

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



LUCAS SEMPRINI DE FREITAS

**SISTEMA EMBARCADO DE MONITORAMENTO ONLINE
DE UMA REDE ELÉTRICA RESIDENCIAL**

VITÓRIA – ES
JULHO/2019

LUCAS SEMPRINI DE FREITAS

**SISTEMA EMBARCADO DE MONITORAMENTO ONLINE DE UMA
REDE ELÉTRICA RESIDENCIAL**

Parte manuscrita de Projeto de Graduação do aluno Felipe Silva Oliveira, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

VITÓRIA – ES
JULHO/2019

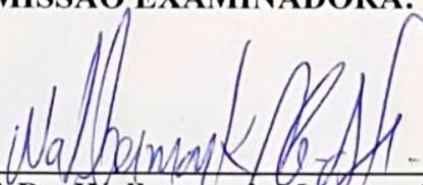
LUCAS SEMPRINI DE FREITAS

**SISTEMA EMBARCADO DE MONITORAMENTO ONLINE DE UMA
REDE ELÉTRICA RESIDENCIAL**

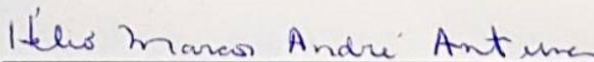
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Lucas Semprini de Freitas**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 18, de julho de 2019.

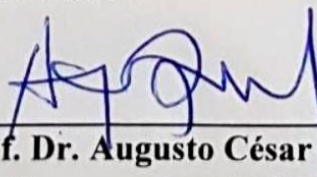
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Walbermark Marques Santos
UFES
Orientador



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
UFES
Examinador



Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina
UFES
Examinador

Aos meus pais, minha esposa, minha filha, meus avós
e a todos meus queridos amigos.

RESUMO

Desde a segunda revolução industrial a dependência do ser humano para com a energia elétrica se amplia e, com o recente impulsionamento de tecnologias como inteligência artificial, realidade aumentada, robótica, nanotecnologia, *big data* e internet das coisas, a interconexão entre o mundo física e o digital é inevitável. Por essa razão, nesse trabalho, é exposto o processo de confecção de um sistema embarcado de monitoramento *online* de uma rede elétrica residencial. Nele, são abordados temas como cálculo de potência, eletrônica, calibração de sensores, protocolo de comunicação, banco de dados e programação. Também são discutidos os projetos dos sensores, confecção da maquete de simulação, acionamento a distância, estratégia adotada para o algoritmo, o tratamento dos dados e o design do painel de controle do usuário. Ao final, o sistema é analisado quanto à precisão e exatidão com base nos dados coletados empiricamente para, dessa forma, validar o projeto e propor metas futuras.

Palavras-Chave: Sistema embarcado. Medidor de energia. Monitor de Energia. Arduino. Banco de dados.

ABSTRACT

Since the second industrial revolution the dependence of human beings on electricity has amplified, and with the recent push of technologies such as artificial intelligence, augmented reality, robotics, nanotechnology, big data and the internet of things, the interconnection between the physical and digital worlds is inevitable. For this reason, this work describes the process of making an embedded online monitoring system for a residential power grid. It covers topics such as power calculation, electronics, sensor calibration, communication protocol, database and programming. Also discussed are the sensors designs, confection of the simulation model, remote activation, algorithm strategy, data treatment and the design of the user control panel. At the end, the system is analyzed for accuracy and precision based on data collected empirically in order to validate the project and propose future goals.

Keywords: Embedded system. Power meter. Energy monitor. Arduino. Database.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo entre Tarifa Branca e Tarifa Convencional.....	14
Figura 2 – Circuito de potência	17
Figura 3 – Triangulo de potência.....	20
Figura 4 – Relação entre tensão de pico e tensão eficaz numa senoide	21
Figura 5 – Microcontrolador: Arduino MEGA	22
Figura 6 – Microcontrolador: Arduino NANO.....	23
Figura 7 – Representação do barramento de comunicação	23
Figura 8 – Exemplo de endereçamento de dispositivos I2C.....	24
Figura 9 – Módulos Relé para Arduino	25
Figura 10 – Circuitos recomendados para o ZMPT101B.....	26
Figura 11 – Sensor de tensão com o TP ZMPT101B	26
Figura 12 – Projeto da PCB do sensor de corrente	27
Figura 13 – Placa de circuito do TC ZMCT103C confeccionada pelo autor	30
Figura 14 – Vista superior da maquete com o sistema parcialmente instalado.....	31
Figura 15 – Vista inferior da maquete com o sistema parcialmente instalado	32
Figura 16 – Emenda de derivação	32
Figura 17 – Sensores de corrente instalados.....	33
Figura 18 – Sistema embarcado instalado na maquete.....	33
Figura 19 – Lâmpadas selecionadas como carga.....	34
Figura 20 – Módulo Ethernet WD5100 para Arduino.....	35
Figura 21 – Parâmetros do servidor.....	36
Figura 22 – formato JSON para objeto.....	36
Figura 23 – Captura de tela do painel de controle do XAMPP	37
Figura 24 – Captura de tela do painel do Banco de Dados.....	39
Figura 25 – Painel de Controle do usuário com gráfico de Potência Ativa.....	41
Figura 26 – Painel de Controle do usuário com gráfico de Corrente	41
Figura 27 – Painel de Controle do usuário com gráfico de Tensão.....	42
Figura 28 – Captura de tela da especificação técnica do Arduino MEGA.....	63
Figura 29 – Captura de tela da especificação técnica do Arduino NANO	64
Figura 30 – Captura de tela das especificações técnicas do ZMPT101B.....	65
Figura 31 – Captura de tela das especificações técnicas do ZMPCT103C	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 100W....	44
Gráfico 2 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 70W.....	44
Gráfico 3 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 40W.....	45
Gráfico 4 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 15W.....	45
Gráfico 5 – Dispersão do erro dos sensores de tensão.....	47
Gráfico 6 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 100W.	48
Gráfico 7 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 70W ...	48
Gráfico 8 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 40W ...	49
Gráfico 9 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 15W ...	49
Gráfico 10 – Dispersão do erro dos sensores de corrente.....	51
Gráfico 11 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 100W.....	52
Gráfico 12 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 70W	52
Gráfico 13 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 40W	53
Gráfico 14 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 15W	53
Gráfico 15 – Dispersão do erro dos medidores de potência ativa	55
Gráfico 16 – Análise de desempenho do medidor de tensão do sistema com carga total	56
Gráfico 17 – Análise de desempenho do medidor de corrente do sistema com carga total ...	57
Gráfico 18 – Análise do fator de potência da UC.....	58
Gráfico 19 – Análise de desempenho do medidor de potência com carga total.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de precisão dos sensores de tensão	46
Tabela 2 – Análise de precisão dos sensores de corrente	50
Tabela 3 – Análise de precisão do sistema de medição	55
Tabela 4 – Análise de precisão do medidor de energia #1	67
Tabela 5 – Análise de precisão do medidor de energia #2	67
Tabela 6 – Análise de precisão do medidor de energia #3	68
Tabela 7 – Análise de precisão do medidor de energia #4	68
Tabela 8 – Análise de precisão do medidor de energia #5	69
Tabela 9 – Análise de precisão do medidor de energia #6	69
Tabela 10 – Análise de precisão do medidor de energia #7	70
Tabela 11 – Análise de precisão do medidor de energia #8	70
Tabela 12 – Análise de precisão do medidor de energia #9	71
Tabela 13 – Análise de precisão do medidor de energia #10	71
Tabela 14 – Análise de precisão do medidor de energia com carga total.....	72
Tabela 15 – Análise do fator de potência do medidor de energia com carga total.....	72
Tabela 16 - Custos do Sistema Embarcado	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UC	Unidade Consumidora
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
FEM	Força Eletromotriz
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impresso)
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

p	Potência instantânea
v	Tensão (V)
i	Corrente (A)
V_m	Tensão média (V)
V_{RMS}	Tensão eficaz (V)
V_p	Tensão de pico (V)
V_{pp}	Tensão pico a pico (V)
I_m	Corrente média (A)
θ_v	Ângulo de fase da tensão (°)
θ_i	Ângulo de fase da corrente (°)
P	Potência ativa (W)
Q	Potência reativa (var)
S	Potência aparente (VA)
fp	Fator de potência
N	Quantidade de espiras
R	Resistência (Ω)
Z	Impedância (Ω)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação e objeto da pesquisa	13
1.2	Justificativa e motivação do tema.....	14
1.3	Objetivo do Projeto de Graduação	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	Organização do Projeto	16
2	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1	Calculo de potência em regime permanente senoidal	17
2.1.1	Potência instantânea.....	17
2.1.2	Potência ativa.....	18
2.1.3	Potência reativa.....	19
2.1.4	Fator de potência.....	19
2.1.5	Potência aparente complexa.....	20
2.1.6	Valor eficaz.....	20
3	ELETRÔNICA E INSTALAÇÃO DO SISTEMA.....	22
3.1	Arduino Mega.....	22
3.1.1	Protocolo de Comunicação I2C	23
3.2	Relés	24
3.3	Sensores.....	25
3.3.1	Sensor de Tensão	25
3.3.2	Sensor de Corrente.....	26
3.3.3	Calibragem dos sensores de tensão e corrente.....	30
3.4	Unidade Consumidora.....	31
3.5	Cargas.....	33
4	APLICAÇÃO WEB	35
4.1	Servidor: Arduino.....	35
4.2	Servidor: XAMPP	37
4.2.1	JavaScript e PHP.....	37
4.2.1.1	fazerRequisicao: Primeiro Ciclo.....	38
4.2.1.2	fazerRequisicao: Próximos Ciclos.....	38

4.2.1.3	enviaDados	38
4.3	Banco de Dados	39
4.4	Painel de Controle	40
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
5.1	Precisão do medidor	43
5.1.1	Tensão	43
5.1.2	Corrente	47
5.1.3	Potência Ativa	51
5.1.4	Carga total	55
5.1.4.1	Tensão	56
5.1.4.2	Corrente	56
5.1.4.3	Fator de potência	57
5.1.4.4	Potência ativa	58
6	CONCLUSÃO	60
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
8	ANEXO A	63
9	ANEXO B	64
10	ANEXO C	65
11	ANEXO D	66
12	ANEXO E	67
13	ANEXO E	73

1 INTRODUÇÃO

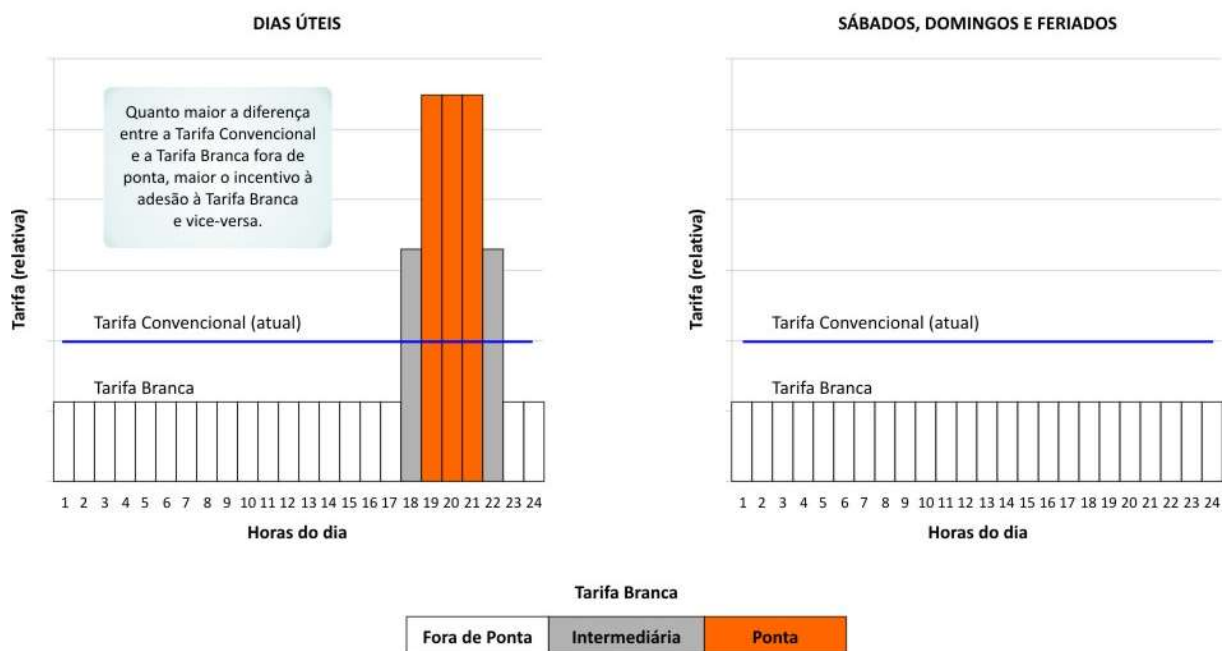
1.1 Apresentação e objeto da pesquisa

A energia elétrica é essencial no dia a dia da sociedade, chega a ser difícil imaginar como seria possível viver sem a mesma em pleno século XXI. Período esse onde tudo está interconectado, onde pacientes com doenças crônicas, como diabetes, possuem dispositivos de aplicação automática de medicamento, onde as pessoas têm acesso a um acervo completo de livros em apenas um dispositivo eletrônico, onde fazer compras sem sair de casa virou um conforto possível, onde a grande maioria das coisas estão ganhando o prefixo “e-“ de *eletronic* (*e-sport, e-commerce, e-media...*). Isso posto, é plausível assumir que o custo do consumo da energia elétrica é uma preocupação direta da população.

Para sustentar a afirmação antecedente, podemos observar o último reajuste realizado pela EDP Espírito Santo em agosto de 2018 de 15,84%, para os consumidores residenciais B1, em comparação com o reajuste do salário mínimo do ano de 2019 de 4,61%. Ou seja, a energia elétrica tornou-se relativamente mais cara para o consumidor. Dessa forma, é cabível que se procure opções para economizar no final do mês.

