um transformador de tensão de alta precisão. Este módulo facilita o monitoramento da tensão de alimentação CA de até 250 volts.

Figura 7 - ZMPT101B.



Fonte: *InnovatorsGuru ZMPT101B Datasheet*, 2016.

Figura 8 - Diagrama ZMTP101B.



Fonte: *InnovatorsGuru ZMTP101B Datasheet*, 2016.

V_{in} → Tensão de Entrada (Rede).

V_{out} → Tensão de Saída.

R_1 e R_2 → Resistores de limitação.

$$V_{out} = \left(\frac{V_{in}}{R_1}\right) \times R_2 \quad \text{Eq. 04}$$

1.3 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O termo qualidade de energia elétrica (QEE) tem sido usado amplamente para se expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores e mede o quão bem essa energia pode ser utilizada (DECKMANN; POMILLIO, 2017). Tal medida inclui características de continuidade de suprimento e conformidade com certos parâmetros que são considerados como desejáveis para a operação segura da energia, como distorções, flutuações de tensão, variações de tensão de curta duração, desequilíbrios de sistemas trifásicos etc.

A qualidade do produto e a qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica são estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e esta regulamentação pode ser consultada no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST.

O item 1.1 do PRODIST estabelece que, com relação ao objetivo da avaliação da qualidade da energia elétrica:

Estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações (ANEEL, 2021).

1.3.1 Parâmetros que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica

1.3.1.1 Tensão em Regime Permanente

A tensão em regime permanente deve ser acompanhada em todo o sistema de distribuição de energia e são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente (ANEEL, 2021).

A tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada, utilizando de metodologias descritas para indicadores individuais e coletivos. Essas medições são realizadas por meio de reclamação do consumidor, por determinação da ANEEL e também por determinação da ANEEL por meio de sorteios realizados a cada trimestre. Para uma unidade consumidora, a tensão é medida ao longo de uma semana (ANEEL, 2021).

1.3.1.2 Fator de Potência

O item 3.1.1 do PRODIST estabelece que, com relação a caracterização do fator de potência:

O valor do fator de potência deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q) ou das respectivas energias (EA, ER), utilizando-se as seguintes fórmulas:

$$Fp = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2+ER^2}} \quad \text{Eq. 05}$$

Para uma unidade consumidora o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou entre 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com a regulamentação vigente.

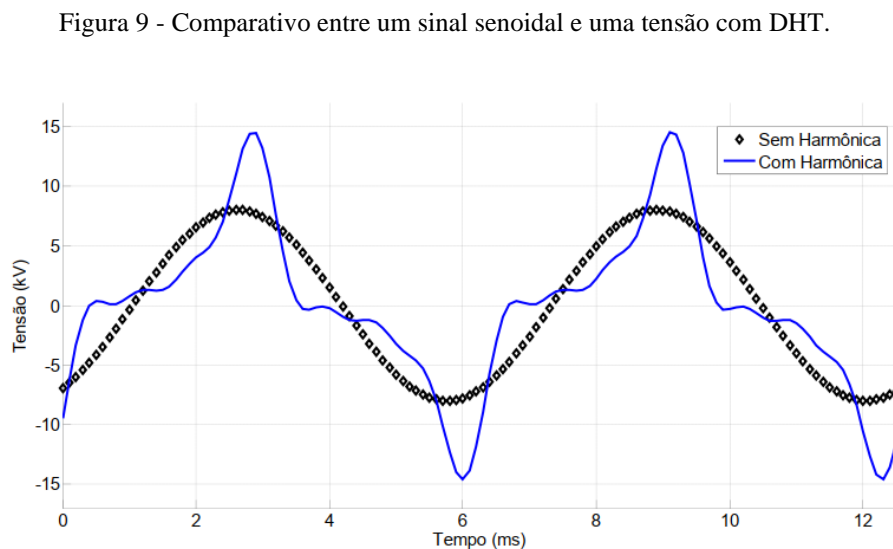
O fator de potência também pode ser calculado utilizando as medidas de potência ativa e potência aparente através da seguinte equação:

$$Fp = \frac{\text{potência ativa}(kW)}{\text{potência aparente}(kVA)} \quad \text{Eq. 06}$$

1.3.1.3 Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e nas formas de onda das correntes quando comparadas à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2021).

Realizar a quantificação de quanto um sinal de corrente ou um sinal de tensão é distorcido é muito importante pois a partir do cálculo da distorção harmônica total é possível realizar a comparação destes com os valores estipulados pela regulamentação da ANEEL e verificar desvios com relação a QEE (ROLLIN, 2015).



Fonte: ROLLIN, 2015.

1.3.1.4 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é caracterizado por uma diferença constatada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou também qualquer diferença na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema (ANEEL, 2021).

1.3.1.5 Flutuação de Tensão

O item 6.1.1 do PRODIST estabelece que, com relação a definição de flutuação de tensão:

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea (ANEEL, 2021).

A determinação da qualidade da energia por conta da flutuação de tensão tem como objetivo avaliar o incômodo causado pelo efeito de cintilação luminosa no consumidor.

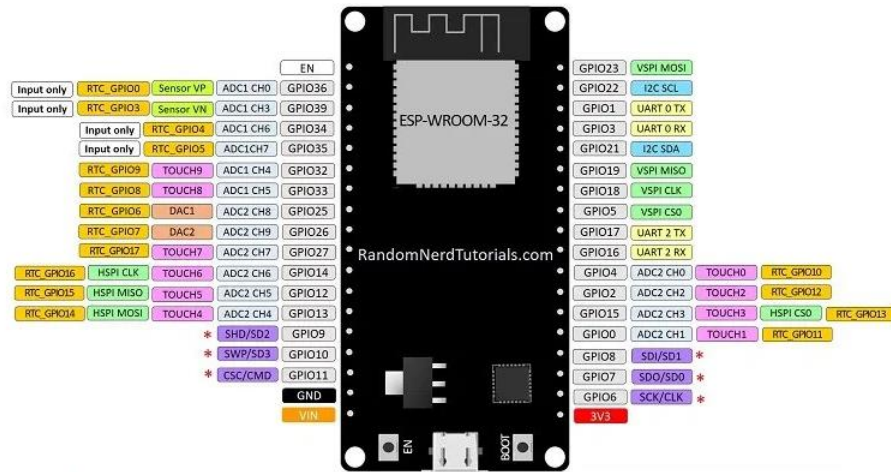
1.4 MICROCONTROLADOR ESP32

O ESP32 é um microcontrolador *System on Chip* (SoC) de baixo custo criado pela empresa *Espressif Systems*, os mesmos desenvolvedores do ESP8266. Munido de um microprocessador *dual-core Tensilica Xtensa LX6*, o ESP32 possui 32 bits com frequência de até 240 MHz, também possui módulo integrado *WIFI* e *Bluetooth*.

Além disso, o ESP32 possui 34 pinos programáveis de Entrada/Saída (GPIO), 18 canais conversores analógico-digital (ADC) de 12 bits, 2 canais Conversor digital-analógico (DAC), comunicação serial do tipo *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART), *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter Integrated Circuit* (I2C) (TEJA, 2021).

Na figura abaixo pode-se ver todas as GPIOs do ESP32 identificadas com suas respectivas funções.

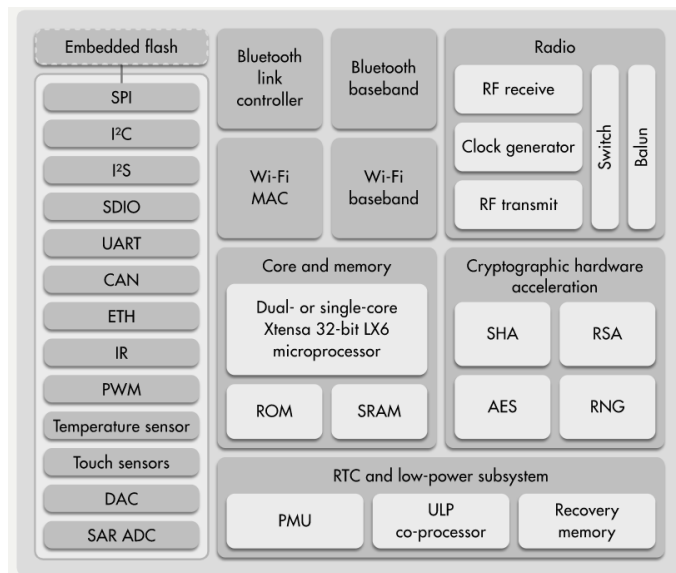
Figura 10 - ESP32 Devkit.



Fonte: Random Nerd Tutorials, 2018.

No diagrama de blocos da figura 11 podemos ver todas as funções disponíveis no ESP32.

Figura 11 - Diagrama de blocos de funções do ESP32.



Fonte: ESP32.net

O ESP32 possui conexão WIFI 2,4 GHz com máximo 150 Mbps.

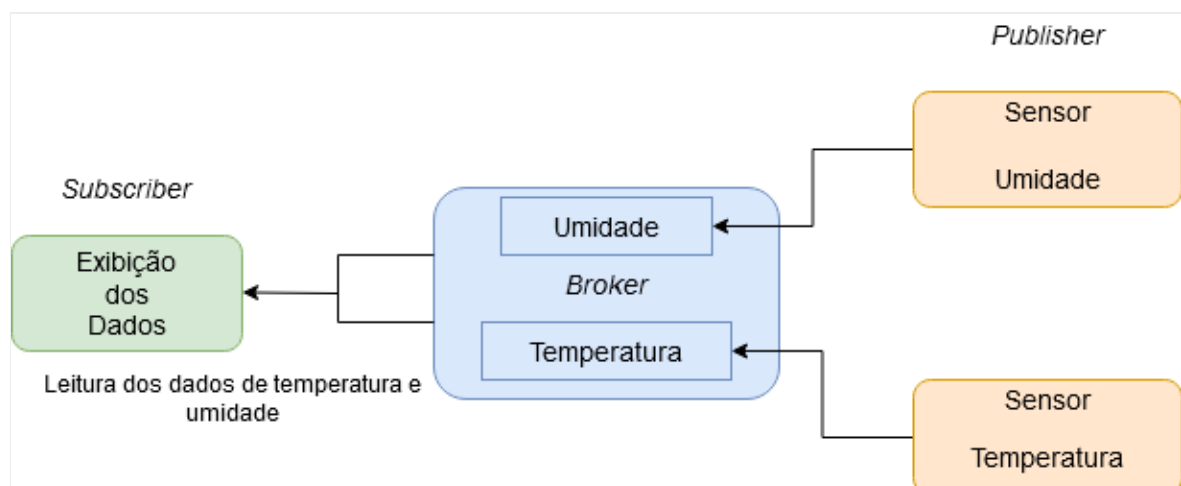
1.5 Protocolo MQTT

MQTT é um protocolo de comunicação de aplicação leve e baseado em M2M (*Machine-to-Machine*) criado pela IBM nos anos 90, focado em aplicações de *IoT*. Sistemas utilizando o MQTT baseiam-se no padrão cliente servidor, na qual um faz a “postagem” e “captura” da informação, enquanto o outro gerencia os dados a serem transmitidos. O protocolo ganhou destaque devido sua facilidade de implementação, baixo consumo de dados e pela possibilidade de comunicação bilateral (NERI, 2017). O protocolo possui as características:

- Padrão cliente servidor, utilizando o *publish/subscribe*;
- *Broker* como centralizador das mensagens, organizadas em tópicos;
- Independência entre nós: *Broker* intermedia a comunicação entre dispositivos;
- Protocolo TCP para a transmissão de dados.

O protocolo estabelece vantagens como baixo consumo de memória, baixo processamento para o envio da mensagem e baixo consumo de banda.

Figura 12 - Infraestrutura de comunicação em MQTT.



Fonte: NERI, 2017.