Uma alternativa ao consumidor é a nova modalidade tarifária para unidades consumidoras de baixa tensão, também denominadas grupo B, que entrou em vigor em janeiro de 2018. Essa modalidade leva em consideração o posto tarifário - respectivamente do maior ao menor custo - ponta, intermediário e fora de ponta, sendo que, segundo a EDP, como é ilustrado na Figura 1, o horário de ponta é das 18:01 às 21:00 o intermediário de 17:01 às 18:00 e 21:01 às 22:00 e os demais são fora de ponta.

Figura 1 - Comparativo entre Tarifa Branca e Tarifa Convencional



Fonte: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em 05 de Junho de 2019

Assim, para ser viável, aderir à nova modalidade implica que o consumo da instalação deve ser majoritariamente no horário fora de ponta. Portanto, é interessante haver uma forma do consumidor residencial observar o próprio perfil de consumo e avaliar a sua compatibilidade com a nova modalidade tarifária.

1.2 Justificativa e motivação do tema

Como exposto na sessão anterior, é incontestável que em plena quarta revolução industrial o ser humano depende do fornecimento de energia elétrica para realizar as atividades do cotidiano. E, além disso, existe a necessidade de minimizar os custos de consumo sem prejudicar o padrão de vida do cidadão.

Isso posto, é interessante pensar na viabilidade do desenvolvimento de um sistema de monitoramento da rede elétrica. Para isso, é preciso pensar, principalmente, em dois desafios: tornar compreensível para o cidadão, leigo dos conhecimentos de energia, as informações que o medidor pode fornecer; E disponibilizar essas informações de uma maneira prática.

Felizmente, estamos na quarta revolução industrial, e o mais marcante desse período é o que conhecemos como "Internet das Coisas". Para fins de contextualização, segundo o artigo

“Internet das Coisas: da Teoria à Prática”, a Internet das Coisas, em poucas palavras, nada mais é que uma extensão da Internet atual, que proporciona aos objetos do dia-a-dia (quaisquer que sejam), mas com capacidade computacional e de comunicação, se conectarem à Internet. Desta maneira, os desafios expostos anteriormente tornam-se superáveis, uma vez que, é possível criar uma interconexão entre o sistema de monitoramento e um objeto do cotidiano das pessoas como, por exemplo, um *smartphone*.

Dessa forma, será abordado o desenvolvimento de um sistema embarcado capaz de observar, individualmente, o consumo das cargas de uma rede elétrica de baixa tensão e fornecer via rede Ethernet informações úteis ao usuário.

1.3 Objetivo do Projeto de Graduação

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema embarcado capaz de monitorar o consumo individual das cargas de uma residência e fornecer informações pertinentes ao usuário por meio de uma página hospedada na internet.

1.3.2 Objetivos específicos

Para cumprimento da proposta apresentada, o projeto deve ser dividido em dois tópicos acompanhados de pequenas metas:

1. Sistema embarcado:

- Confeccionar uma maquete para simular a UC (Unidade Consumidora);
- Inserir um ponto de medição em cada carga da instalação;
- Tratar os dados medidos;
- Enviar os dados para o servidor via internet.

2. Servidor:

- Receber os dados do sistema embarcado;
- Armazenar no banco de dados;
- Fornecer gráficos e informações úteis ao usuário por meio de uma página da *web*.

1.4 Organização do Projeto

No capítulo 2, serão abordados os conceitos básicos de potência e a medição dessa grandeza.

No capítulo 3, será discutido a eletrônica do projeto, apresentação dos microcontroladores, relés e sensores utilizados, ressaltando suas características, processo de calibração, comunicação entre controladores e justificativa para o uso de cada um, além disso, será abordado a montagem da maquete da unidade consumidora, a instalação do sistema e as características das cargas.

No capítulo 4, será apresentado a aplicação *web* do projeto, abordando assuntos como servidor Arduino, servidor XAMPP, padrão de troca de dados, gerenciamento de banco de dados, ideias para o layout do painel de controle do usuário e o resultado final da sua implementação.

No capítulo 5, será analisado e discutido o desempenho do sistema de medição por meio de gráficos e tabelas.

Por fim, no capítulo 6, serão discutidas as conclusões obtidas a partir do sistema em operação e as possíveis propostas de continuidade do trabalho.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Antes de apresentar os conceitos sobre o medidor de energia é oportuno, primeiramente, introduzir a fundamentação teórica por trás do mesmo.

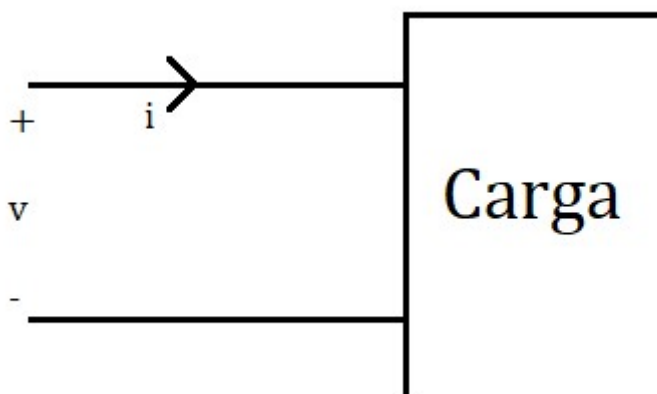
2.1 Cálculo de potência em regime permanente senoidal

A geração, transmissão e distribuição de energia acontecem, em sua maioria, em regime, aproximadamente, senoidal. Dessa forma é interessante, para o projeto, entender os cálculos por trás do consumo faturável.

2.1.1 Potência instantânea

Para entender o cálculo de potência instantânea em regime permanente senoidal, vamos tomar como representação o circuito da figura a seguir.

Figura 2 – Circuito de potência



Fonte: Elaborada pelo Autor

A partir disso, podemos deduzir que a potência instantânea é definida por:

$$p = vi \quad (1)$$

Sendo:

$$v = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (2)$$

$$i = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3)$$

Tomando como ponto de referência o instante em que a corrente atinge um máximo positivo, assim as equações (1), (2) e (3) tornam-se, respectivamente:

$$v = V_m \cos(\omega t + \theta_v - \theta_i) \quad (4)$$

$$i = I_m \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$p = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v - \theta_i) \cos(\omega t) \quad (6)$$

A partir disso, pode-se utilizar as identidade trigonométrica (7) em (6):

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} \cos(a - b) - \frac{1}{2} \cos(a + b) \quad (7)$$

$$p = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \theta_v - \theta_i) \quad (8)$$

Em seguida (9) em (8):

$$\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b) \quad (9)$$

$$p = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \cos(2\omega t) - \frac{V_m I_m}{2} \sin(\theta_v - \theta_i) \sin(2\omega t) \quad (10)$$

2.1.2 Potência ativa

A potência média também é denominada potência ativa, porque descreve a potência que é convertida de uma forma elétrica para uma forma não elétrica (calor, luz, movimento, etc...).

A potência média associada a sinais senoidais pode ser associada a partir da equação (11).

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p dt \quad (11)$$

Observando a equação (10) é fácil perceber que dentro de um período de integração de 0 a 2π o termo que acompanha $\cos(2\omega t)$ ou $\sin(2\omega t)$ é zero, dessa forma potência média pode ser definida por:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (12)$$

2.1.3 Potência reativa

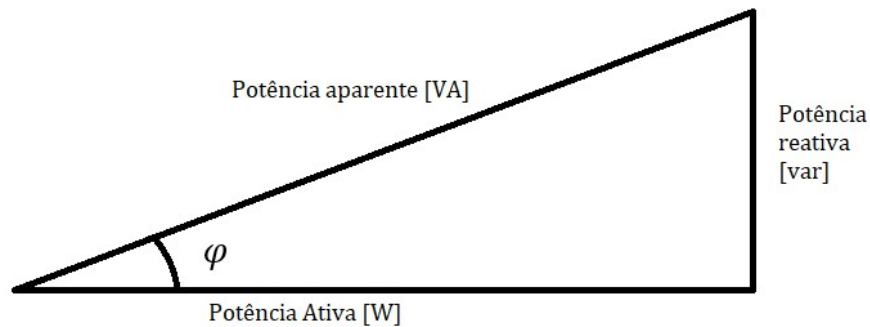
Percebe-se, de (10), que a potência instantânea contém uma parte constante e uma parte oscilatória com o dobro da frequência (2ω) das ondas de tensão e corrente. A parte constante corresponde ao valor médio por período T , enquanto a parte oscilatória é composta de duas parcelas que oscilam em quadratura: uma parcela oscila com $\cos(2\omega t)$ e vale P e a outra parcela oscila com $\sin(2\omega t)$ e vale $\frac{V_m I_m}{2} \sin(\theta_v - \theta_i)$. Essa segunda parcela que oscila em quadratura com a potência ativa P é usada para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas e é chamada de potência reativa.

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (13)$$

2.1.4 Fator de potência

O fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente, ele indica a eficiência com a qual a energia está sendo usado. Essa razão pode ser representada por um triângulo retângulo (Figura 3) onde:

Figura 3 – Triângulo de potência



Fonte: Elaborada pelo Autor

$$fp = \frac{W}{VA} = \cos(\varphi) = \cos(\tanh^{-1} \frac{var}{W}) \quad (14)$$

2.1.5 Potência aparente complexa

É a potência total fornecida pela fonte, ela é a soma complexa da potência ativa e da potência reativa.

$$S = P + jQ \quad (15)$$

Ou

$$|S| = \sqrt{\left(\frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_v - \theta_i)\right)^2 + \left(\frac{V_m I_m}{2} \sin(\theta_v - \theta_i)\right)^2} \quad (16)$$

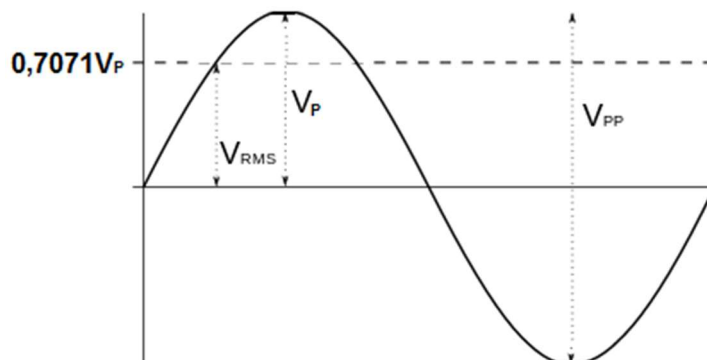
2.1.6 Valor eficaz

O valor eficaz tem uma propriedade que dado uma carga resistiva equivalente, R, em um período de tempo equivalente, T, o valor eficaz de uma fonte senoidal com certo valor eficaz de tensão fornece a R a mesma energia que uma fonte cc com tensão igual ao valor eficaz da fonte senoidal. Por exemplo uma fonte cc de 100 V fornece a mesma energia em T segundos que uma fonte senoidal de 100 V_{ef} , admitindo-se resistência de carga equivalente. Numa onda senoidal a relação entre o valor de pico e o valor eficaz pode ser simplificada como:

$$V_{ef} = V_p * \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Ou, aproximadamente 0,7071 como na figura abaixo.

Figura 4 – Relação entre tensão de pico e tensão eficaz numa senoide



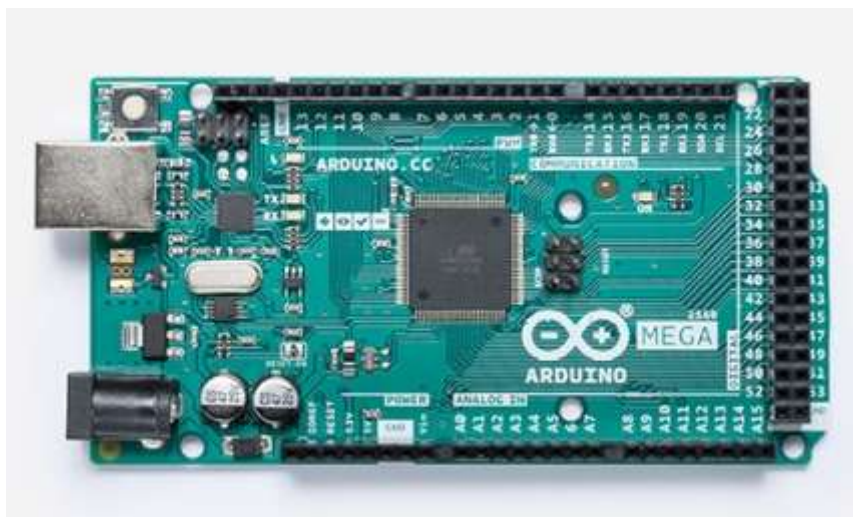
Fonte: <http://www.learningaboutelectronics.com/Artigos/Tensao-RMS.php>. Acesso em 05 de Junho de 2019

3 ELETRÔNICA E INSTALAÇÃO DO SISTEMA

3.1 Arduino Mega

No planejamento do projeto foi decidido que o sistema monitoraria 10 cargas, portanto seriam necessários 10 sensores de tensão e 10 sensores de corrente o que demandaria 20 entradas analógicas para aquisição desses dados, portanto a ideia inicial era usar um Arduino MEGA (Figura 5) que possui 16 entradas analógicas (ANEXO A) e um segundo Arduino qualquer para preencher a necessidade de 4 entradas analógicas adicionais.

Figura 5 – Microcontrolador: Arduino MEGA



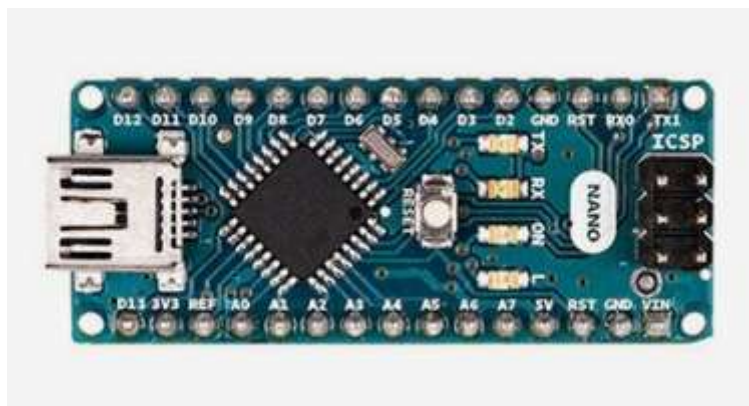
Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>. Acesso em 05 de Junho de 2019

Entretanto ao estudar a documentação da biblioteca `emonlib.h` – biblioteca de código aberto desenvolvida pela OpenEnergyMonitor para realizar cálculos voltados à medição de energia – percebeu-se que os desenvolvedores especificam que o microcontrolador arduino é incapaz de realizar o tratamento dos dados de mais do que 3 medidores de energia – um sensor de tensão e um de corrente –, ao mesmo tempo, de forma eficiente. Portanto usar as 16 entradas analógicas do arduino MEGA seria inviável.