1.6 SOFTWARES

1.6.1 Kicad

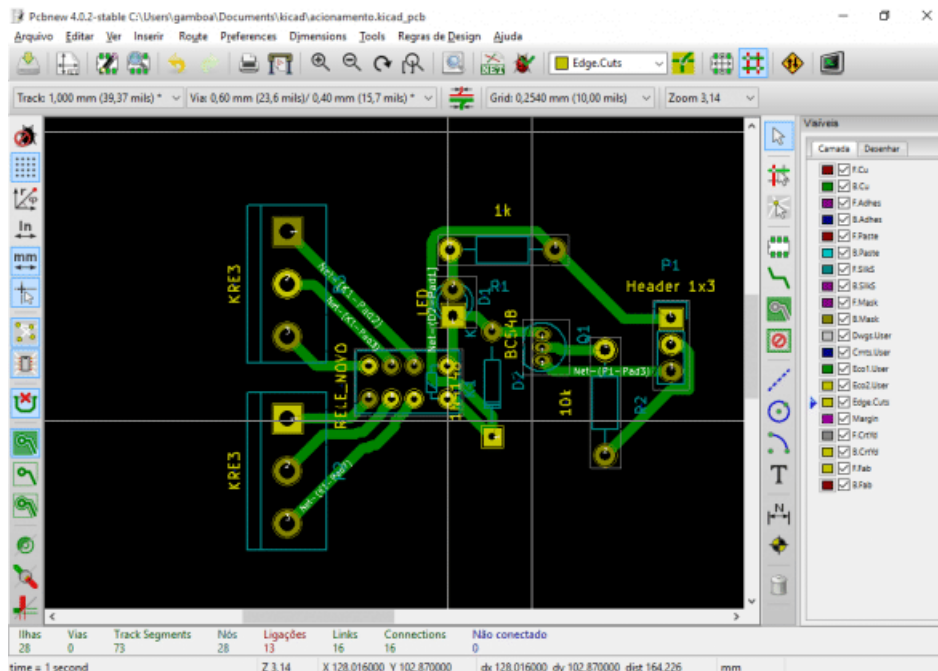
KiCad é um software *Open Source* para criação de projetos de circuitos eletrônicos. Facilita o projeto de esquemas de circuitos eletrônicos e a criação de projetos de placas de circuito impresso, do inglês *Printed Circuit Board* (PCB). Possui um ambiente para criação de esquemas eletrônicos e criação de *layout* de PCBs.

Figura 13 - Logomarca KiCad.



Fonte: Kicad.

Figura 14 – Exemplo de esquemático feito com o KiCad, 2016.



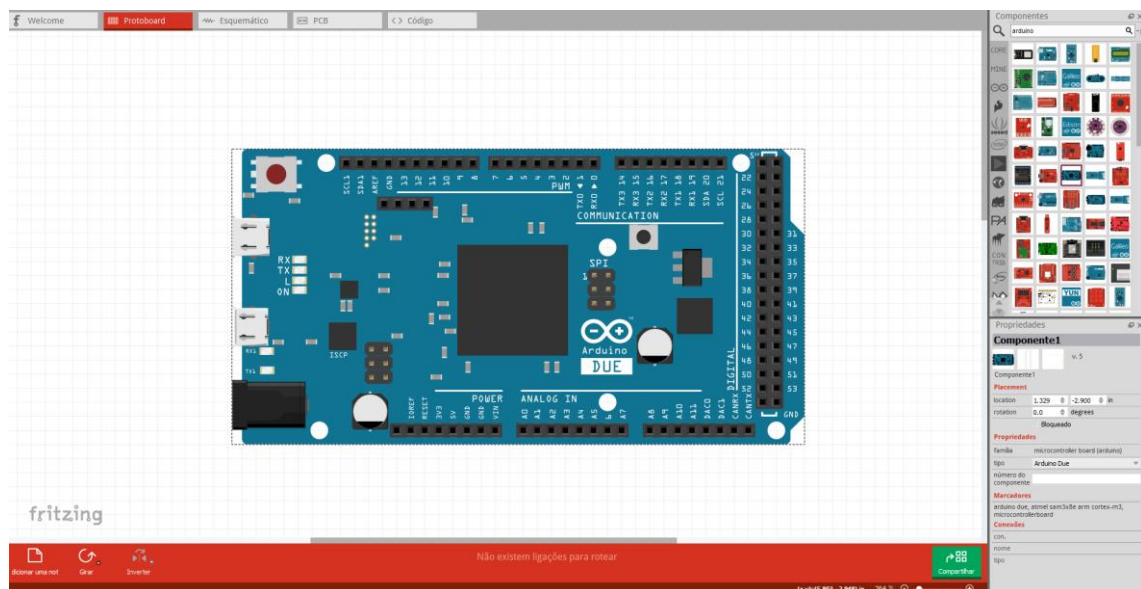
Fonte: Blog Embarcados, 2018.

1.6.2 Fritzing

Fritzing é um software *open source* utilizado para representar diagramas CAD para o desenvolvimento de *hardware*, para apoiar *designers* e artistas prontos para passar da experiência de um protótipo para a construção de um circuito mais permanente.

Na figura abaixo pode-se visualizar a interface do software, onde é possível montar toda estrutura do circuito na protoboard, o esquemático, a PCB e ainda realizar a programação de alguns microcontroladores.

Figura 15 - Fritzing.



Fonte: Fritzing.org, 2021.

1.6.3 Blynk

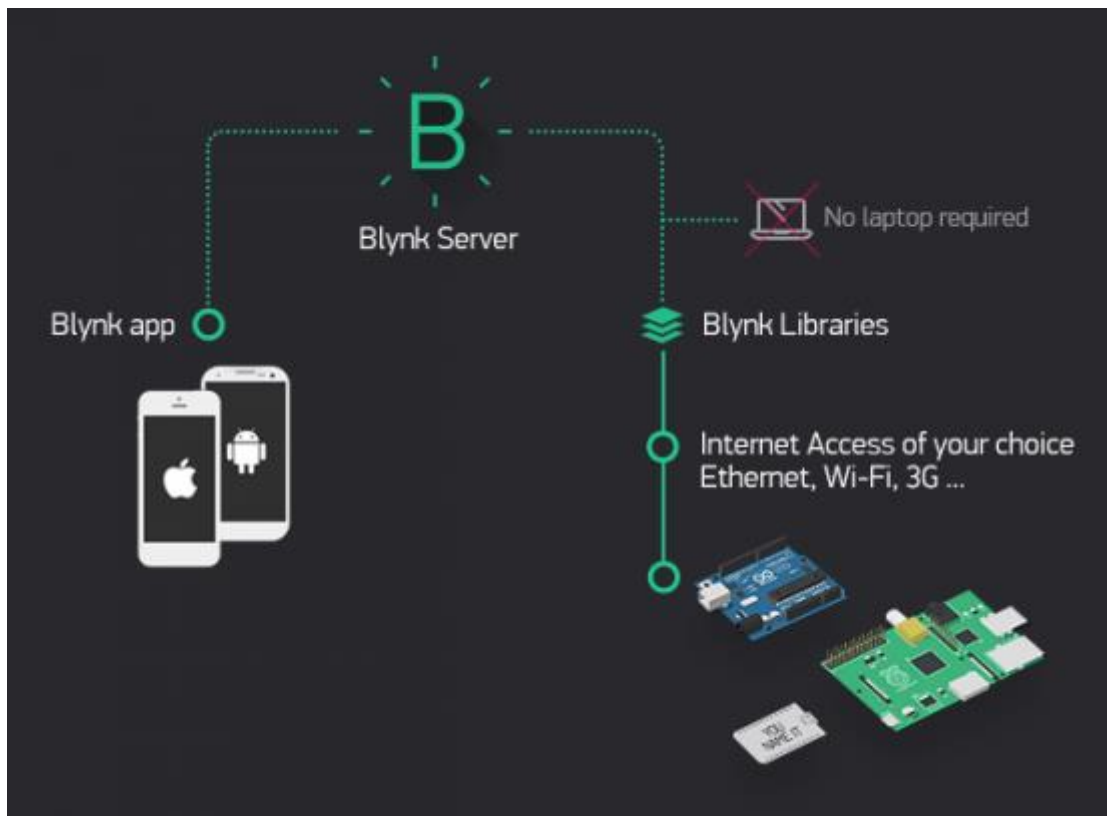
Blynk é um aplicativo utilizado para criar protótipos, implantar e gerenciar remotamente dispositivos eletrônicos conectados em qualquer escala: de projetos pessoais de IoT a milhões de produtos comerciais conectados.

Com o *Blynk* é possível conectar seu hardware à nuvem e desenvolver aplicativos para *iphone Operating System* (iOS) e *Android* com muito mais facilidade e sem a necessidade de código para analisar dados em tempo real provenientes dos *hardwares*, controlá-los remotamente, receber notificações etc.

Utilizando a rede WIFI do ESP32 poderemos enviar dados diretamente para o servidor do *Blynk* e resgatar esses dados para serem mostrados diretamente no aplicativo de celular.

Os aplicativos feitos com *Blynk* estão prontos para os usuários finais. Seja um membro da sua família, um funcionário ou alguém que comprou seu produto, eles poderão baixar o aplicativo, conectar o dispositivo e começar a usá-lo (*Blynk*, 2021).

Figura 16 - Organização do *Blynk*.

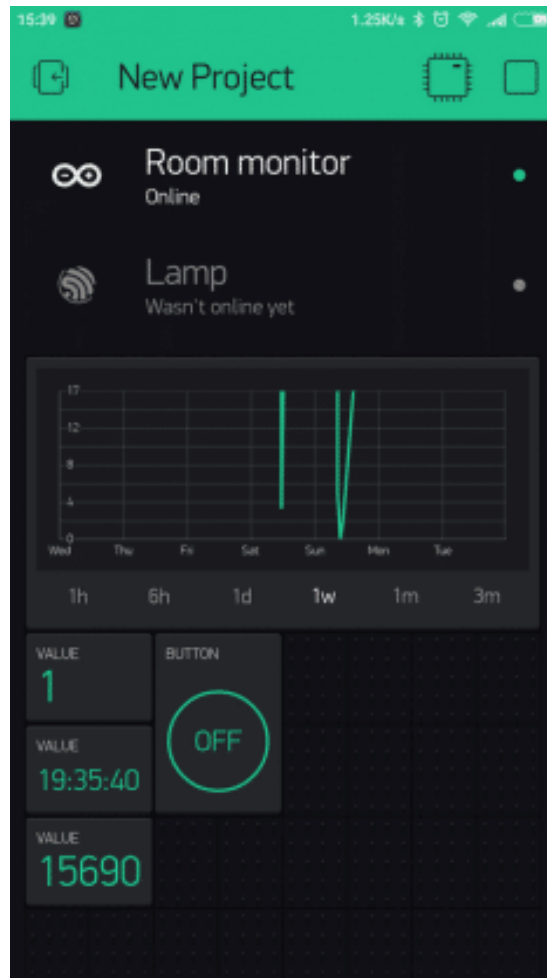


Fonte: Embarcados, 2018.

A estrutura do *Blynk*, mostrada na figura acima, é organizada em três partes: o aplicativo *Blynk*, o servidor *Blynk* e a biblioteca *Blynk*.

Toda comunicação entre o aplicativo e o hardware é feita através da *cloud Blynk*, como é chamado o servidor do *Blynk*. Este servidor é responsável por realizar o envio dos dados ao hardware, armazenar estados do aplicativo e do hardware e armazenar dados de sensores lidos pelo hardware mesmo se o aplicativo estiver fechado (Embarcados, 2018).

Figura 17 - Exemplo de aplicativo feito com o *Blynk*.



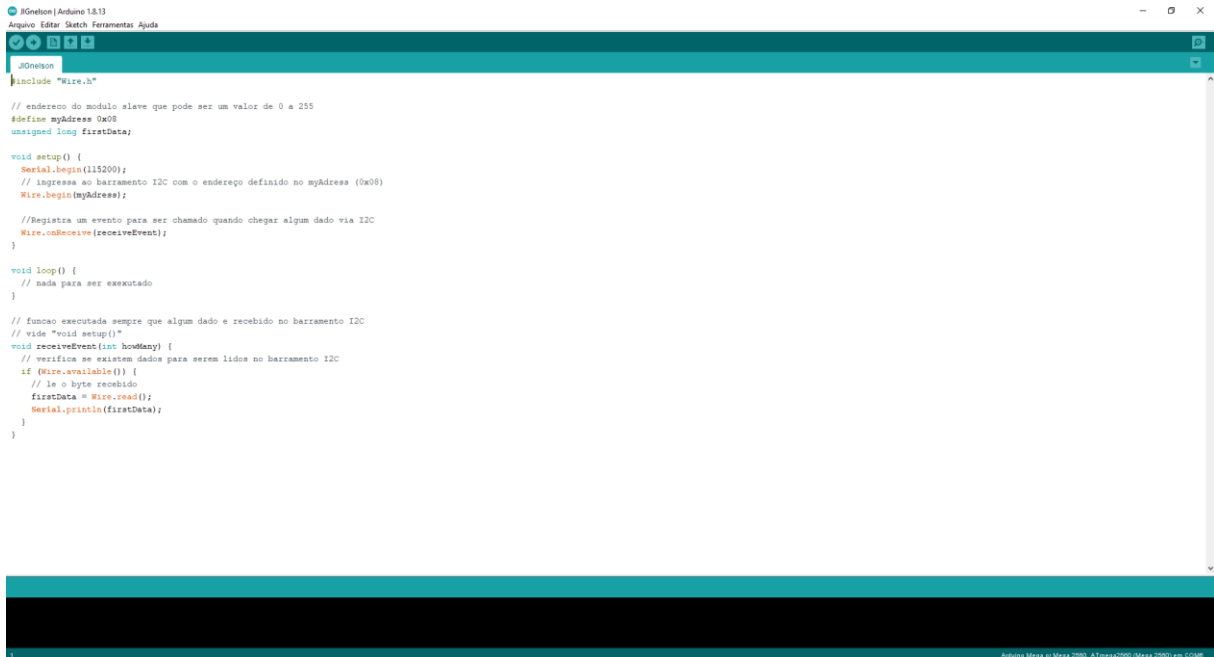
Fonte: Embarcados, 2018.

1.6.4 Arduino IDE

IDE, do inglês *Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado é um software para criar aplicações e permite que o usuário programe novas aplicações rapidamente devido a suas múltiplas funcionalidades (REDHAT, 2019).

O Arduino IDE é um software *open source* que nos possibilita integrar diversas plataformas em uma só IDE, não somente os microcontroladores Arduino, mas diversas outras plataformas já possuem suporte oficial para a IDE do Arduino, inclusive o ESP32.

Figura 18 - Arduino IDE.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The main window displays a C++ sketch for I2C communication. The code includes the following elements:

```
#include "Wire.h"

// endereço do modulo alare que pode ser um valor de 0 a 255
#define myAddress 0x08
unsigned long firstData;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // ingressa ao barramento I2C com o endereço definido no myAddress (0x08)
  Wire.begin(myAddress);

  //Registra um evento para ser chamado quando chegar algum dado via I2C
  Wire.onReceive(receiveEvent);
}

void loop() {
  // nada para ser executado
}

// funcao executada sempre que algum dado e recebido no barramento I2C
// vide "void setup()"
void receiveEvent(int howMany) {
  // verifica se existem dados para serem lidos no barramento I2C
  if (Wire.available()) {
    // le o byte recebido
    firstData = Wire.read();
    Serial.println(firstData);
  }
}
```

The IDE window title is "JGnelson | Arduino 1.8.13" and the menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Sketch", "Ferramentas", and "Ajuda". The status bar at the bottom indicates "Arduino Mega e Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) em COM8".

Fonte: Própria.

A IDE do Arduino também nos permite utilizar bibliotecas criadas por desenvolvedores de todo o planeta e as próprias fabricantes dos sensores também possuem bibliotecas disponíveis, o que facilita bastante o trabalho e torna muito mais eficiente e desenvolvimento de qualquer projeto.

Através da IDE do Arduino podemos realizar a programação de todas os recursos do projeto, utilizando-se de bibliotecas disponibilizadas pelas próprias fabricantes dos sensores e de diversas ferramentas disponíveis no IDE do Arduino podemos desenvolver todo o firmware de forma simples e rápida.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O Trabalho apresentado foi uma Pesquisa Aplicada, e teve como objetivo a realização de Pesquisa exploratória sobre o material bibliográfico e de laboratório. Foram utilizados os procedimentos técnicos de pesquisa bibliográfica e experimental. Foi utilizado o método de abordagem hipotético-dedutivo e o método de procedimento monográfico em sua elaboração. Para coleta de dados foi utilizada documentação indireta e a análise e interpretação de seus dados, qualitativos, ocorrerá globalmente.

O projeto foi subdividido em três etapas, nas quais foram concentradas atividades dependentes umas das outras, mantendo todas com mesmo nível de importância na sua execução.

A primeira etapa foi a pesquisa bibliográfica e o estudo mais aprofundado dos parâmetros de energia elétrica e como eles podem ser aplicados de maneira eficiente no projeto. Nesta etapa foram decididos os meios de pesquisa bibliográfica e em seguida decididos os métodos a serem utilizados para a realização do projeto.

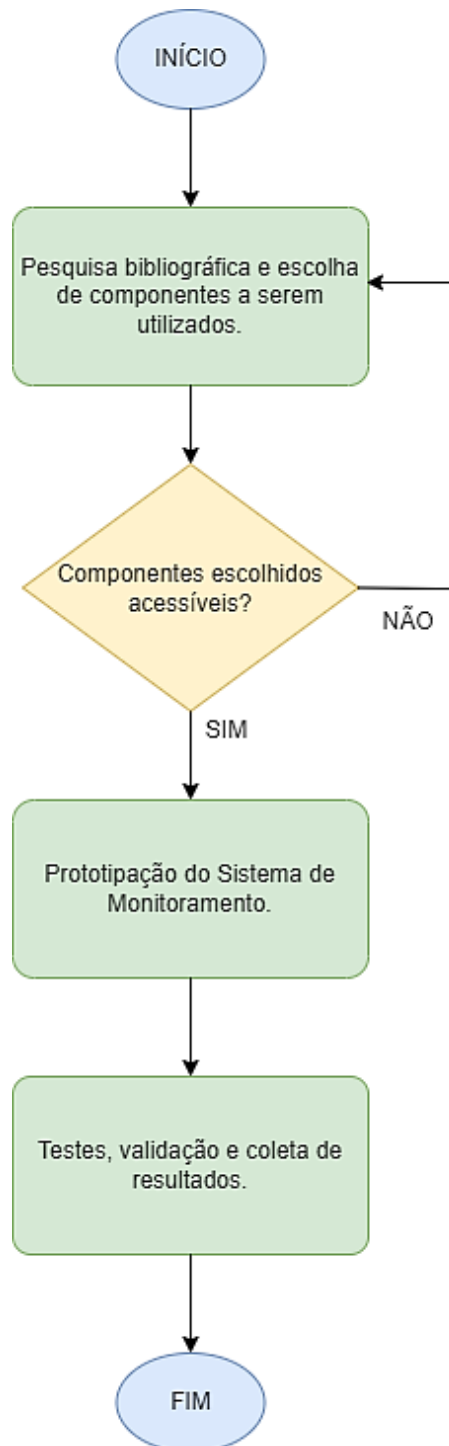
A segunda etapa foi a prototipação do sistema. Nesta etapa foram realizadas tarefas como criação do circuito eletrônicos do sistema, definição de componentes eletrônicos a serem utilizados, *design* de placas de circuito impresso, programação do microcontrolador para realizar as medidas necessárias, criação do aplicativo no *Blynk* Android e a comunicação entre os componentes do sistema.

A terceira etapa foi composta por testes, validação e coleta de dados do sistema de monitoramento de energia residencial. Foram realizados testes setorizados no sistema, começando primeiramente pelos testes de hardware, onde foram validadas todas as conexões e os circuitos projetados e/ou dimensionados e após a validação do mesmo, foram realizados os testes do *software*, onde foi verificado se o *firmware* do microcontrolador estava fazendo a leitura correta das grandezas desejadas. Foi realizado o teste de comunicação com a rede *Blynk*, os testes de visualização das informações na *dashboard* do *Blynk*, etc.

Foram realizadas pesquisas bibliográficas aprofundadas na área de medição de energia, parâmetros de energia a serem analisados, Internet das Coisas, sensores, microcontrolador ESP32, comunicação via MQTT e WIFI com ESP32, estudos da rede *Blynk* e da biblioteca *Blynk*, conexão entre o microcontrolador ESP32 com a rede *Blynk*, etc.

No diagrama da figura 19 pode-se verificar como as etapas do projeto estão relacionadas umas com as outras.

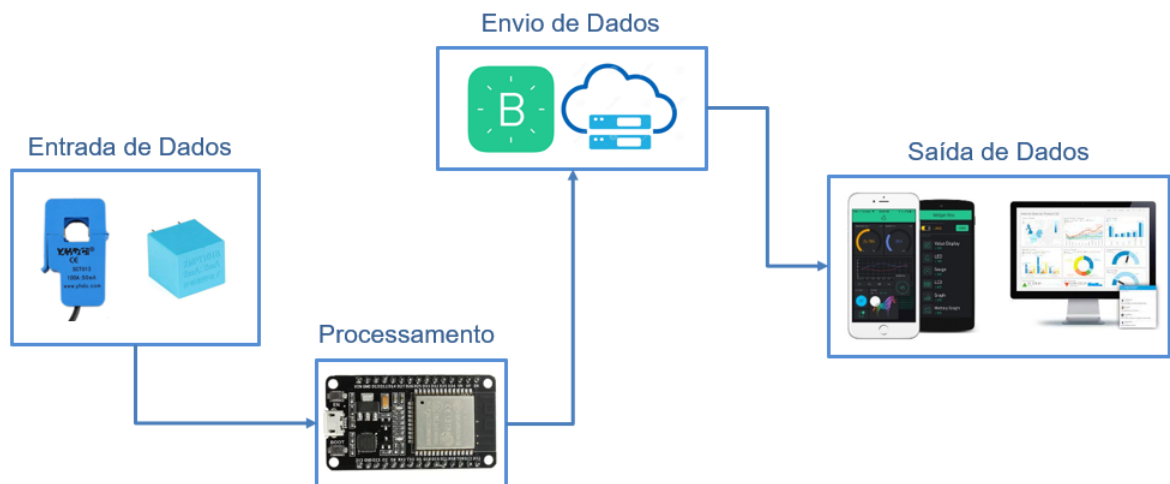
Figura 19: Diagrama de blocos de execução do projeto.



Fonte: Própria.

Na figura a seguir pode-se visualizar um esquema de como funciona o sistema de monitoramento de energia, onde as medidas são obtidas através dos sensores transformadores de corrente e de tensão. Após isso os dados são processados e corrigidos por meio do microcontrolador que também tem a função de enviar os dados através de comunicação WIFI via MQTT e finalmente esses dados são carregados e mostrados para o usuário final através de um *smartphone* ou um computador.

Figura 20 – Arquitetura do sistema.



Fonte: Própria.

3 REALIZAÇÃO DO PROJETO

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de realização do projeto. Primeiramente, foi realizado um planejamento de como deveria ser o sistema de monitoramento de energia. Foram definidas as características do sistema como sua conexão com a rede internet, foram decididas quais grandezas elétricas serão medidas, como será feita a consulta dos dados pelo usuário etc.

De acordo com o planejamento, o sistema deve funcionar da seguinte maneira:

A primeira etapa é a alimentação do sistema com uma fonte de tensão de 5V. Após isso, o *firmware* do sistema inicializa já fazendo a conexão do microcontrolador com a rede WIFI utilizando os dados de usuário e senha definidos.

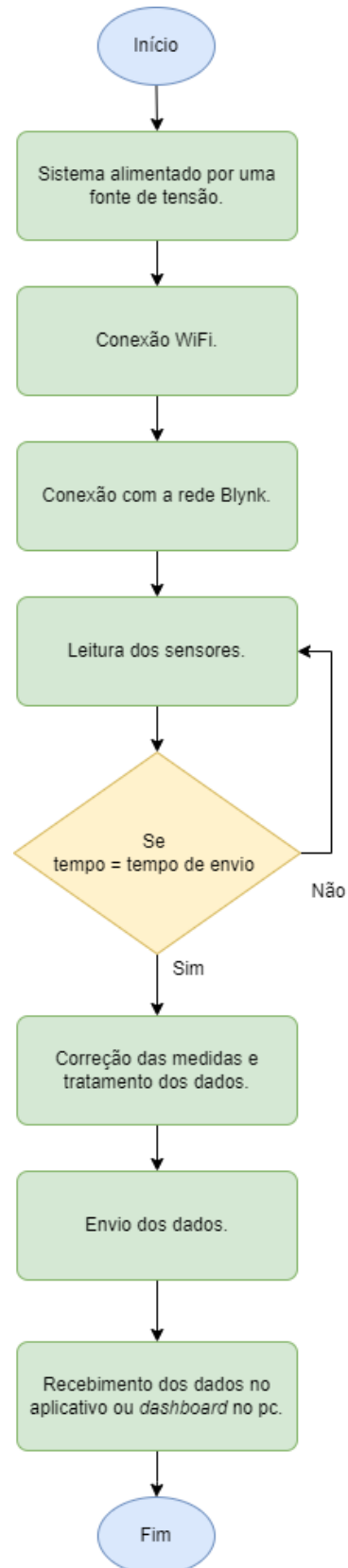
Confirmada a conexão com a rede WIFI do usuário, o sistema inicializa a conexão do microcontrolador com a rede *Blynk*, tornando o sistema apto para enviar os dados medidos. Após isso, o microcontrolador permanece realizando a leitura dos sensores de tensão e corrente e aguarda o temporizador atingir o tempo de envio definido no firmware. Caso o temporizador não atinja o tempo de envio, o microcontrolador permanece realizando a leitura dos sensores até que este evento ocorra.