Com isso em mente, para monitorar 10 cargas seriam necessários 3 Arduino NANO (Figura 6) que possuem 8 entradas analógicas (ANEXO B) e 1 Arduino MEGA. Dessa forma, cada NANO utilizaria as portas analógicas A0, A1, A2, A3, A6 e A7 para aquisição de dados dos sensores e as portas A4 e A5 seriam utilizadas para comunicação entre os controladores via protocolo I2C – o protocolo será explicado logo abaixo na seção 3.1.1 – ficando o MEGA

responsável por adquirir os dados de um medidor, receber e organizar os dados enviados pelos microcontroladores escravos e gerenciar o servidor Arduino (seção 3.4).

Figura 6 – Microcontrolador: Arduino NANO

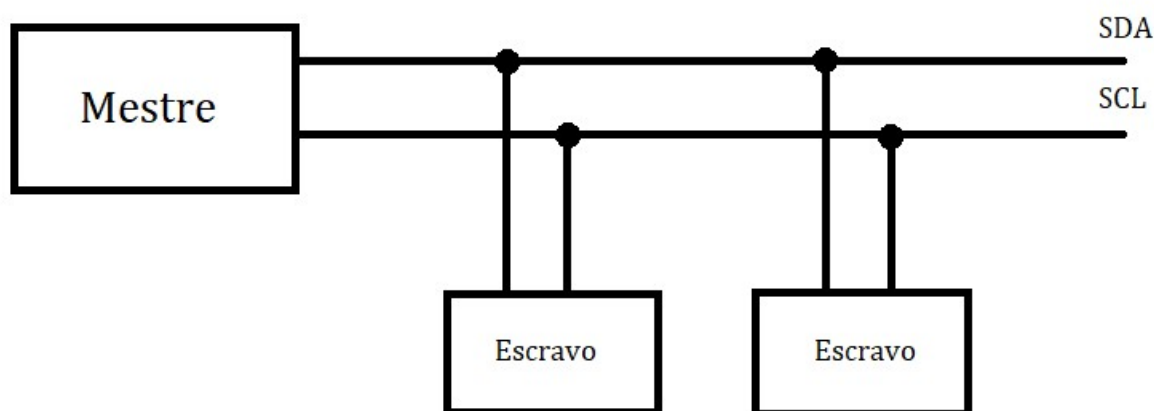


Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em 05 de Junho de 2019

3.1.1 Protocolo de Comunicação I2C

É um protocolo de barramento, que possibilita a comunicação de múltiplos dispositivos usando duas linhas bidirecionais, são essas SDA (Serial Data) e SCL (Serial Clock). Como pode ser observado na Figura 7, a linha SCL serve para sincronizar a comunicação entre todos os dispositivos conectados ao barramento, enquanto a linha SDA serve para trafegar os dados entre mestre e escravo.

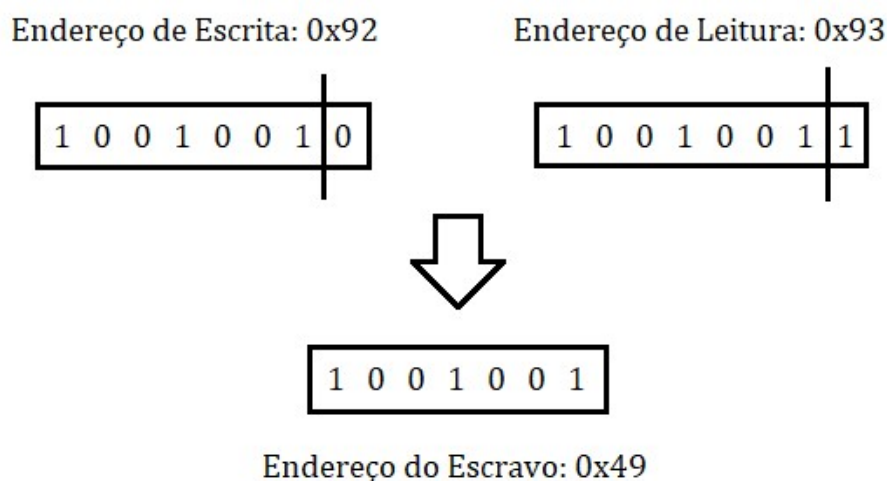
Figura 7 – Representação do barramento de comunicação



Fonte: Elaborada pelo Autor

Além disso, como o protocolo trabalha com múltiplos dispositivos, é necessário que cada um desses seja endereçado na rede. Como exemplificado na figura abaixo, este pode ser composto por 7+1 bits ou 10+1 bits, que significa 7 ou 10 bits de endereço do dispositivo mais um bit extra para definir um endereço de operação escrita (0) ou leitura (1).

Figura 8 – Exemplo de endereçamento de dispositivos I2C



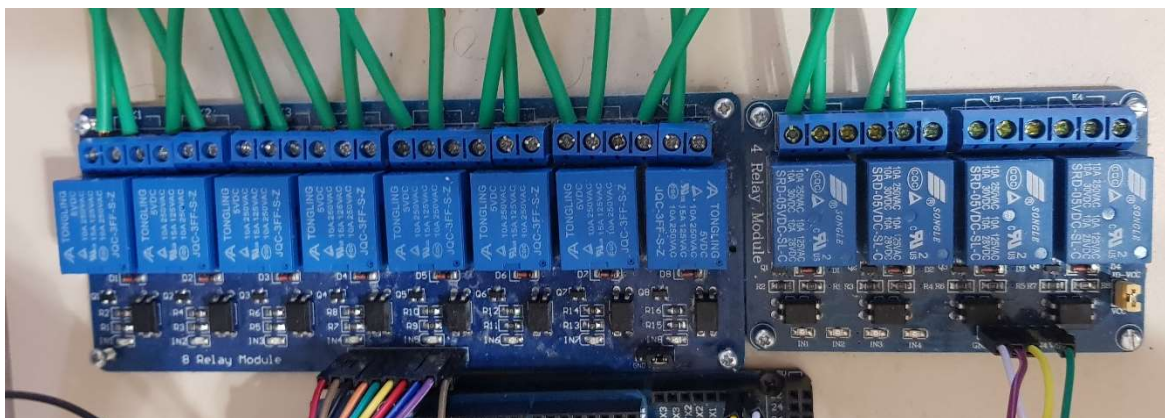
Fonte: Elaborada pelo Autor

A facilidade de utilizar I2C com o microcontrolador Arduino é que o próprio já vem com o protocolo implementado de fábrica, tendo os pinos A4 (SDA) e A5 (SCL) reservados no arduino NANO e os pinos 20 (SDA) e 21 (SCL) no arduino MEGA.

3.2 Relés

Apenas energizar as cargas da maquete e monitorar o seu consumo não seria suficiente para validar uma representação aceitável de uma UC. Isso porque para simular um perfil de consumo é necessário que haja variação de estado das cargas durante o decorrer do dia, desse modo, são utilizados módulos relés para Arduino (Figura 9) e o seu controle de chaveamento será realizado através da internet. Maiores detalhes sobre o chaveamento serão esclarecidos na seção 4.2.1.3.

Figura 9 – Módulos Relé para Arduino



Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3 Sensores

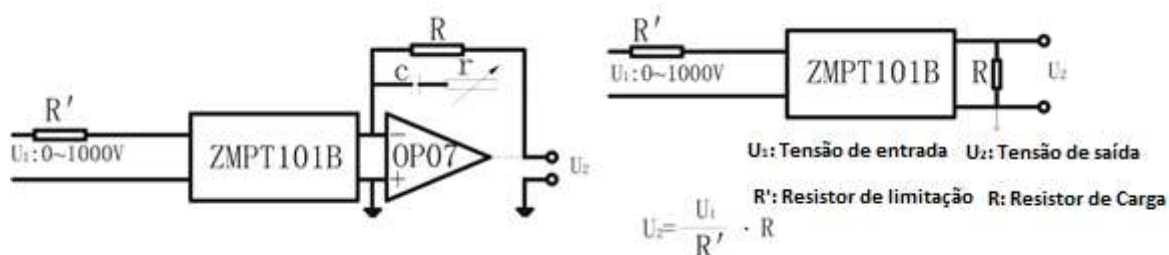
Como pode ser observado nos ANEXOS A e B, a tensão de operação do Arduino é de 5V e a corrente contínua por pino E/S é de 20mA (MEGA) ou 40mA (NANO), ou seja, os microcontroladores usados no projeto são incapazes de realizar as medições nos níveis da rede elétrica residencial, por isso é indispensável o uso de transformadores de potência e transformadores de corrente para reduzir, respectivamente, a tensão e a corrente à níveis compatíveis com o Arduino.

3.3.1 Sensor de Tensão

Como elucidado anteriormente, para a confecção do sensor de tensão, primeiramente, deve-se escolher um TP (transformador de potência) e a partir das suas especificações técnicas calcular os demais componentes da placa. O transformador escolhido foi o ZMPT101B da Nanjing Zeming Electronic, ele possui erro de precisão de $\pm 0,2\%$ (Classe 0.2 – ANSI), excelente linearidade e um erro de ângulo de fase de $1/3^\circ$ (ficha técnica no ANEXO C).

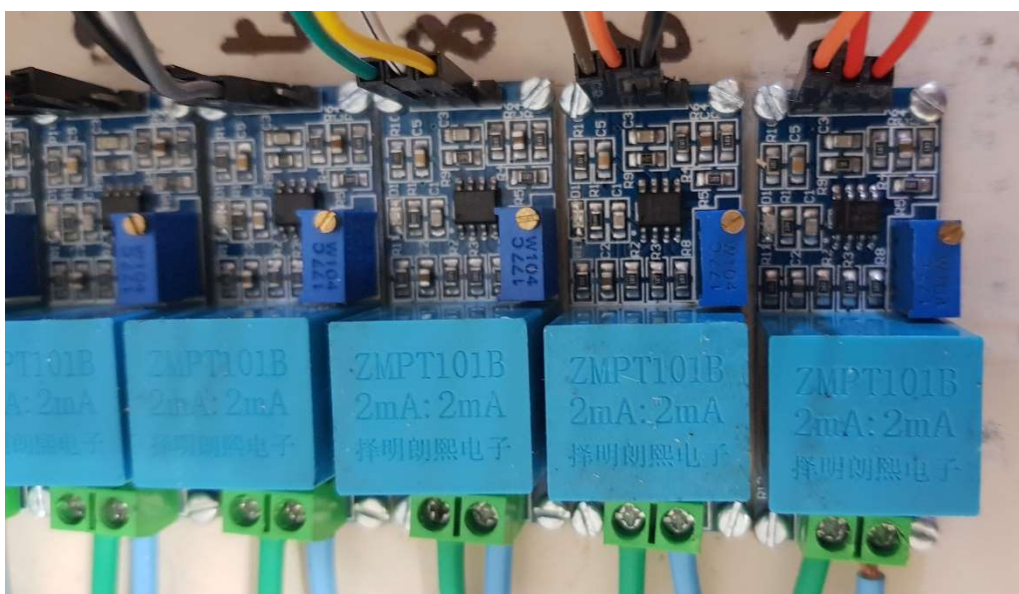
Apesar de a fabricante facilitar o projeto da placa recomendando duas formas de montar o circuito do primário e secundário do transformador (Figura 10) não houve a necessidade de confeccionar a mesma, uma vez que se encontrou no mercado uma versão modular (Figura 11) pronta para atender as especificações necessárias do Arduino, fornecendo ao pino analógico uma componente senoidal com um offset de 2,5V.

Figura 10 – Circuitos recomendados para o ZMPT101B



Fonte: Traduzido pelo autor. Original em: <http://www.zeming-e.com/English/prodviewtype5-298.html>. Acesso em 05 de junho de 2019

Figura 11 – Sensor de tensão com o TP ZMPT101B



Fonte: Elaborada pelo Autor

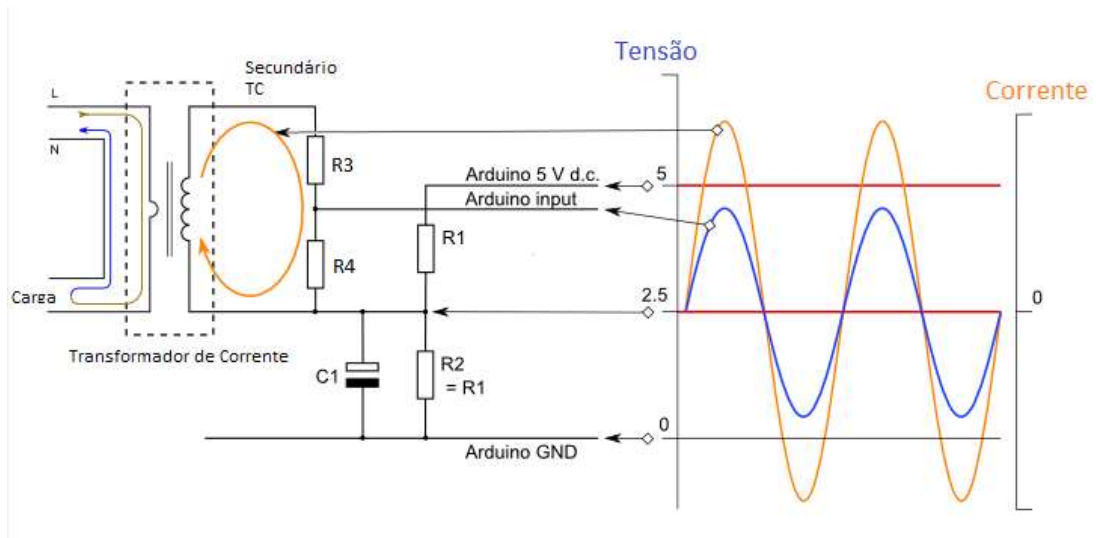
Por fim, vale ressaltar que o processo de calibração dos sensores será apresentado na seção 3.3.3.