Quando o temporizador atinge o tempo de envio dos dados para a rede *Blynk*, o microcontrolador realiza a correção e tratamento dos dados medidos e envia estes dados via WIFI para a rede *Blynk*.

Após isso, o aplicativo recebe os dados que ficam disponíveis para o usuário final consultar a hora que quiser, seja por aplicativo de celular ou na *dashboard* que pode ser acessada através do navegador de internet.

Todo o funcionamento do sistema de monitoramento de energia está representado no diagrama da figura a seguir, mostrando detalhadamente a correlação e funcionamento de cada recurso do sistema.

Figura 21 - Diagrama de funcionamento do sistema de monitoramento de energia.



Fonte: Própria.

Para facilitar os testes e desenvolvimento seguro, rápido e prático do projeto, as cargas de uma residência foram simuladas através de duas lâmpadas de modelos diferentes, o que tornou a obtenção de resultados muito mais rápida e segura, não tendo a necessidade de se ter contato com painéis elétricos energizados para que fossem coletados os resultados.

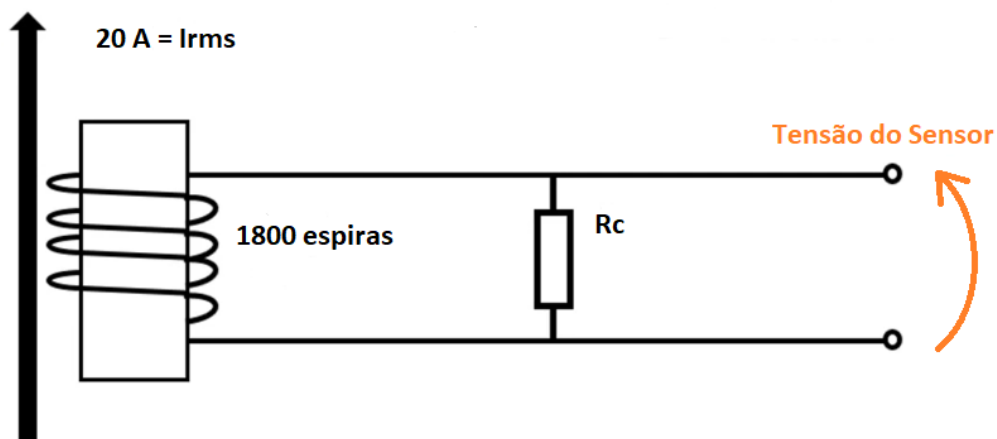
3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

- Lâmpada LED Artec 7w – 1 unidade.
- Lâmpada LED Artec 15w – 1 unidade.
- Interruptor duplo 10A – 1 unidade.
- Bocal de Porcelana E27 – 2 unidades.
- ESP32 WROOM DevKit – 1 unidade.
- Sensor de corrente SCT013 – 1 unidade.
- Transformador de tensão ZMPT101B – 1 unidade.
- Protoboard 830 furos – 1 unidade.
- Placa fenolite perfurada – 1 unidade.
- Pinsocket – 2 unidades.
- Conector Borne 2 entradas – 1 unidades.
- Alicates de corte – 1 unidade.
- Alicates de bico – 1 unidade.
- Cabo 1,5 mm – 4 metros.
- Multímetro Minipa HD2400 – 1 unidade.
- Multímetro Minipa ET-3111 – 1 unidade.
- Disjuntor 2 A Metaltex – 1 unidade.
- Estação de solda HAKO FX-951.

3.2 Dimensionamento de Componentes

Na figura 22 pode-se ver uma representação do circuito do sensor de corrente e seu resistor de carga. Para isso, precisamos realizar o cálculo do valor da resistência deste resistor.

Figura 22 - Representação do circuito do sensor de corrente.



Fonte: Própria.

Antes de tudo, será calculado o valor do resistor de carga que será utilizado para o sensor de corrente SCT013-020. Como o sensor escolhido é de 20 A (Existem modelos de até 100A), a corrente máxima de pico no primário deve ser:

$$I_{PP} = I_{RMS} \times \sqrt{2} = 20 \times 1,414 = 28,28 \text{ A}$$

Com isso, calculou-se a corrente máxima de pico no secundário de acordo com a equação abaixo:

$$I_{PS} = \frac{I_{PP}}{N} = \frac{28,28}{1800} = 0,01571 \text{ A}$$

Após encontrado este valor, foi possível calcular o valor do resistor de carga a ser usado junto ao sensor de corrente SCT013-020.

$$R_c = \frac{2,5}{I_{PS}} = \frac{2,5}{0,01571} = 159,12 \text{ } \Omega$$

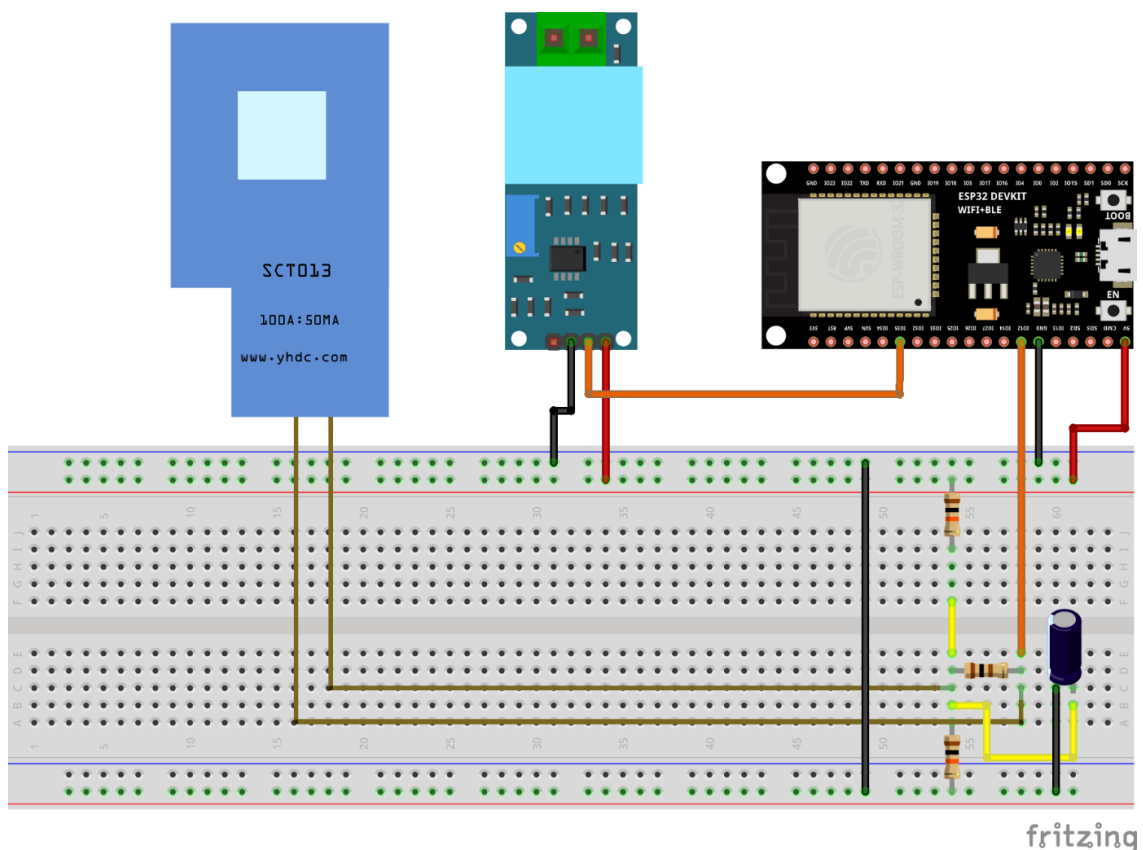
Com os valores calculados, foi escolhido o valor de resistor comercial mais próximo do calculado que é de 160Ω . Contudo, não foi possível adquirir com facilidade um resistor com esse valor, então foi decidido utilizar um potenciômetro de $1 \text{ k}\Omega$ e ajustá-lo para 160Ω , permitindo que a realização do projeto fosse feita com sucesso.

3.3 Desenvolvimento do Protótipo

Para este primeiro protótipo foi decidido usar ferramentas e componentes de baixa complexidade, que pudessem ser encontrados com facilidade e baixo custo. Esses componentes deveriam facilitar o desenvolvimento do sistema e garantir o seu funcionamento e confiabilidade.

Com isso, para diminuir os custos, foi decidido já utilizar os sensores escolhidos para o sistema final e utilizar uma protoboard para que as conexões fossem feitas em pouco tempo, não necessitando ainda do desenvolvimento do esquemático e layout da placa do modelo final.

Figura 23 - Esquema do protótipo de testes.

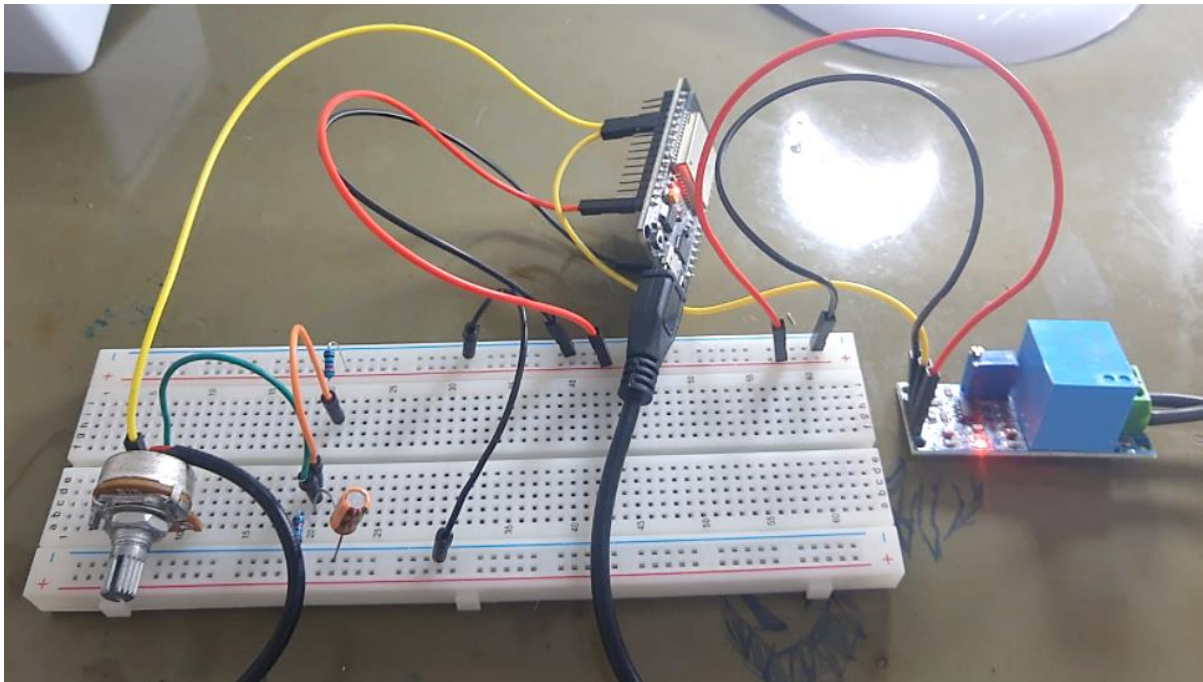


Fonte: Própria.

Na figura 23 pode-se verificar o esquema da primeira versão do primeiro protótipo de testes do sistema. Nela é possível ver as conexões dos sensores junto ao microcontrolador ESP32. É possível verificar também o circuito divisor de tensão junto ao resistor de carga do sensor de corrente.

Na figura abaixo é possível verificar a montagem do primeiro protótipo do sistema de monitoramento de energia elétrica. Como mencionado anteriormente, foi utilizado um potenciômetro ajustado para 160Ω no lugar do resistor de 160Ω . Foi utilizada essa manobra por conta da dificuldade de se encontrar e adquirir com facilidade um resistor de carga com esse valor.

Figura 24 - Protótipo de testes.



Fonte: Própria.

Além disso, para as conexões foram utilizados jumpers a protoboard para facilitar a montagem e diminuir o tempo de validação do protótipo inicial.

Para a realização dos testes do protótipo foram utilizadas duas lâmpadas LED de potências diferentes, sendo uma de 7W e outra de 15W. Ambas as lâmpadas foram conectadas em bocal E27 e sendo acionadas por um interruptor duplo de 10 A. Para a segurança dos testes no sistema, foi utilizado um disjuntor Metaltex de 2 A.