3.3.2 Sensor de Corrente

Pelos mesmos motivos da seção anterior, deve ser discutido sobre o projeto do sensor de corrente. Dessa forma, o TC (transformador de corrente) escolhido foi o ZMCT103C da Qingxian Zeming Langxi Elec, ele possui uma relação de espira de 1000:1, erro de precisão de +/- 0,2% (Classe 0.2 – ANSI), boa linearidade e um erro de ângulo de fase de 1/3° (ficha técnica no ANEXO D).

O objetivo do projeto do sensor de corrente é o mesmo do sensor de tensão, ou seja, fornecer ao pino analógico uma componente senoidal com um offset de 2,5V. Dessa forma, idealizou-se o esquema representado logo abaixo na Figura 12.

Figura 12 – Projeto da PCB do sensor de corrente



Fonte: Modificado e traduzido pelo autor. Original em: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>. Acesso em 05 de Junho de 2019

O primeiro passo é calcular o divisor de tensão formado por R1 e R2 para fornecer o *offset* de 2,5V.

$$v_{cc} = 5V \quad (18)$$

$$v_{offset} = v_{cc} * \frac{R1}{R1 + R2} \quad (19)$$

$$v_{offset} = 2.5V = \frac{v_{cc}}{2} \quad (20)$$

$$\frac{v_{cc}}{2} = v_{cc} * \frac{R1}{R1 + R2} \quad (21)$$

$$R1 = R2 \quad (22)$$

Em seguida calculam-se os valores máximos de R3 e R4, para isso temos que lembrar que a tensão máxima do pino analógico é de 5V.

$$v_{analogMAX} = 5V \quad (23)$$

Outro ponto importante é lembrar que se espera um sinal senoidal no pino analógico, portanto o valor de 5V deve ser interpretado como valor de pico e para calcular o máximo de R3 e R4 devemos usar o valor RMS, assim:

$$v_{analogMAX\ RMS} = \frac{v_{analogMAX}}{\sqrt{2}} = 3,53V_{rms} \quad (24)$$

A carga de maior potência que será utilizada no projeto é de 100W, portanto:

$$I_{primarioMAX} > 0,787A \quad (24)$$

$$I_{primarioMAX} = 1A \quad (25)$$

Com esses valores definidos podemos finalmente calcular efetivamente o valor das resistências.

$$I_{secundárioMAX} = \frac{I_{primarioMAX}}{1000} \quad (26)$$

$$v_{analogMAX\ RMS} = V_{secundário\ MAX} * \frac{R3}{R3 + R4} - v_{offset} \quad (27)$$

$$V_{\text{secundário MAX}} = \frac{R3 + R4}{R3} (v_{\text{analog MAX RMS}} - v_{\text{offset}}) \quad (28)$$

$$R3 = R4 \quad (29)$$

$$V_{\text{secundário MAX}} = 2 * (v_{\text{analog MAX RMS}} - v_{\text{offset}}) \quad (30)$$

$$(R3 + R4)_{\text{max}} = \frac{V_{\text{secundário MAX}}}{I_{\text{secundário MAX}}} \quad (31)$$

$$R3_{\text{MAX}} = R4_{\text{MAX}} = \frac{1000}{2} * \frac{2 * (v_{\text{analog MAX RMS}} - v_{\text{offset}})}{I_{\text{primário MAX}}} = 1030 \Omega \quad (32)$$

Portanto, define-se $R1 = R2 = R3 = R4 = 1000 \Omega$. O capacitor C1 serve para prover um caminho para a corrente alternada contornar R1 deste modo deve possuir uma baixa reatância.

$$X_c \leq \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (33)$$

Assumindo 100Ω como uma reatância baixa, temos

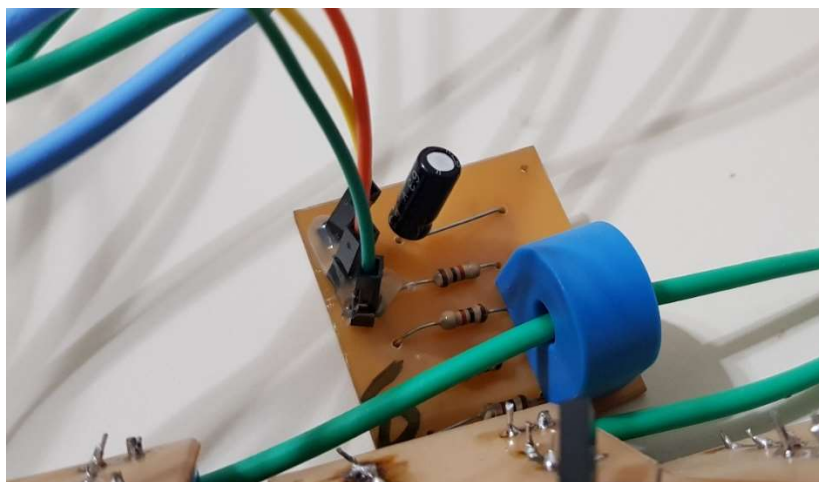
$$C \geq \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad (34)$$

$$C \geq 26,5 \mu F \quad (35)$$

$$C = 100 \mu F \quad (36)$$

A placa do sensor de corrente finalizada pode ser observada na Figura 13 e o processo de calibração será apresentado na seção a seguir.

Figura 13 – Placa de circuito do TC ZMCT103C confeccionada pelo autor



Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3.3 Calibragem dos sensores de tensão e corrente

A biblioteca `emonlib.h` disponibiliza funções para realizar a calibragem via software, dessa forma a mesma consegue trabalhar com uma variedade maior de sensores. Para o sensor de corrente, é necessária uma constante de ganho e, para o sensor de tensão, além do ganho, é preciso uma constante de correção de desvio de fase.

Os ganhos são adquiridos de forma empírica, desse modo, utilizando um multímetro como referência, assume-se um valor de ganho inicial e faz-se a correção do mesmo até que os resultados sejam satisfatoriamente próximos da referência. Vale ressaltar que o sinal de saída do sensor de tensão possui um ganho atrelado a um potenciômetro (Figura 11), portanto, é possível realizar um ajuste fino após a calibragem via software.

No caso da constante de correção de desvio de fase, utilizam-se as informações presentes na ficha técnica (ANEXO C) do ZMPT101B que apresenta um gráfico de desvio de fase de acordo com a corrente de primário e a resistência de carga do secundário.

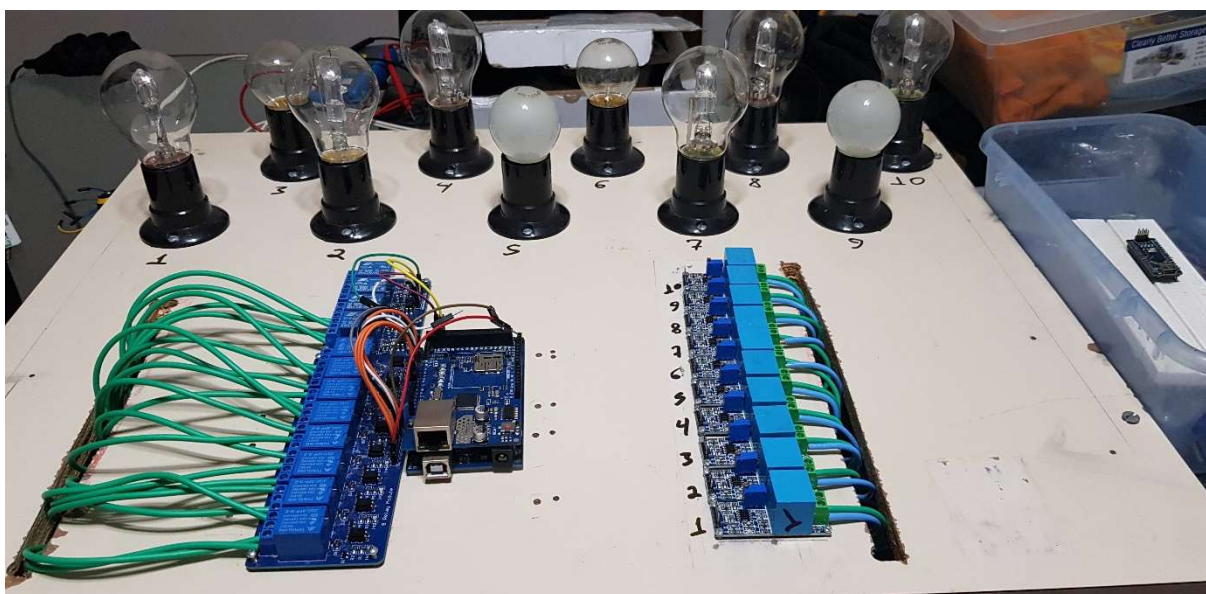
Após o procedimento completo, realizou-se o teste de precisão, nele foram realizadas medidas simultâneas com o multímetro e os sensores para obter o erro percentual, os resultados podem

ser observados no Capítulo 7, onde será realizado a análise dos resultados, e nas tabelas do ANEXO E.

3.4 Unidade Consumidora

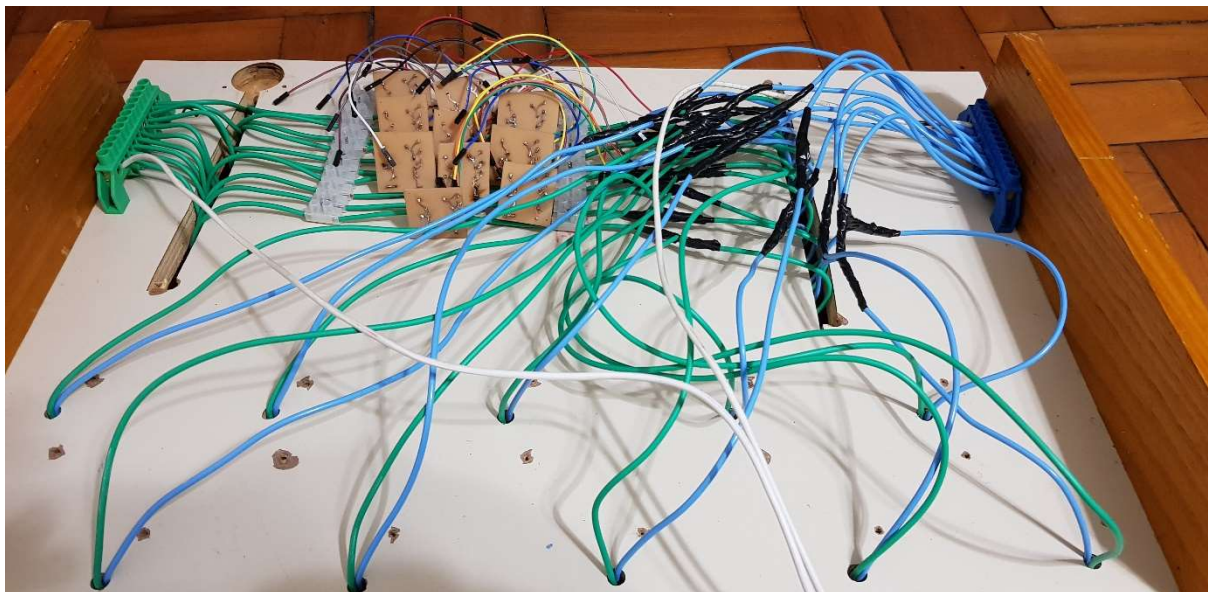
A maquete foi montada sobre uma placa de madeira de 70x60cm com 2 calçados de 50x10cm, os cabos utilizados possuem um diâmetro de 1,5mm², o que é mais do que o suficiente para aguentar as correntes das cargas, e foram escolhidos de cores diferentes para facilitar a identificação da fase e retorno, evitando assim qualquer curto nos sensores por instalação incorreta. Os bocais para as lâmpadas são do tipo soquete fixo de teto e foram parafusados diretamente na maquete, foram usados 2 conectores de barra com 12 bornes para seccionar os cabos elétricos, facilitando a inserção dos sensores de corrente e os medidores de referência e também foram usados 2 barramentos neutro terra de 12 bornes para conectar todas as cargas na rede em paralelo, estes detalhes podem ser observados nas Figuras 14, 15 e 17.

Figura 14 – Vista superior da maquete com o sistema parcialmente instalado



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 15 – Vista inferior da maquete com o sistema parcialmente instalado



Fonte: Elaborada pelo Autor

Vale evidenciar que derivação dos cabos para inserir os sensores de tensão na maquete não foi feita de qualquer maneira, usou-se uma técnica de emenda de derivação, que pode ser observada na Figura 16, garantindo assim um contato adequado e evitando desconexão acidental dos cabos.

Figura 16 – Emenda de derivação

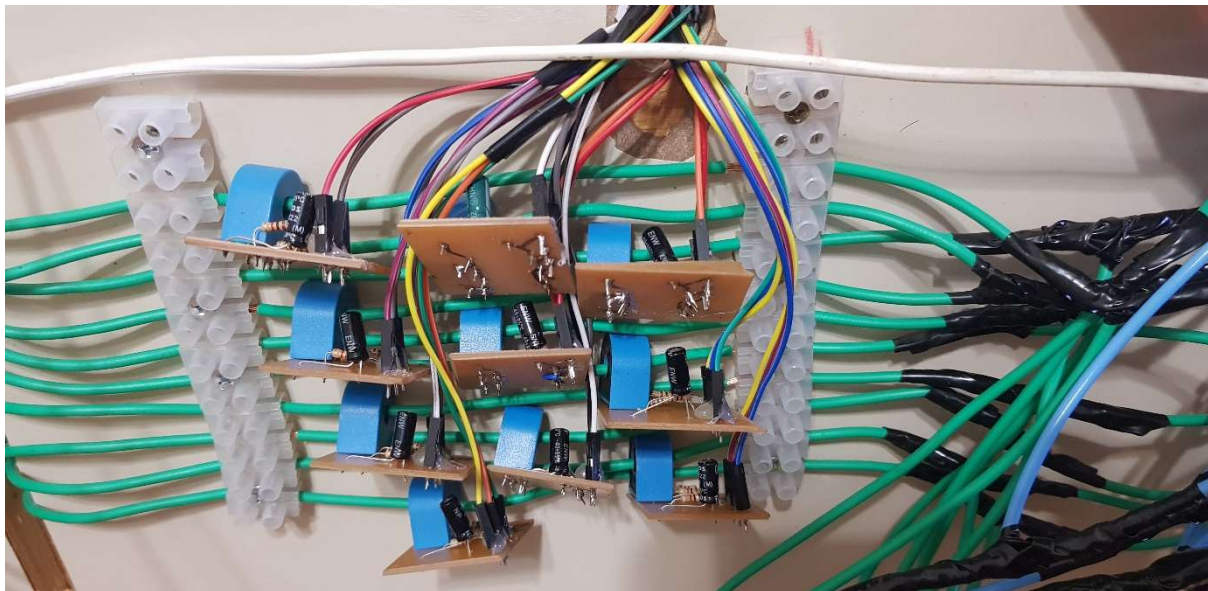


Fonte: Elaborada pelo Autor

Por fim, nas Figuras 17 e 18, pode-se observar a disposição e a forma na qual foram instalados o sistema embarcado e seus sensores/atuadores. Os que estão presentes na parte superior da

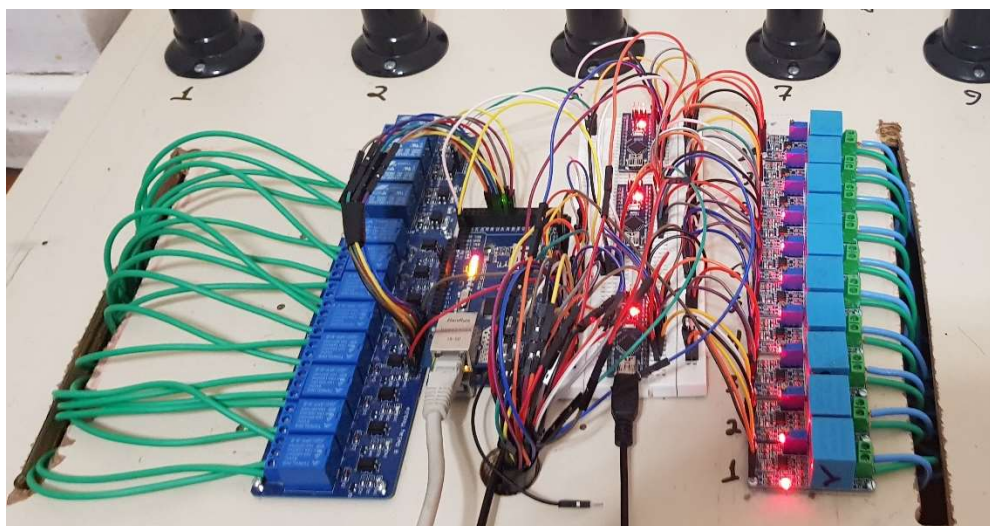
maquete, encontram-se parafusados na mesma, e os sensores de corrente por sua natureza não invasiva estão fixados pelos cabos elétricos.

Figura 17 – Sensores de corrente instalados



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 18 – Sistema embarcado instalado na maquete



Fonte: Elaborada pelo Autor

3.5 Cargas

Apesar da Resolução normativa N° 414, de 9 de Setembro de 2010 art. 95 não definir um limite mínimo para o fator de potência para UC do grupo B1, foi decidido utilizar cargas com

elevado fator de potência, uma vez que esse é desejável para um bom projeto elétrico evitando, dessa forma, ineficiência energética, flutuação de tensão entre outros problemas causados pelo baixo fator de potência.

Assim, como ilustrado na Figura 19, foram escolhidas 10 lâmpadas para representar as cargas da UC, sendo 2 Lâmpadas Halógena Taschibra de 100W, 2 Lâmpadas Halógena Taschibra de 42W, 1 Lâmpada Halógena Elgin de 72W, 1 Lâmpada Halógena Empalux de 70W, 2 Lâmpadas Incandescente Globo Taschibra de 40W e 2 Lâmpadas Incandescente Bolinha Taschibra de 15W.

Vale a pena ressaltar que a fabricante destas lâmpadas não especifica o fator de potência das mesmas, entretanto assume-se que, pelas características resistivas o valor será elevado.

Figura 19 – Lâmpadas selecionadas como carga



Fonte: Elaborada pelo Autor

4 APLICAÇÃO WEB

A ideia inicial era utilizar um servidor único hospedado pelo Arduino, portanto o MEGA receberia os dados dos controladores escravo, organizá-los-ia, armazenaria os mesmos em um arquivo *txt* no cartão SD do *Shield Ethernet*, hospedaria a página da web com os gráficos e ficaria responsável por buscar os dados requisitados pelo servidor no cartão SD.

Entretanto o resultado final era lento demais, o fato do Arduino ter que buscar o código do servidor (html, css, js) no cartão SD ao mesmo tempo que armazenava os dados no txt, gerava um tempo de carregamento da página do usuário próximo de um minuto, sem dúvidas o processador do MEGA não era rápido o suficiente para trabalhar dessa maneira.

Assim sendo, a solução aplicada foi simplificar a tarefa do microcontrolador e deixar o trabalho pesado para um servidor Apache hospedado num computador e usar um banco de dados mySQL.

4.1 Servidor: Arduino

Para hospedar o servidor do Arduino, usou-se o Módulo Ethernet WD5100 (Figura 20) e a biblioteca Ethernet.h, e, para configurá-lo, é necessário saber o endereço MAC da placa, um endereço de IP livre no modem e definir uma porta de acesso (Figura 21).

Figura 20 – Módulo Ethernet WD5100 para Arduino

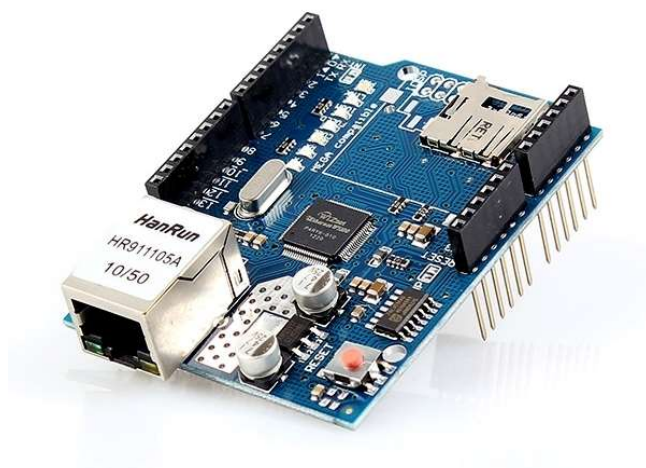


Figura 21 – Parâmetros do servidor

```
byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED }; // Endereço MAC do shield Ethernet
IPAddress ip(192, 168, 42, 115); // IP FIXO
EthernetServer server(80); // cria o servidor na porta 80
```

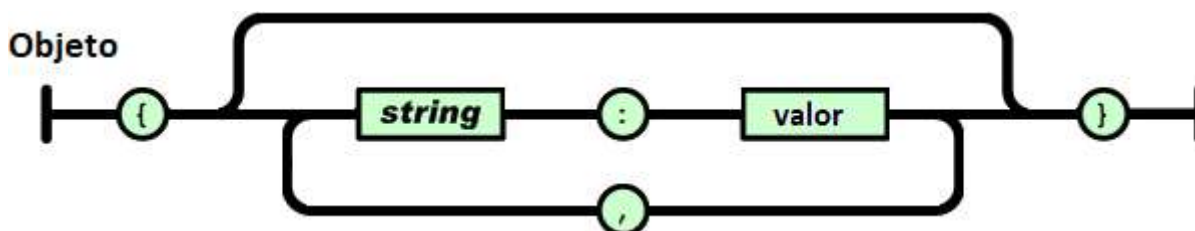
Fonte: Elaborada pelo Autor

Como explicado anteriormente, a tarefa do WD5100 é hospedar um servidor simples com apenas um texto em formato JSON, que, segundo o site json.org, a sua definição é:

JSON (JavaScript Object Notation - Notação de Objetos JavaScript) é uma formatação leve de troca de dados [...] é em formato texto e completamente independente de linguagem, pois usa convenções que são familiares às linguagens C e familiares, incluindo C++, C#, Java, JavaScript, Perl, Python e muitas outras.

Como a linguagem utilizada no servidor hospedado pelo computador é orientada a objeto o padrão seguido na formatação do texto foi a de objeto e pode ser conferida na Figura 22 logo abaixo.

Figura 22 – formato JSON para objeto



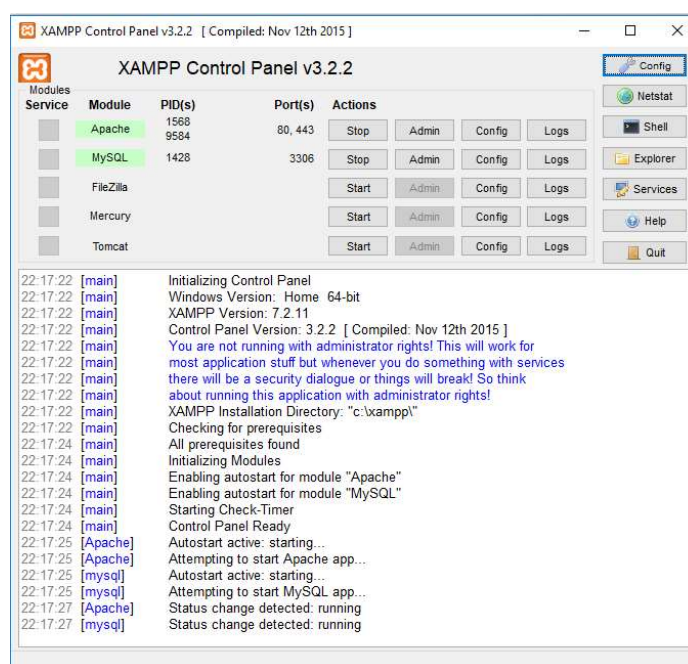
Fonte: Traduzido pelo autor. Original em: <http://json.org/json-pt.html>. Acesso em 05 de Junho de 2019

Dessa forma, passar a informações relevantes para o servidor Apache tornou-se uma tarefa extremamente leve para o processador, eliminando completamente o gargalo causado pela rotina de leitura/gravação do cartão SD.

4.2 Servidor: XAMPP

Segundo o site apachefriends.org XAMPP é um pacote que reúne diversos servidores de código aberto como MySQL, Apache, FileZilla, Mercury e Tomcat, facilitando a instalação e hospedagem de um servidor local para o usuário. O painel de controle do programa pode ser observado na Figura 23 juntamente com os servidores que serão utilizados.

Figura 23 – Captura de tela do painel de controle do XAMPP



Fonte: Elaborada pelo Autor

4.2.1 JavaScript e PHP

Nessa seção, não entrarei em detalhes do JavaScript do painel de controle do usuário porque suas funcionalidades serão apresentadas na seção 4.4, nessa explicaremos apenas as rotinas de comunicação entre o banco de dados, servidor e Arduino.

Ao acessar a página do usuário o JavaScript espera o carregamento completo da mesma para dar início às rotinas, a primeira que acontece é a ‘fazerRequisicao’ que se repete em ciclos de 5 segundos, além dessa repetição existe uma rotina que só inicia com a interação do usuário com os botões de acionamento, essa é a ‘enviaDados’, ambas as rotinas serão explicadas logo abaixo.

4.2.1.1 fazerRequisicao: Primeiro Ciclo

Esse primeiro ciclo serve para recuperar os dados armazenados no banco, sem isso sempre que a página fosse recarregada os gráficos reiniciariam. Por isso, esse ciclo chama a função ‘carregarInfosDoBanco’ que por sua vez faz um requisição PHP ao banco de dados para recuperar os dados referentes ao dia atual, realiza o tratamento dos dados recebidos, vincula-os aos vetores dos gráficos e exibi-os.

4.2.1.2 fazerRequisicao: Próximos Ciclos

Os demais ciclos realizam a rotina de leitura, armazenamento e atualização. Nesse ciclo o servidor Apache faz uma requisição ao servidor do Arduino para receber o JSON, após receber os dados eles são armazenados no banco MySQL e então chama-se a função ‘carregarInfosAtualDoBanco’ que basicamente faz a mesma coisa que a função ‘carregarInfosDoBanco’ com a diferença que recupera apenas o último dado recebido pelo banco, ou seja o que acabou de ser armazenado. Pode parecer estranho armazenar uma informação e logo em seguida recuperá-la, porém essa rotina garante que todos os dados exibidos foram corretamente armazenados no banco de dados.

4.2.1.3 enviaDados

Está rotina serve para controlar os relés do sistema embarcado de forma remota e informar para o usuário o estado das cargas. A rotina funciona da seguinte forma, na tela do painel de controle do usuário, que será explicado melhor no capítulo 6, apresentam-se botões com a etiqueta Liga e Desliga para cada carga, cada botão está vinculado a um ID de 5 bytes sendo os 4 primeiros para identificar a carga e o último para informar a ação desejada – por exemplo o ID 10101 significa ligar a décima carga – e ao apertar o botão o servidor Apache envia para o servidor Arduino o ID do botão que foi pressionado e o mesmo envia o comando para o relé.