Para a realização dos testes foi utilizado um multímetro Minipa ET-3111. Este é um alicate amperímetro muito utilizado no meio industrial e que nos permite realizar as medições de corrente de forma não invasiva, permite-nos medir tensão e conseqüentemente a potência em Watts do sistema. É importante frisar que este multímetro possui uma faixa de erro tolerável dependendo da faixa de corrente a ser medida. Para a faixa de corrente de 0 a 20 A, como necessário para os testes do projeto, a incerteza tolerável é de 3%.

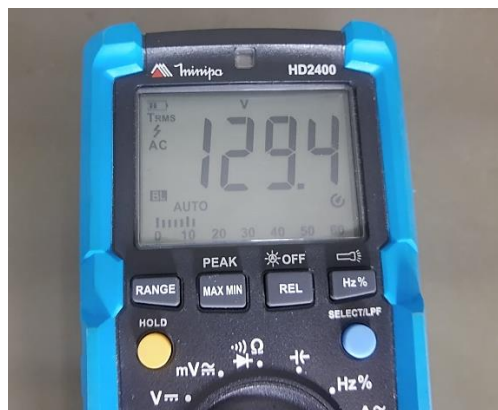
Figura 25 - Multímetro utilizado nos testes.



Fonte: Própria.

Este multímetro foi utilizado para fins de comparação com as grandezas medidas pelo sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica. Também foi utilizado um multímetro Minipa HD2400 para o desenvolvimento do projeto, enquanto o multímetro CT3111 era usado para medir grandezas AC, o multímetro HD2400 foi usado para medir grandezas DC.

Figura 26 - Multímetro HD2400 medindo a tensão da rede.



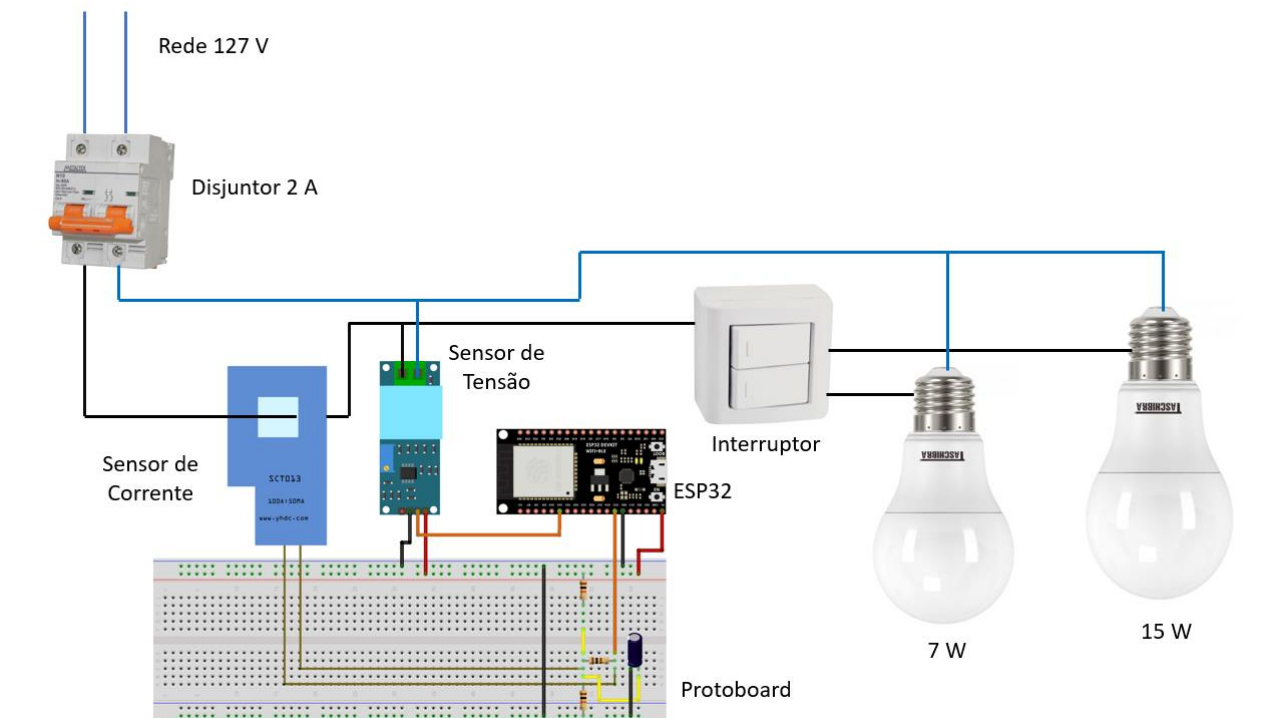
Fonte: Própria.

Na figura 27 é possível verificar o esquema de como foram realizados os testes do hardware e firmware do sistema de monitoramento de consumo de energia.

Neste esquema, o disjuntor de 2 A é conectado a rede elétrica de 127 V para garantir a segurança não só dos componentes, mas também do operador do sistema durante os testes.

Após passar pelo disjuntor, o cabo elétrico de fase foi envolvido pelo sensor de corrente SCT013 e foi feita uma ramificação para que fosse possível fazer a leitura do sensor de tensão ZMPT101B. Após isso o cabo de fase vai direto para o interruptor que comandará qual lâmpada deve ser acionada.

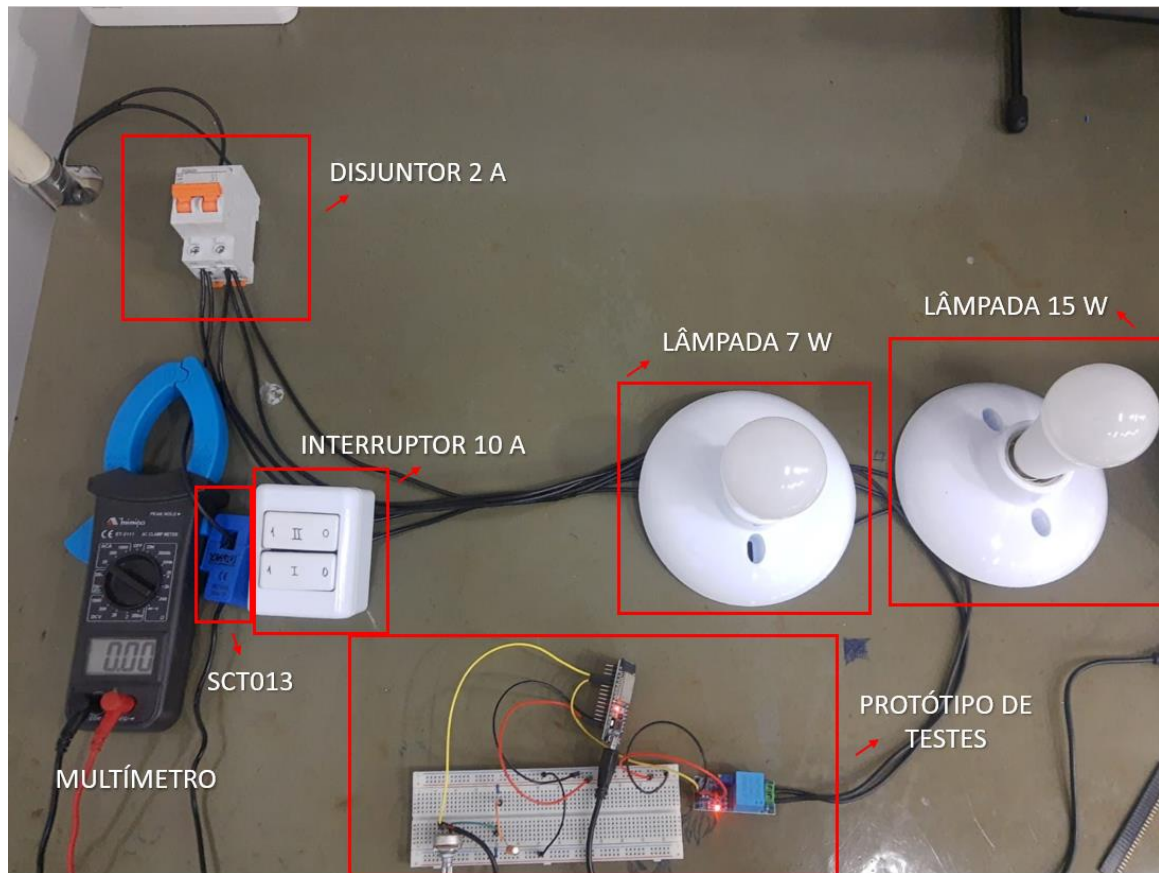
Figura 27 - Esquema do protótipo de teste.



Fonte: Própria.

Na figura 28 pode-se visualizar o cenário completo para realizar os testes, incluindo o protótipo de testes e também o sistema montado para a realização dos testes.

Figura 28 - Protótipo de testes junto ao sistema de testes.



Fonte: Própria.

Na figura a seguir pode-se visualizar o sensor de corrente montado junto ao multímetro. Veja que ambos estão envolvendo o mesmo cabo, sendo assim, tendo ambos a mesma leitura de corrente.

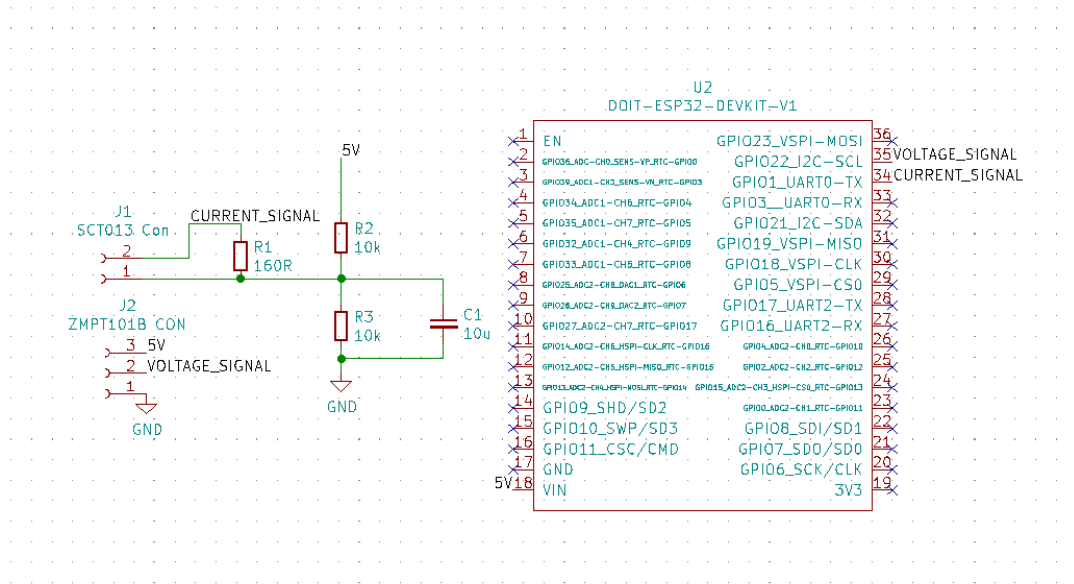
Figura 29 - Sensor de corrente montado junto ao multímetro.



Fonte: Própria.

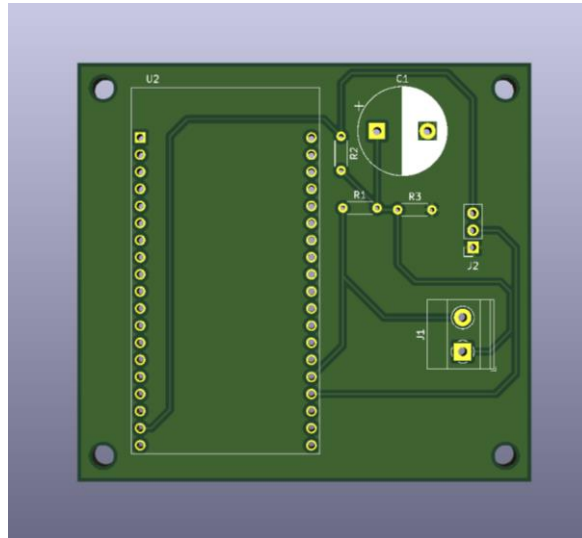
Após a constatação do funcionamento do hardware e firmware do sistema, foi criado o esquemático e o *Laoyt* final da placa para ser produzida. O projeto da placa foi desenvolvido utilizando o software Kicad.

Figura 30 - Esquemático da placa do sistema.



Na figura 32 é possível ver os modelos 3D da placa do sistema de monitoramento de energia. Foi decidido usar o microcontrolador encaixado em conectores do tipo socket 2,54mm por conta da facilidade de desenvolvimento que isso traria. Caso fosse decidido usar o ESP32 na placa como SMD seria necessário dimensionar o conversor de tensão da fonte de alimentação do chip e a solda seria mais trabalhosa e demorada devido ser solda SMD.