4.3 Banco de Dados

A nível de conhecimento vamos definir o que é MySQL:

É um sistema gerenciador de banco de dados relacional de código aberto usado na maioria das aplicações gratuitas para gerir suas bases de dados. O serviço utiliza a linguagem SQL (Structure Query Language – Linguagem de Consulta Estruturada), que é a linguagem mais popular para inserir, acessar e gerenciar o conteúdo armazenado num banco de dados. (TECHTUDO, 2012)

A estrutura definida para o banco de dados pode ser verificada na Figura 24 e está da seguinte forma. A primeira coluna define o ID dos dados, que representa um número único gerado sempre que o banco recebe uma nova informação, a segunda coluna data_leitura insere a data do exato momento que os dados foram recebidos no formato AAAA-MM-DD HH:MM:SS, a terceira coluna dado_leitura recebe os dados dos medidores (potência ativa, potência aparente, fator de potência, tensão e corrente) que foram recebidos em formato JSON pelo servidor e a quarta e última coluna potencia_ativa recebem a potência ativa de cada medidor, também em formato JSON. Note que ambas terceira e quarta coluna recebem, em comum, a potência ativa dos medidores, essa duplicação é uma redundância proposital para facilitar a manipulação do banco de dados pelo PHP posteriormente.

Figura 24 – Captura de tela do painel do Banco de Dados

ID	data_leitura	dado_leitura	potencia_ativa
1494	2018-11-25 16:18:38	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.06,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.06},"medidor_2...
1491	2018-11-25 16:18:33	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.03,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.03},"medidor_2...
1492	2018-11-25 16:18:33	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.03,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.03},"medidor_2...
1489	2018-11-25 16:18:28	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.57,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.57},"medidor_2...
1490	2018-11-25 16:18:28	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.57,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.57},"medidor_2...
1487	2018-11-25 16:18:23	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.37,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.37},"medidor_2...
1488	2018-11-25 16:18:23	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.37,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.37},"medidor_2...
1485	2018-11-25 16:18:18	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.98,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.98},"medidor_2...
1486	2018-11-25 16:18:18	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.98,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.98},"medidor_2...
1483	2018-11-25 16:18:13	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.97,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.97},"medidor_2...
1484	2018-11-25 16:18:13	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.97,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.97},"medidor_2...
1481	2018-11-25 16:18:08	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.94,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.94},"medidor_2...
1482	2018-11-25 16:18:08	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.94,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":94.94},"medidor_2...
1479	2018-11-25 16:18:03	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.04,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.04},"medidor_2...
1480	2018-11-25 16:18:03	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.04,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":95.04},"medidor_2...
1477	2018-11-25 16:17:58	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.19,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.19},"medidor_2...
1478	2018-11-25 16:17:58	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.19,"Potencia_A...	["medidor_1":{"Potencia_Ativa":96.19},"medidor_2...

Fonte: Elaborada pelo Autor

4.4 Painel de Controle

Ao esboçar o design do painel de controle, a principal preocupação foi conseguir manter um conceito simples de modo a não sobrecarregar o usuário com a quantidade massiva de informações providas por dez medidores de energia. Portanto o aspecto principal da página é exibir as informações de uma grandeza medida por um medidor específico por vez em formato gráfico, sendo essas grandezas potência ativa (Figura 25), corrente (Figura 26) e tensão (Figura 27). A forma de selecionar a grandeza a ser mostrada e o medidor a qual essa grandeza se refere será feita a partir de dois menus seletores.

Além disso, a página exibirá informações de fator de potência, corrente e tensão do medidor selecionado, dará ao usuário a possibilidade de ligar ou desligar as cargas e verificar o seu estado remotamente, avisará o posto horário em vigência da hora atual e exibirá uma comparação de preço a ser pago por aquela energia consumida entre modalidade tarifaria convencional e a tarifária branca.

Vale ressaltar que as tarifas utilizadas foram fornecidas pela EDP - Espírito Santo RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 2432 de 07 DE AGOSTO DE 2018 e o código não considera a bandeira tarifária vigente no mês pois a implementação dessa variável envolveria trabalhar com API (Application Programming Interface - Interface de Programação de Aplicações) o que adicionaria uma nova camada de dificuldade ao projeto tornando-se algo muito complexo para um projeto de graduação.

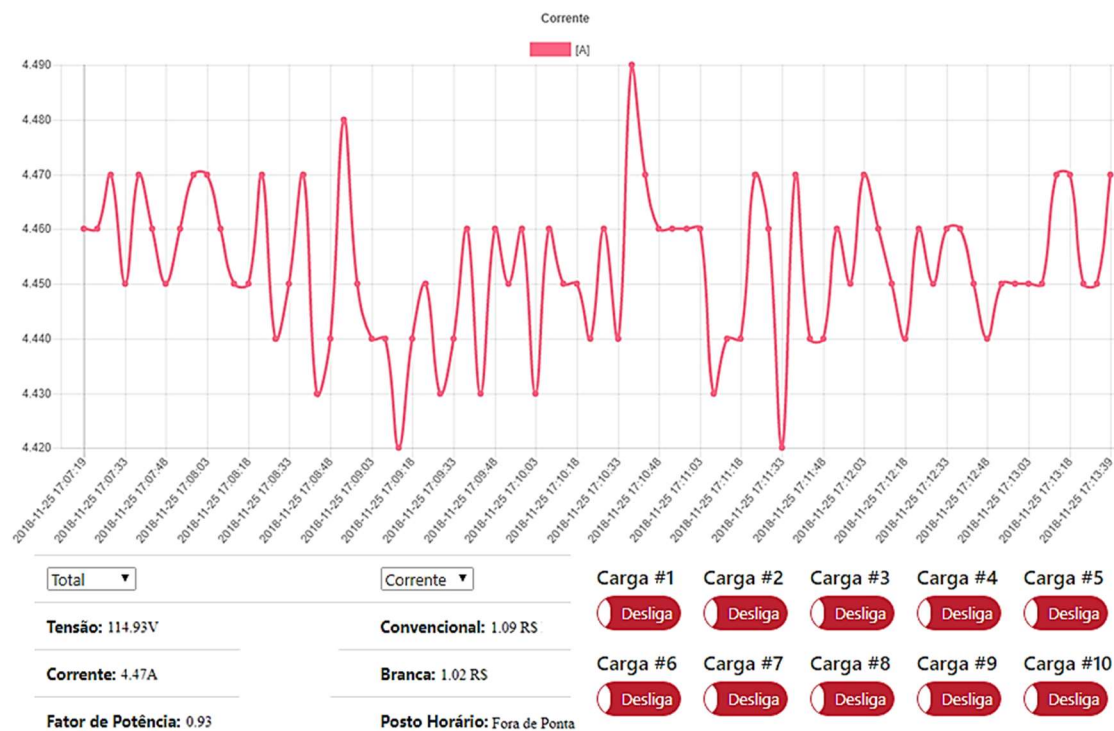
Por fim, os resultados da implementação das ideias apresentadas acima podem ser observados nas imagens desta seção apresentadas logo abaixo.

Figura 25 – Painel de Controle do usuário com gráfico de Potência Ativa



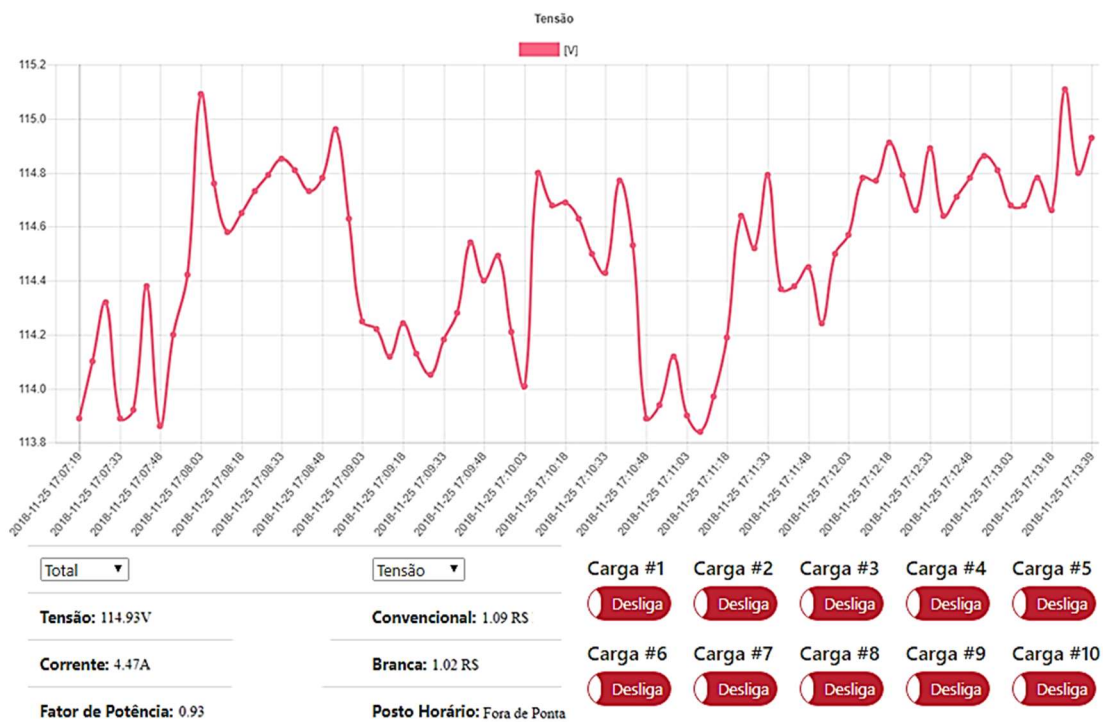
Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 26 – Painel de Controle do usuário com gráfico de Corrente



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 27 – Painel de Controle do usuário com gráfico de Tensão



Fonte: Elaborada pelo Autor

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Precisão do medidor

Como a UC simulada possui 10 cargas, decidiu-se separá-las em quatro faixas de potência (100W, 70W, 40W e 15W), dessa forma, fica mais fácil verificar o comportamento dos medidores em relação à carga acoplada.

O multímetro de referência utilizado é o “Multímetro Digital com Capacímetro Beep DT9205A 9KF Eda”, que segundo as especificações da fabricante possui exatidão de:

- $\pm 0,8\% + 3$ dígitos para medição AC entre 200mV e 750V;
- $\pm 1,0\% + 3$ dígitos para medição AC entre 2mA e 20A.

E o Wattímetro utilizado é o “Wattímetro Digital Portátil – WD-920”, que segundo as especificações da fabricante possui exatidão de:

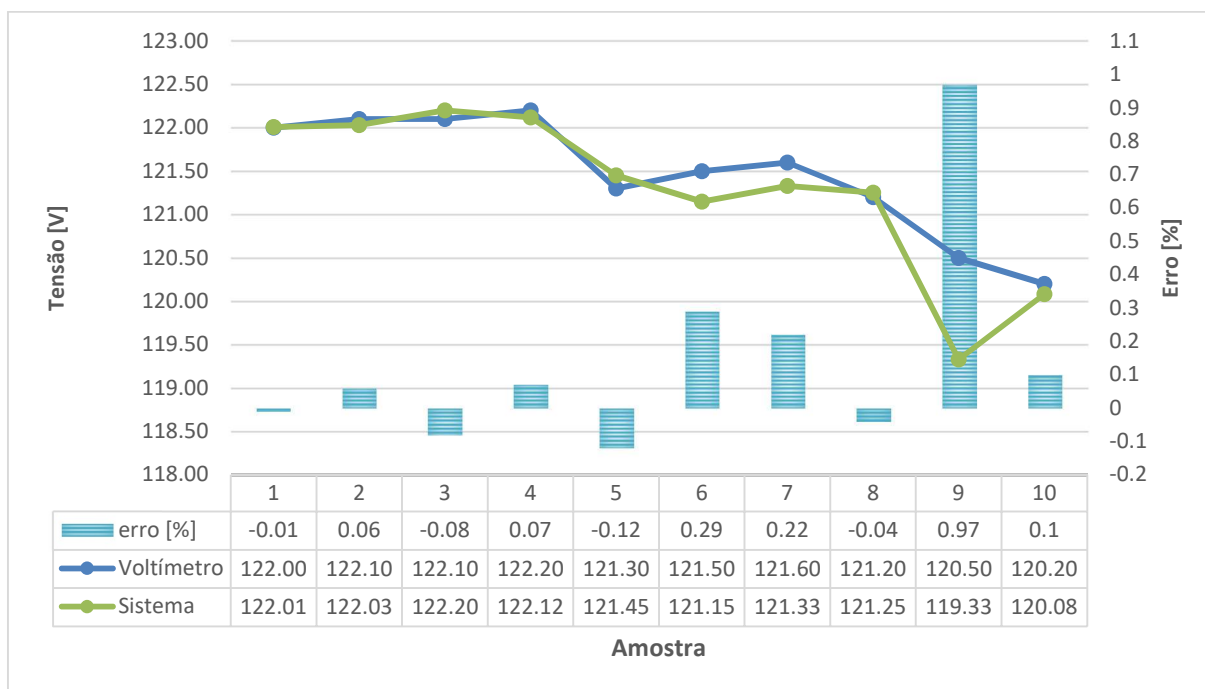
- $\pm 1,5\% + 1$ dígito para potência ativa monofásica (*true power*) AC.

Além disso, é interessante separar a análise dos resultados em dois tópicos: precisão e exatidão. O primeiro, para comparar objetivamente a capacidade do sistema de acompanhar a variação do sinal da mesma forma que o medidor de referência e, o segundo, para avaliar a calibração do sistema.

5.1.1 Tensão

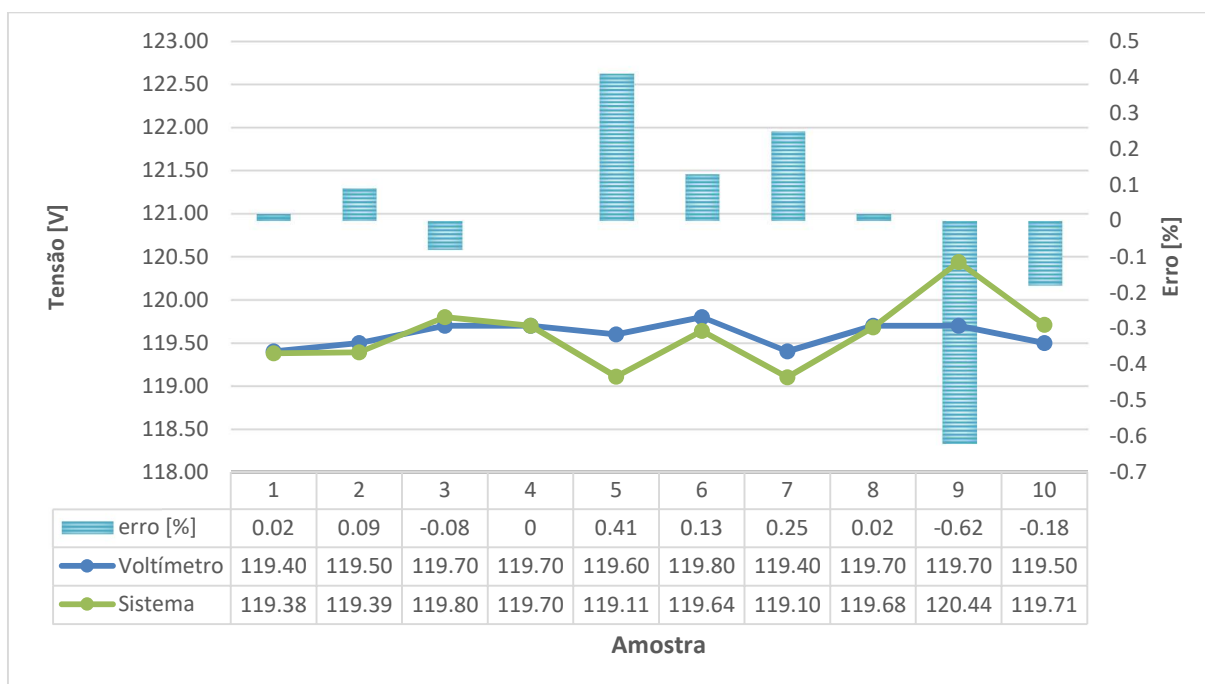
Os gráficos a seguir representam uma comparação entre os resultados das medições de tensão do sistema e do voltímetro de referência, nas quatro faixas de potência presentes na UC.

Gráfico 1 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 100W



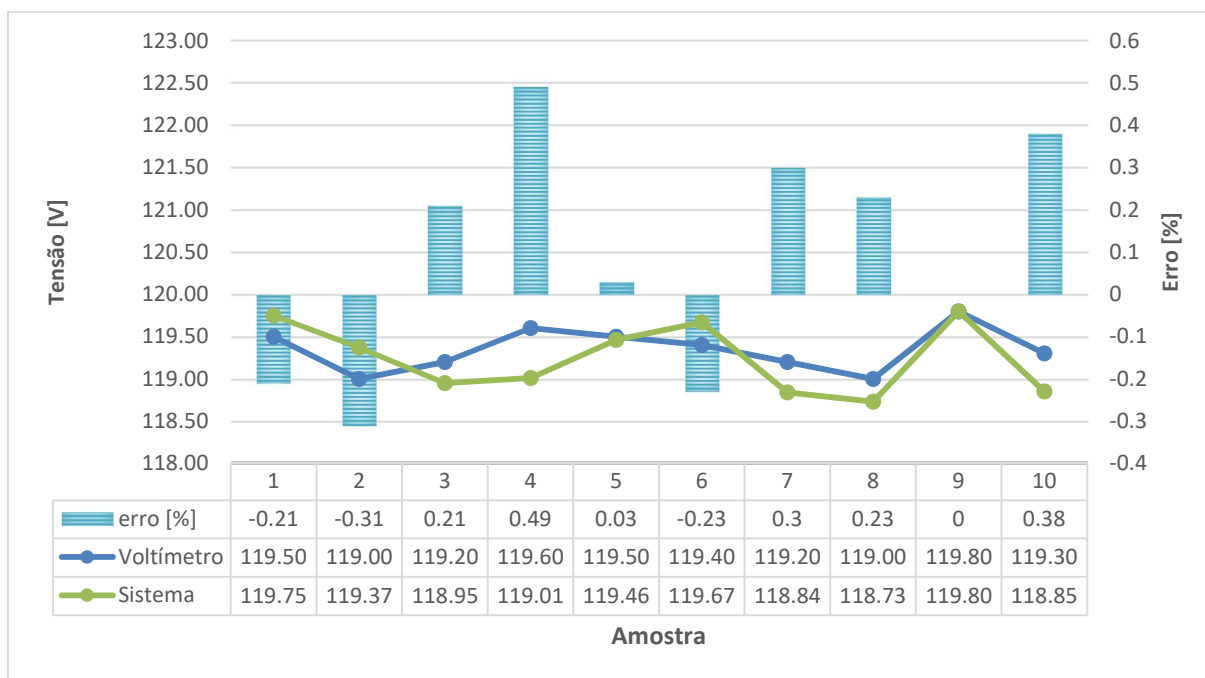
Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 2 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 70W



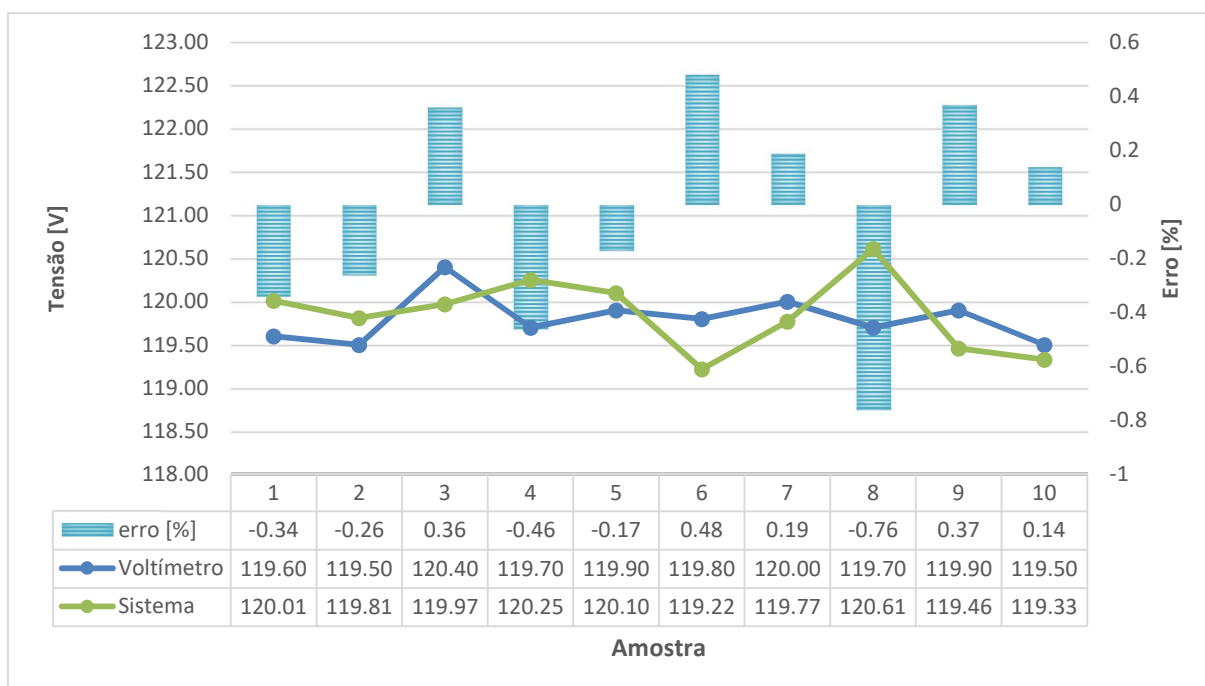
Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 3 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 40W



Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 4 – Análise de desempenho do sensor de tensão do sistema com carga de 15W



Fonte: Elaborada pelo Autor

Analisando os gráficos acima, é fácil notar que, independente da carga monitorada, o sensor de tensão é capaz de acompanhar, relativamente próximo, os resultados do medidor de referência. Mas, como é desejável expressar esse desempenho numericamente, calcula-se, a

partir dos dados presentes nas tabelas do ANEXO E, a média, variância, desvio padrão e coeficiente de variação de cada ensaio.

Desses resultados, presentes na Tabela, nota-se que não há uma média comum entre sensor e medidor em cada ensaio, portanto, é interessante utilizar o coeficiente de variação para analisar o quão distante estão os valores medidos em relação à própria média amostrada.

Enfim, avaliando as informações pertinentes da tabela 1, é aceitável dizer que os sensores possuem uma precisão muito semelhante à do medidor de referência, uma vez que, a maior diferença de variação entre eles foi de, apenas, 0,2%.

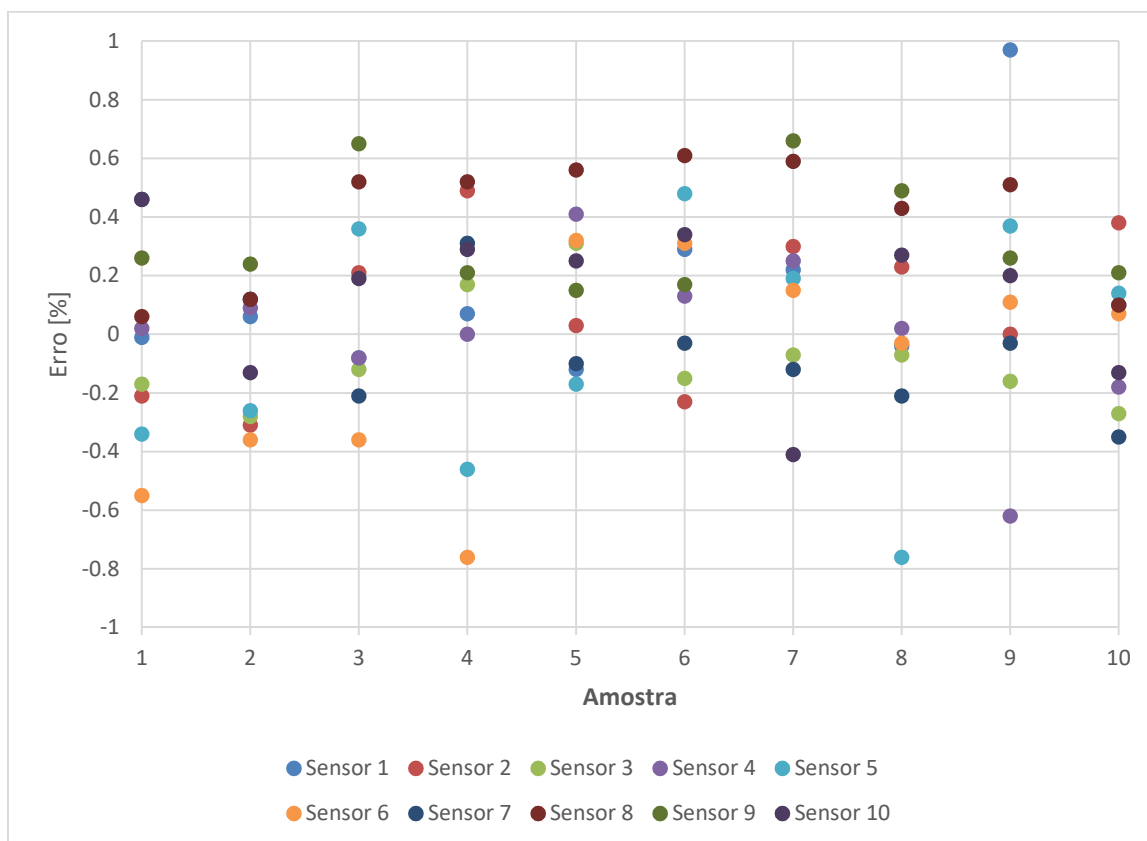
Tabela 1 – Análise de precisão dos sensores de tensão

Medidor	Média		Variância		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação	
	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor
1	121,47	121,30	0,43	0,79	0,65	0,89	0,54%	0,73%
2	119,35	119,24	0,06	0,15	0,25	0,39	0,21%	0,33%
3	120,44	120,54	0,01	0,05	0,12	0,22	0,10%	0,19%
4	119,60	119,60	0,02	0,14	0,13	0,37	0,11%	0,31%
5	119,80	119,85	0,07	0,17	0,26	0,41	0,21%	0,34%
6	120,25	120,38	0,10	0,35	0,32	0,59	0,27%	0,49%
7	120,40	120,42	0,15	0,10	0,38	0,31	0,32%	0,26%
8	120,62	120,13	0,01	0,08	0,07	0,28	0,06%	0,24%
9	121,28	120,88	0,00	0,04	0,04	0,21	0,03%	0,17%
10	120,05	119,89	0,13	0,18	0,36	0,42	0,30%	0,35%

Fonte: Produção do próprio autor

Além disso, como pode-se observar, no gráfico abaixo, o erro do valor medido pelo sistema em relação ao valor dos medidores de referência, se concentram na faixa de $\pm 0,8\%$, salvo um único caso onde o erro foi de 0,97%. Atribuiu-se à essa anomalia a classificação de erro sistemático, uma vez que, como discutido na sessão 3.3.3, o ajuste da sensibilidade do TP à variação do primário é realizado manualmente através de um potenciômetro, por isso, como pode ser verificado no ANEXO E, a amostragem de alguns medidores apresentou uma dispersão menor que de outros. Por fim, é justo qualificar que o sensor alcança uma exatidão apropriada para um medidor de tensão, uma vez que, $\pm 0,8\%$ em relação à referência representa um bom resultado.