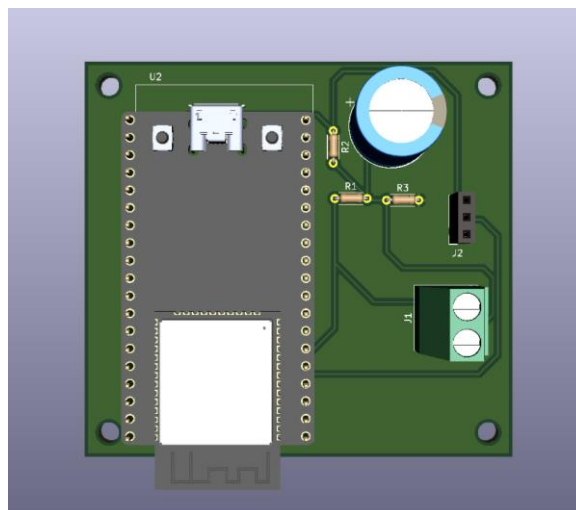
Figura 32 - 3D da placa do sistema sem os componentes.



Fonte: Própria.

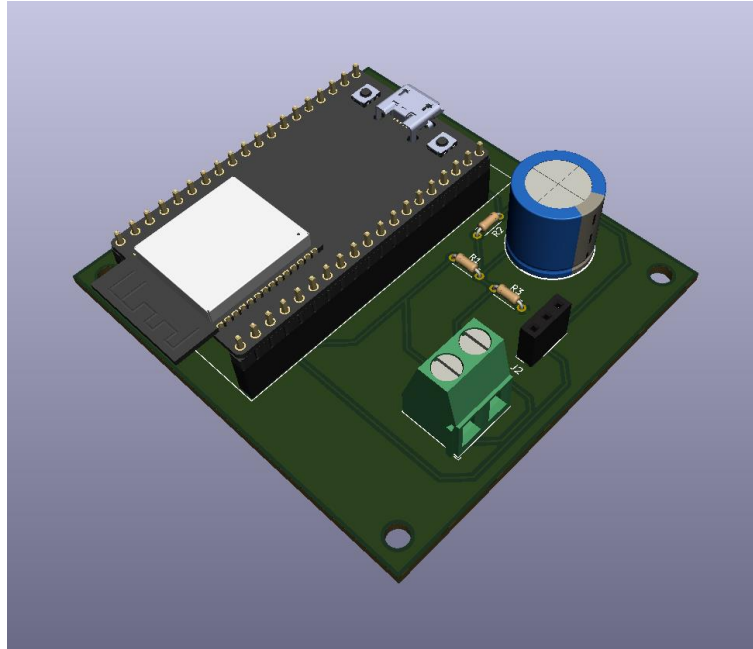
A placa é de apenas uma face e todos os componentes escolhidos são do tipo THT – *Through Hole Technology*.

Figura 33 - Modelo 3D da placa do sistema.



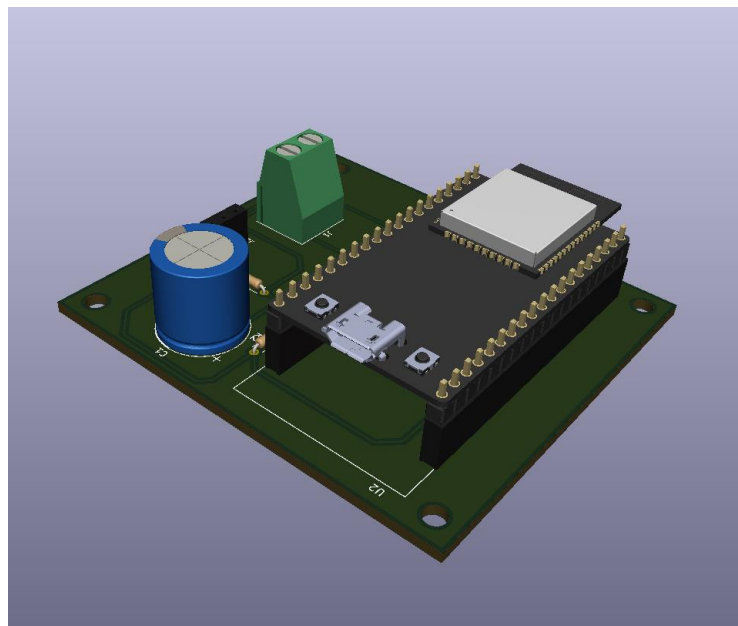
Fonte: Própria.

Figura 34 - Modelo 3D da placa do Sistema.



Fonte: Própria.

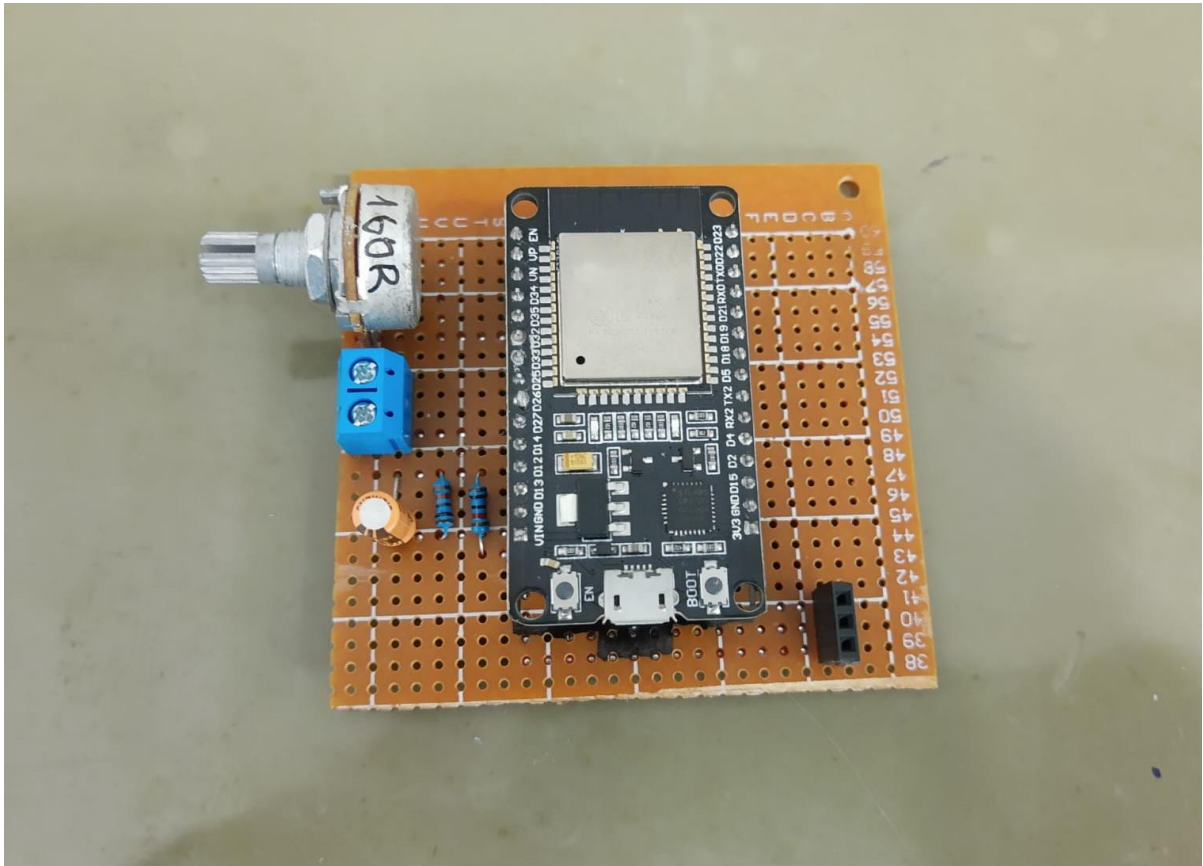
Figura 35 - Modelo 3D da placa do Sistema.



Fonte: Própria.

Apesar de todo o projeto do esquemático e do layout da placa do sistema estar desenvolvido, houve uma certa dificuldade para a mesma fosse fabricada. Com isso, ainda sendo necessária a criação de uma segunda versão do hardware do sistema de monitoramento, foi decidido desenvolver uma placa utilizando o método de placa perfurada, onde as trilhas são feitas por meio de fios ou trilhas de solda.

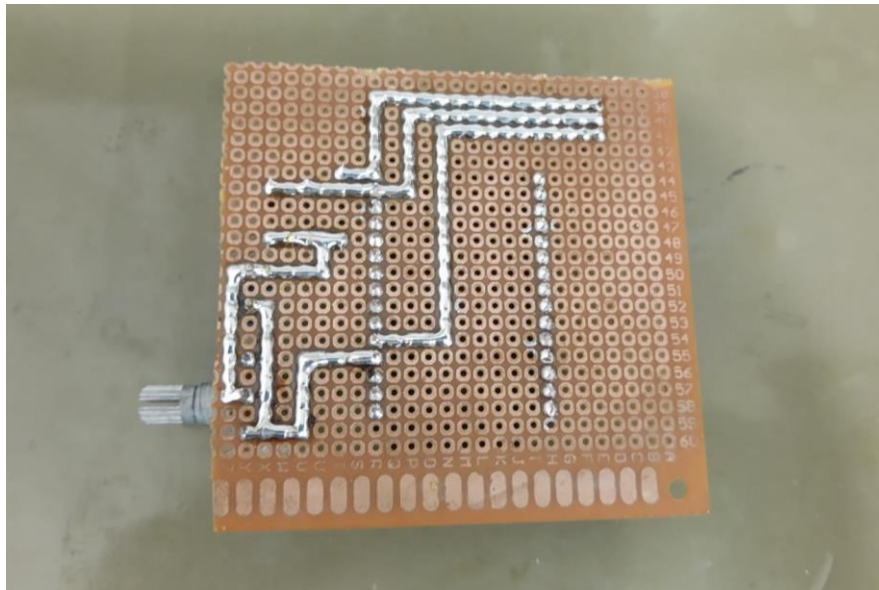
Figura 36 - Segunda versão do protótipo de hardware do sistema.



Fonte: Própria.

Note que os mesmos componentes utilizados na primeira versão de testes e validação estão contidos nesta versão, diferindo somente o fato de que os componentes desta vez estão fixados por meio de solda em seus terminais, diminuindo a possibilidade de falhas, ruídos no sinal e aumentando a confiabilidade das leituras dos valores medidos.

Figura 37 - Segunda versão do protótipo de hardware do sistema.

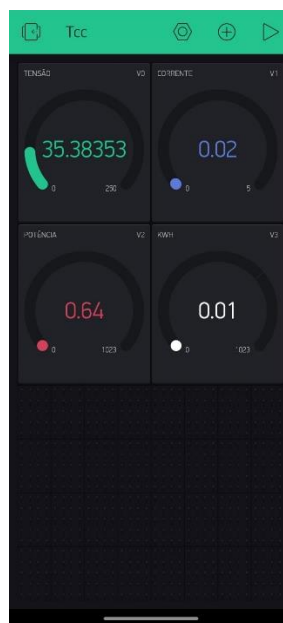


Fonte: Própria.

Também foi desenvolvido o aplicativo de celular para que o usuário possa monitorar o consumo de energia elétrica com mais facilidade.

A criação deste aplicativo foi muito mais fácil por ter sido utilizado a plataforma *Blynk* que já dispõe de toda estrutura necessária para este tipo de aplicação, como ilustrado na figura 38.

Figura 38 - Aplicativo de celular mostrando informações de consumo de energia.



Fonte: Própria.

4 TESTES E RESULTADOS

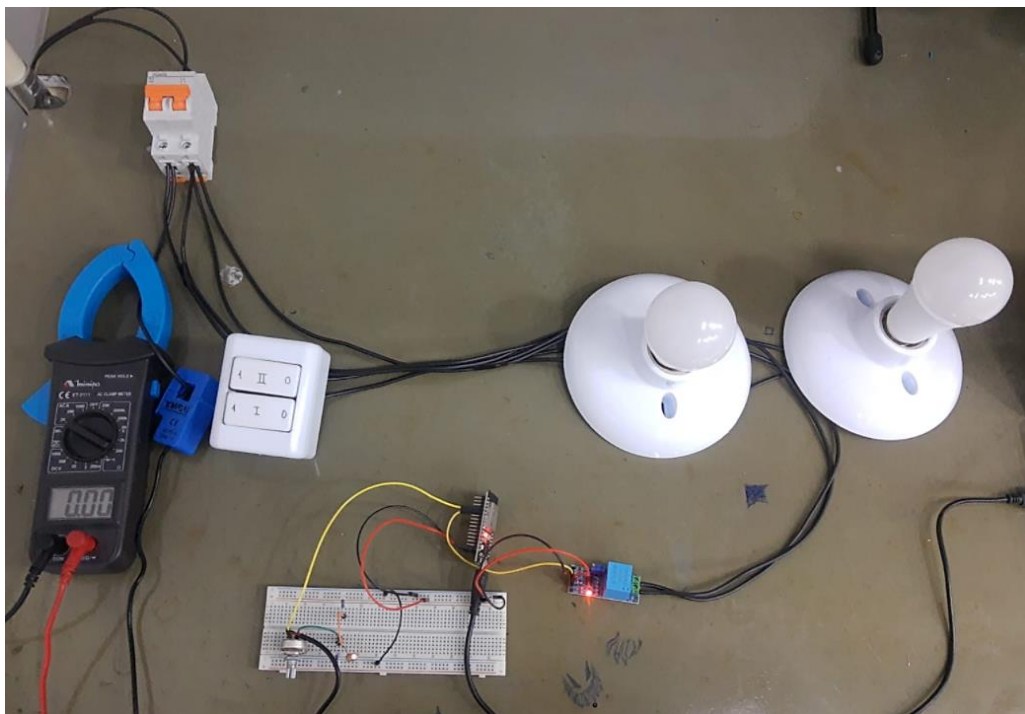
Os testes do sistema foram realizados utilizando como parâmetros de comparação as medidas realizadas pelos multímetros HD2400 e CT3111.

Para a realização dos testes coleta dos dados foram adotados os seguintes passos:

Primeiramente o sistema foi testado todo desativado, sem nenhuma carga consumindo energia (com as duas lâmpadas desligadas). Foi realizada a medição de corrente e tensão através do multímetro CT311 e através do sistema de monitoramento desenvolvido. Os resultados são mostrados na Tabela 01.

Note que o sistema de monitoramento mostrou valores que, mesmo sendo muito pequenos, são diferentes de zero, como esperado.

Figura 39 - Esquema de testes com as duas lâmpadas desligadas.



Fonte: Própria.

Tabela 1 - Valores medidos para as duas lâmpadas desligadas.

0 W	Vrms (V)	Irms (A)	Potência (W)	Vrms (V) Multímetro ET-3111	Irms (A) Multímetro ET-3111	Potência (W) Multímetro ET-3111
	126,26	0,01	1,2626	129,4	0	0
	127,4	0	0	129,4	0	0
	129,33	0,012	1,55196	129,4	0	0
	127,45	0,003	0,38235	129,4	0	0
	126,32	0,007	0,88424	129,4	0	0
	127,01	0,001	0,12701	129,4	0	0
	128,79	0,013	1,67427	129,4	0	0
	128,01	0,009	1,15209	129,4	0	0
	129,64	0,002	0,25928	129,4	0	0
	129,21	0	0	129,4	0	0
	125,9	0,004	0,5036	129,4	0	0
	127,69	0	0	129,4	0	0
	127,99	0,001	0,12799	129,4	0	0
	128,17	0,008	1,02536	129,4	0	0
	127,22	0,005	0,6361	129,4	0	0
MÉDIA	127,69	0,004	0,51076	129,4	0	0

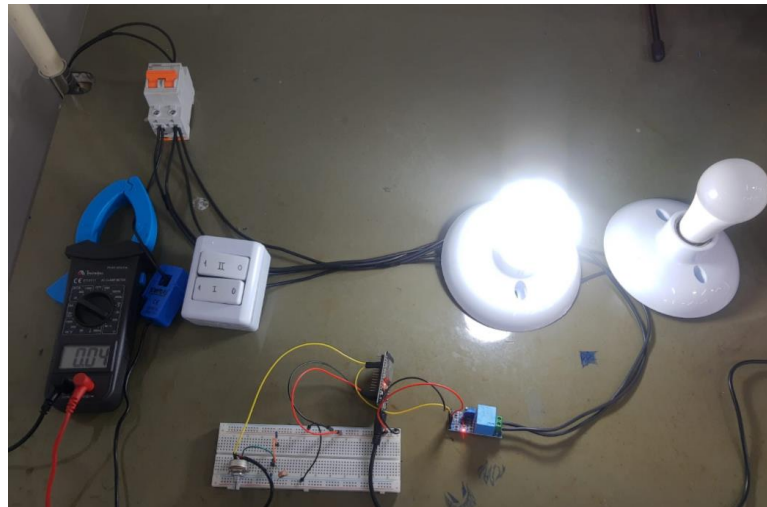
Fonte: Própria.

Essas medidas de corrente quando nenhuma carga está consumindo energia se devem a imprecisão do sensor que, em menores valores de corrente AC, tem maiores valores de imprecisão.

Após isso, a lâmpada de 7 W foi acionada para que fosse possível realizar as medições das grandezas com somente uma carga. Os resultados das medições podem ser visualizados na Tabela 2. Note que a lâmpada de 7 W consome pouca corrente comparado a capacidade de medida do sensor de corrente SCT013.

Além disso, pode-se verificar que os resultados medidos são satisfatórios e bem próximos da potência nominal da lâmpada de 7 W, seja medindo pelo sistema de monitoramento de consumo de energia ou pelo multímetro CT3111.

Figura 40 - Sistema de testes com lâmpada de 7 W acionada.



Fonte: Própria.

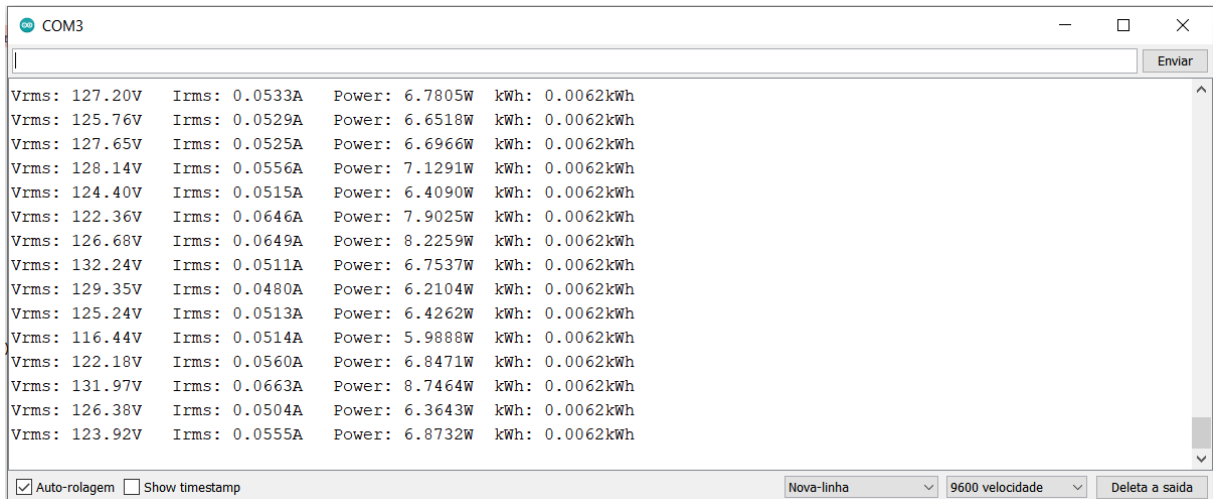
Tabela 2 - Valores medidos com a lâmpada de 7 W ligada.

7W	Vrms (V)	Irms (A)	Potência (W)	Vrms (V) Multímetro ET-3111	Irms (A) Multímetro ET-3111	Potência (W) Multímetro ET-3111
	128,45	0,0533	6,846385	129,2	0,048	6,2016
	126,82	0,0529	6,708778	129,2	0,048	6,2016
	125,76	0,0535	6,72816	129,2	0,048	6,2016
	124,4	0,0556	6,91664	129,2	0,048	6,2016
	126,68	0,0515	6,52402	129,2	0,048	6,2016
	131,97	0,0646	8,525262	129,2	0,048	6,2016
	126,38	0,0649	8,202062	129,2	0,048	6,2016
	127,92	0,0511	6,536712	129,2	0,048	6,2016
	128,01	0,048	6,14448	129,2	0,048	6,2016
	127,23	0,0513	6,526899	129,2	0,048	6,2016
	124,31	0,0514	6,389534	129,2	0,048	6,2016
	129,35	0,056	7,2436	129,2	0,048	6,2016
	129,21	0,0663	8,566623	129,2	0,048	6,2016
	130,02	0,0504	6,553008	129,2	0,048	6,2016
	126,98	0,0555	7,04739	129,2	0,048	6,2016
MÉDIA	127,23	0,0533	6,781359	129,2	0,048	6,2016

Fonte: Própria.

Na figura 41 é possível visualizar os valores medidos através da porta serial do ESP32. Foi utilizado esse método para monitorar os dados por conta de o aplicativo ainda não estar completo nesta etapa.

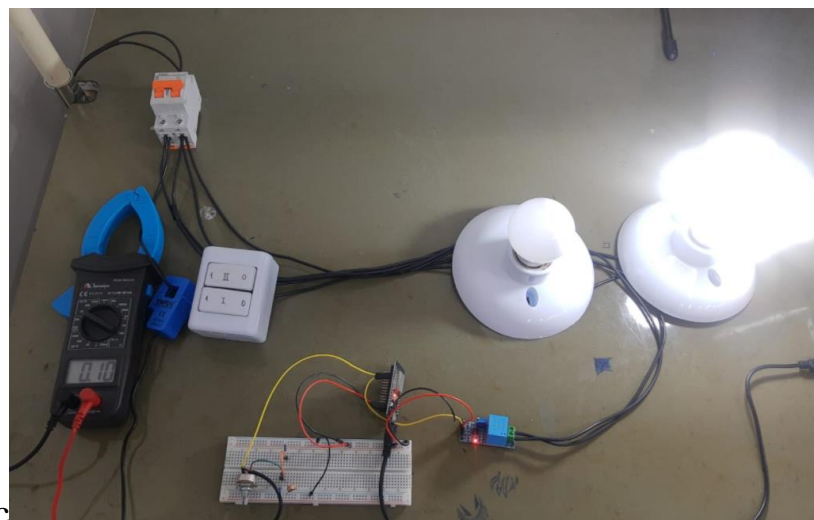
Figura 41 - Monitoramento dos valores medidos com a lâmpada de 7 W ligada.



Fonte: Própria.

Os testes feitos a seguir são com a lâmpada de 15 W ativada. Como esta segunda tem potência nominal diferente da primeira, os valores medidos devem ser bem diferentes dos valores medidos no teste com a lâmpada de 7 W.

Figura 42 - Sistema de testes com a lâmpada de 15 W acionada.



Fonte: Própria.

Com isso, pode-se verificar os valores medidos de tensão e corrente pelo sistema na Tabela 03. Note que os valores médios de tensão, corrente e potência são bem próximos do valor nominal de potência da lâmpada de 15 W. Note também que os valores medidos pelo sistema de monitoramento de energia e os valores medidos pelo multímetro CT3111 são bem aproximados. Isso demonstra a confiabilidade dos valores lidos pelo sistema e mostra que podemos ter resultados muito bons com o sistema.

Tabela 3 - Valores medidos com a lâmpada de 15 W ligada.

15W	Vrms (V)	Irms (A)	Potência (W)	Vrms (V) Multímetro ET-3111	Irms (A) Multímetro ET-3111	Potência (W) Multímetro ET-3111
	127,63	0,108	13,78404	129,2	0,11	14,212
	124,98	0,112	13,99776	129,2	0,11	14,212
	131,01	0,103	13,49403	129,2	0,11	14,212
	128,33	0,127	16,29791	129,2	0,11	14,212
	125,44	0,109	13,67296	129,2	0,11	14,212
	126,81	0,124	15,72444	129,2	0,11	14,212
	128,79	0,98	126,2142	129,2	0,11	14,212
	128,01	0,121	15,48921	129,2	0,11	14,212
	129,29	0,113	14,60977	129,2	0,11	14,212
	129,03	0,108	13,93524	129,2	0,11	14,212
	124,55	0,115	14,32325	129,2	0,11	14,212
	127,21	0,113	14,37473	129,2	0,11	14,212
	127,63	0,107	13,65641	129,2	0,11	14,212
	127,97	0,119	15,22843	129,2	0,11	14,212
	127,08	0,102	12,96216	129,2	0,11	14,212
MÉDIA	127,63	0,113	14,42219	129,2	0,11	14,212

Fonte: Própria.

O próximo teste realizado foi com o cenário onde as duas lâmpadas estão ligadas. Como as duas lâmpadas juntas tem potência nominal de 22 W, os valores esperados medidos pelo sistema de monitoramento de energia são bem próximos deste valor.

Figura 43 - Sistema de testes com as duas lâmpadas acionadas.



Fonte: Própria.

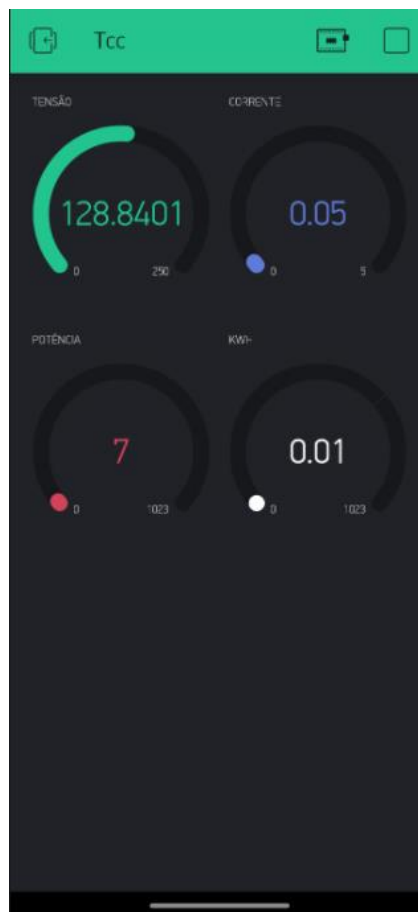
Tabela 4 - Valores medidos com as duas lâmpadas ligadas.

15W + 7W	Vrms (V)	Irms (A)	Potência (W)	Vrms (V) Multímetro ET-3111	Irms (A) Multímetro ET-3111	Potência (W) Multímetro ET-3111
	126,23	0,165	20,82795	129,4	0,16	20,704
	126,32	0,162	20,46384	129,4	0,16	20,704
	129,98	0,169	21,96662	129,4	0,16	20,704
	127,05	0,159	20,20095	129,4	0,16	20,704
	125,44	0,166	20,82304	129,4	0,16	20,704
	126,81	0,163	20,67003	129,4	0,16	20,704
	128,79	0,158	20,34882	129,4	0,16	20,704
	128,01	0,171	21,88971	129,4	0,16	20,704
	129,29	0,172	22,23788	129,4	0,16	20,704
	129,03	0,169	21,80607	129,4	0,16	20,704
	125,82	0,175	22,0185	129,4	0,16	20,704
	127,65	0,177	22,59405	129,4	0,16	20,704
	128,01	0,168	21,50568	129,4	0,16	20,704
	127,89	0,167	21,35763	129,4	0,16	20,704
	128,07	0,161	20,61927	129,4	0,16	20,704
MÉDIA	127,89	0,167	21,35763	129,4	0,16	20,704

Fonte: Própria.

Feitos os testes em todas as funções do sistema de monitoramento de energia, o próximo passo foi de criar o aplicativo no celular utilizando a plataforma *Blynk* e estabelecer a comunicação do *hardware* com este aplicativo. Através do firmware e utilizando as bibliotecas disponibilizadas pela própria plataforma *Blynk*, foi possível estabelecer a conexão via WiFi e enviar as medições já corrigidas para a rede e posteriormente capturá-las no aplicativo para que possam ser consultadas pelo usuário.

Figura 44 - Aplicativo de celular mostrando as medições do sistema.



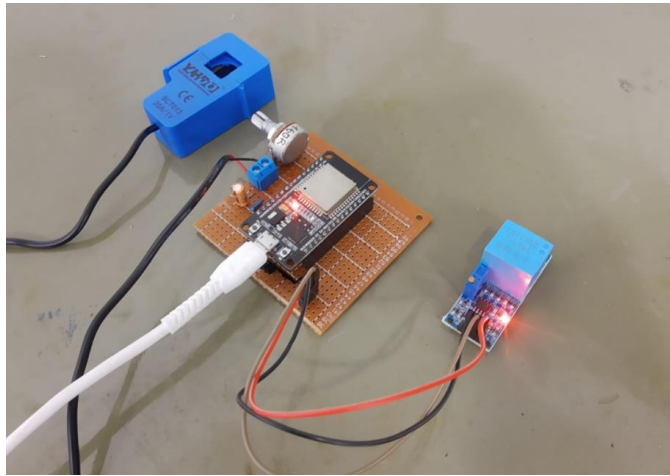
Fonte: Própria.

Após terem sido realizados todos os testes no sistema, verificou-se a sua confiabilidade e funcionalidade. Com isso, foi possível perceber que os valores medidos são bem aproximados dos esperados, sendo necessário apenas alguns ajustes para tentar melhorar ainda mais a incerteza das medidas.

CUSTO DA SOLUÇÃO

Atualmente é possível encontrar algumas soluções de mercado que realizam o monitoramento do consumo de energia elétrica com alta precisão e confiabilidade. Contudo, algumas não disponibilizam esses dados para acesso fácil do usuário ou necessitam de alto investimento para seu uso.

Figura 45 - Segunda versão do protótipo do sistema.



Fonte: Própria.

Na figura 46 pode-se visualizar uma solução muito comum no mercado. O medidor de energia WEG MMW02 é um medidor que permite a leitura de grandezas elétricas. Com este produto só é possível visualizar as medidas em seu display e o mesmo não disponibiliza estes valores em outros meios mais acessíveis.

Figura 46 - Medidor de Energia WEG MMW02.



Fonte: WEG, 2020.

Também é possível encontrar soluções mais robustas no mercado, que possuem mais funções e são mais completas para que seja possível realizar um monitoramento de energia mais eficaz. Uma delas é o equipamento KS-3000, mostrado na figura 47. Este equipamento é um multimedidor de grandezas elétricas aplicados para sistemas de internet das coisas – IOT. Possui comunicação WiFi, *Long Range* - LoRa e ModBus.

Figura 47 - Medidor de Energia KS-3000.



Fonte: KRON, 2021.

Comparando o custo de cada um desses medidores junto ao desenvolvido neste projeto, verifica-se que existe uma disparidade muito grande de valores. Isso é devido principalmente a esses modelos apresentados serem equipamentos profissionais e já estabelecidos no mercado e o valor apresentado na tabela abaixo ser referente ao protótipo desenvolvido.

Tabela 5 - Comparação de valores de medidores de energia.

Equipamento	Custo
Protótipo desenvolvido	R\$ 420,00
MMW02	R\$ 1.899,90
KS-3000	R\$ 3.600,00

Fonte: Própria.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve o intuito realizar um estudo acerca dos parâmetros que definem a qualidade da energia elétrica e de desenvolver um sistema de monitoramento de energia elétrica baseado na leitura de sensores de corrente e tensão para que seja possível realizar o envio dessas medidas através da internet e a visualização desses dados através do aplicativo de celular ou dashboard no navegador do computador.

Foi apresentado um breve estudo acerca dos conceitos de qualidade de energia elétrica e dos parâmetros que definem a qualidade de energia elétrica. Além disso, foram mostrados os conceitos necessários para o desenvolvimento do projeto.

Com o aumento contínuo do valor da tarifa de energia elétrica no Brasil e com a crise hídrica que a cada ano se agrava faz-se necessário desenvolver novas tecnologias que possam ajudar a diminuir o consumo de energia desnecessário e que permita fazer o gerenciamento do consumo de energia elétrica com mais facilidade.

Com isso, foi desenvolvida esta pesquisa junto ao sistema de monitoramento de energia pensando em amparar os consumidores finais, que podem ter um equipamento de baixo custo e que facilite o controle do seu consumo de energia.

Durante o desenvolvimento deste projeto houve algumas dificuldades, algumas por conta de atraso na entrega de componentes e também pela falta de alguns componentes no Brasil, componentes estes que foram planejados inicialmente e essa escassez gerou atrasos no desenvolvimento do projeto e até mesmo modificações no hardware do projeto, que foi primeiramente pensado para abranger mais funcionalidades.

Por fim, o desenvolvimento do projeto foi finalizado com sucesso e a pesquisa realizada foi muito esclarecedora e poderá servir para trabalhos futuros, onde o intuito será, além de realizar o monitoramento do consumo de energia, realizar também o monitoramento de outros parâmetros que definem a qualidade da energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8.**

Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 18 de novembro de 2021.

BLYNK. *Introduction to Blynk*. 2020. Disponível em: <<https://docs.blynk.io/en/>>. Acesso em: 24 de junho de 2021.

BOYLESTAD, Robert. **Introdução à Análise de Circuitos Elétricos**. 8 Ed. Rio de Janeiro. Prentice Hall. 1998.

CABRAL, A. S. et al. **Desafio Solar Brasil: Ferramenta de Ensino e Promoção de Fontes Renováveis de Energia**. Juiz de Fora - MG: Anais do Cobenge 2014. 2014. p. 11.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 15 ed. Rio de Janeiro. LTC. 2007.

DEMETRAS, Ezequiel. 2017. **SCT-013: Sensor de corrente alternada com Arduino**. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/>>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

ESP32.NET. *The Internet of Things with ESP32*. 2021. Disponível em: <<http://esp32.net/>>. Acesso em: 28 de junho de 2021.

EPE. **O consumo de energia elétrica no Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-o-consumo-de-energia-eletrica-no-brasil-em-setembro-de-2020-totalizou-40-227-gwh#:~:text=do%20ciclo%202019-,Resenha%20Mensal%3A%20O%20consumo%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20no%20Brasil%20em,de%202020%20totalizou%2040.227%20GWh>> Acesso em: 23 de Junho de 2021.

ESPRESSIF. **ESP32**. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>>. Acesso em: 01 de julho de 2021.

EXPLORE EMBEDDED. *Overview of ESP32 features*. 2017. Disponível em: <https://www.exploreembedded.com/wiki/Overview_of_ESP32_features._What_do_they_practically_mean%3F>. Acesso em: 22 de junho de 2021.

FRITZING. *Electronics made easy*. Disponível em: < <https://fritzing.org/>>. Acesso em: 18/10/2021.

GIRARDI, GREYCI. **Por que monitorar o consumo de energia elétrica**. 2019. Disponível em: < <https://www.way2.com.br/blog/monitorar-consumo-de-energia/>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

HOW2ELETRONICS. **IOT Energy Meter**. 2021. Disponível em: <<https://how2electronics.com/iot-based-electricity-energy-meter-using-esp32-blynk/>>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

KRON. **KS-3000**. 2021. Disponível em: <<https://kron.com.br/produto/ks-3000/>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2021.

MEDICCI, Thiago. **Introdução ao Blynk app**. 2018. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-blynk-app/>>. Acesso em: 24 de junho de 2021.

NERI, Renan. **MQTT**. 2019. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/mqtt/>>. Acesso em: 6 de fev. de 2021.

PUCRS. **Medidores de Energia Elétrica**. 2020. Disponível em: <<https://www.pucrs.br/labelo/o-significado-do-led-que-pisca-nos-medidores-eletronicos-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 20 de julho de 2021.

RANDOM NERD TUTORIALS. **ESP32 pinout reference**. Disponível em: <<https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/>>. Acesso em: 22 de junho de 2021.

REDHAT. **What is an IDE**. 2019. Disponível em: <<https://www.redhat.com/en/topics/middleware/what-is-ide>>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

ROLIM, M. E. **Análise da qualidade de energia elétrica: Distorções harmônicas em uma planta industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Porto Alegre: UFRG, 2015.

SANT'ANA, Jéssica. **Com crise hídrica, ANEEL já estima alta de 5% nas contas de luz do ano que vem**. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/06/15/com-crise-hidrica-aneel-ja-estima-alta-de-5percent-nas-contas-de-luz-do-ano-que-vem.ghtml>>. Acesso em: 22 de junho de 2021.

SANTOS, Thuany. **Tensão e corrente elétrica**. 2021. Disponível em: <<https://www.ocaenergia.com/blog/eletricidade/tensao-e-corrente-eletrica-voce-sabe-a-diferenca-entre-elas/>>. Acesso em: 24 de junho de 2021.

TEJA, Ravi. **Getting Started with ESP32**. 2021. Disponível em: <<https://www.electronicshub.org/getting-started-with-esp32/>>. Acesso em: 01 de julho de 2021.

WALL, Robert. **YHDC SCT-013-000 Current Transformer**. Disponível em: <<https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/yhdc-sct-013-000-ct-sensor-report>>. Acesso em: 01 de julho de 2021.

WEG. **Medidor de grandezas elétricas MMW02**. 2020. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Multimedidores-e-Medidores-Inteligentes/Multimedidor-de-Grandezas-El%C3%A9tricas-MMW02/Multimedidor-de-Grandezas-El%C3%A9tricas-MMW02/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_METERS_MMW02>. Acesso em: 14 de dezembro de 2021.

YHDC. **Current Transformer SCT013 Datasheet**. Disponível em: <https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_SCT013.pdf> Acesso em: 22 de junho de 2021.