Gráfico 5 – Dispersão do erro dos sensores de tensão

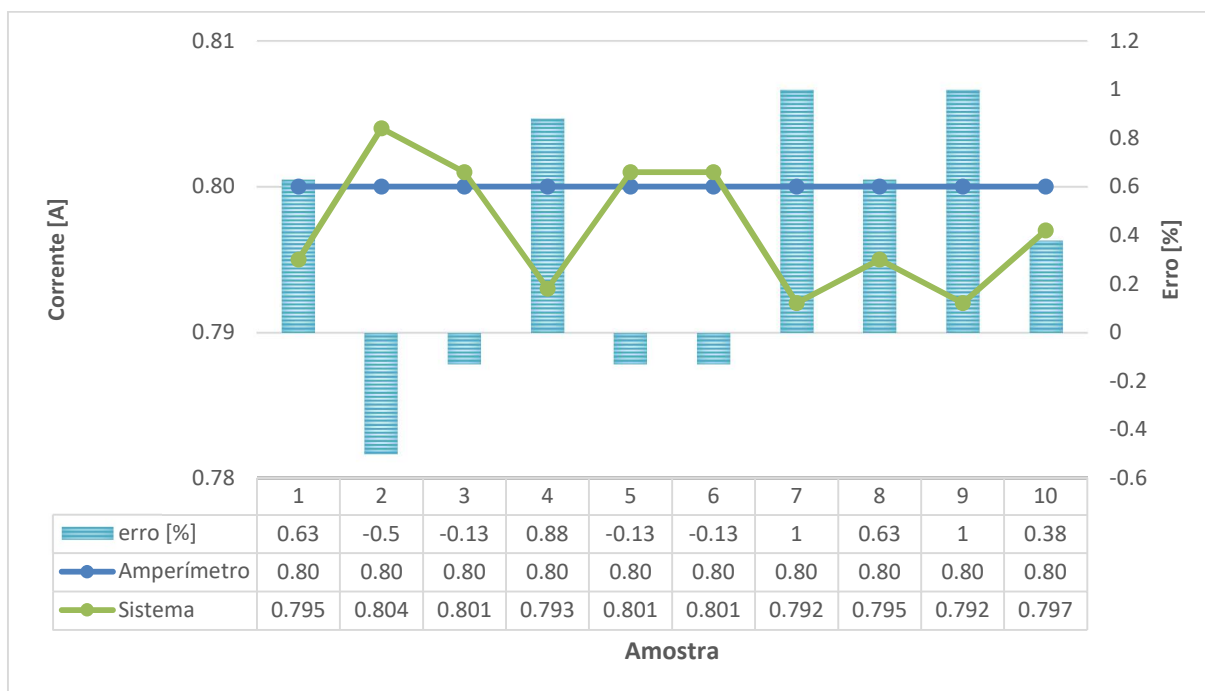


Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.2 Corrente

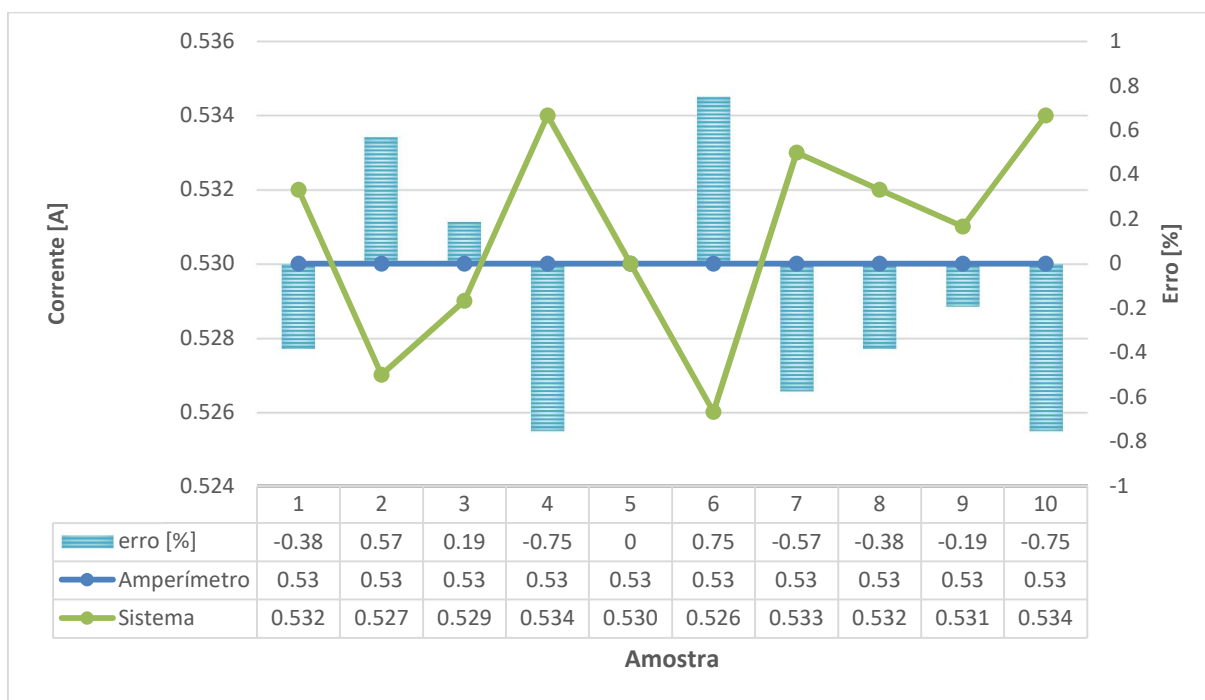
Os gráficos a seguir representam uma comparação entre os resultados das medições de corrente do sistema e do amperímetro de referência, nas quatro faixas de potência de carga presentes na UC.

Gráfico 6 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 100W



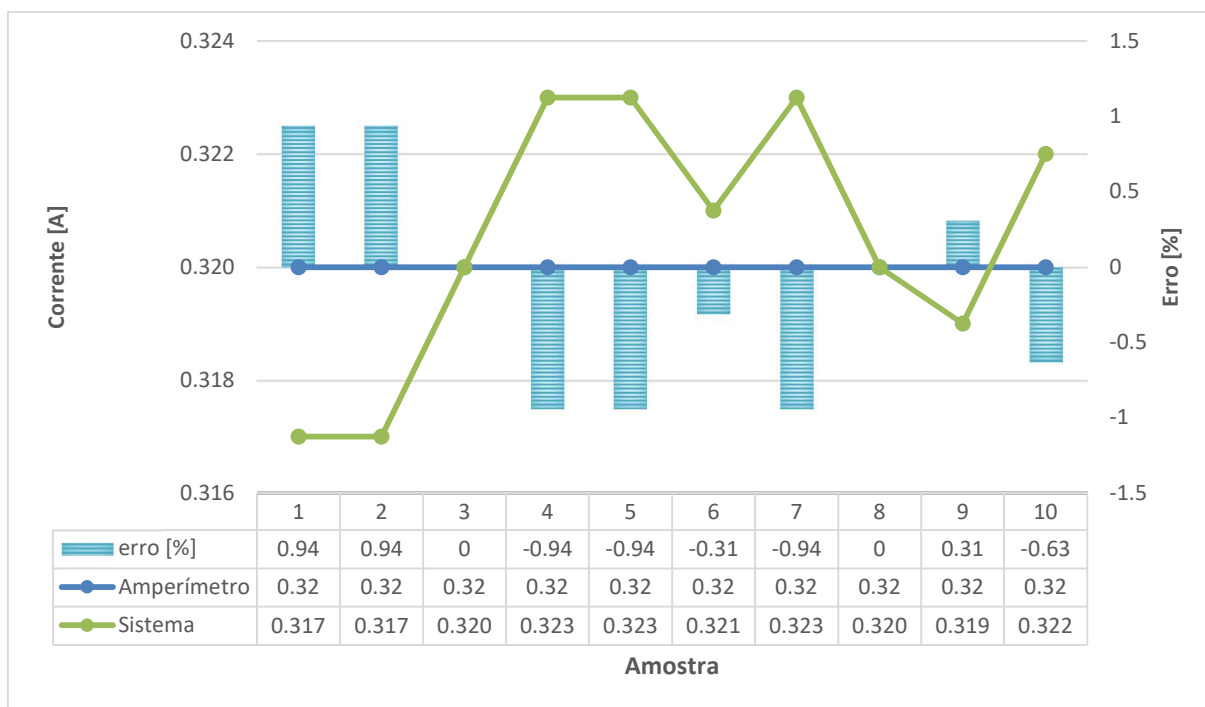
Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 7 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 70W



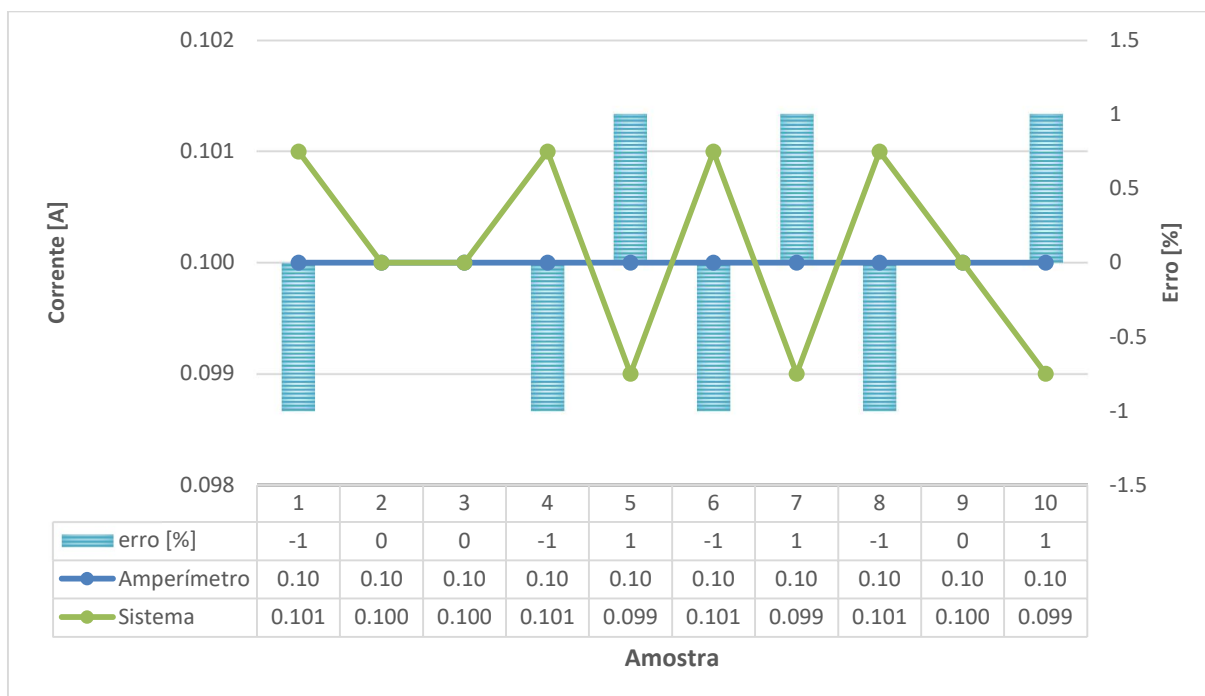
Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 8 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 40W



Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 9 – Análise de desempenho do sensor de corrente do sistema com carga de 15W



Fonte: Elaborada pelo Autor

Da mesma forma que a sessão anterior, analisando os gráficos abaixo, pode-se perceber que, independente da carga monitorada o sensor de corrente é capaz de acompanhar os resultados

do medidor de referência. E, pelos mesmos motivos, calcula-se a média, variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

Antes de analisar os resultados, é necessário fazer uma ressalva. Infelizmente, o medidor de referência, na faixa de corrente estudada, possui uma resolução diferente do medidor desenvolvido, sendo o primeiro com resolução de duas casas decimais após a vírgula e o segundo três casas decimais após a vírgula.

Dito isso, dos resultados presentes na Tabela, nota-se que, trazendo ambos medidores para a mesma resolução, há uma média comum entre sensor e medidor em cada ensaio, porém, seria imprudente analisar a precisão dos sensores numa situação dúbia, portanto essa análise será tratada na sessão 7.4 quando for realizada em carga total.

Tabela 2 – Análise de precisão dos sensores de corrente

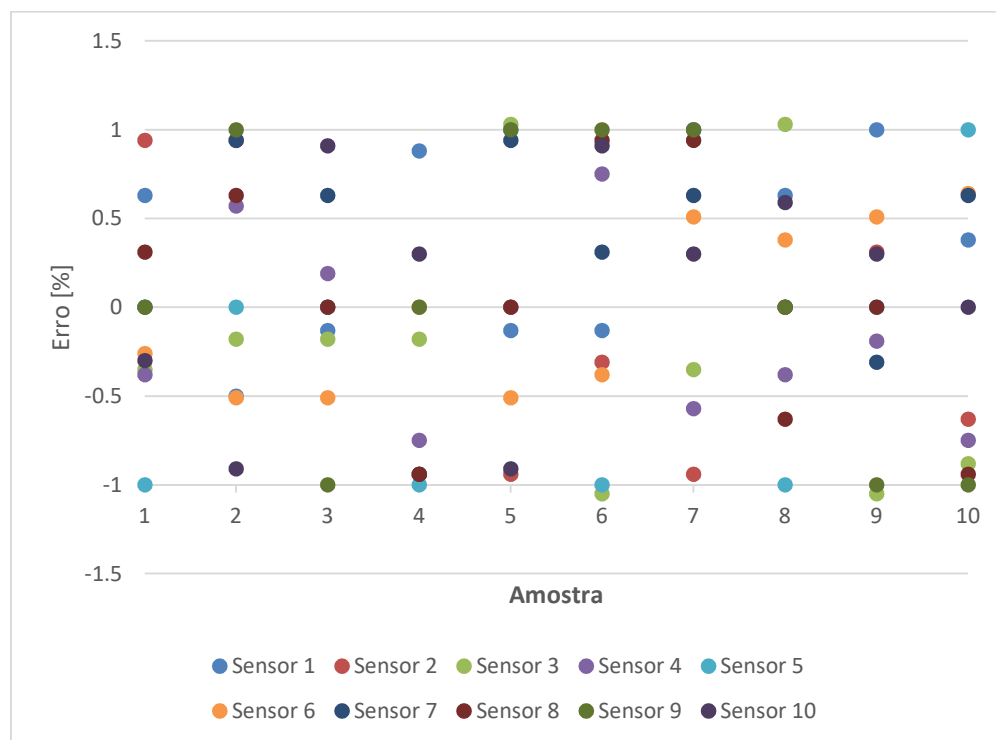
Medidor	Média		Variância		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação	
	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor
1	0,80	0,797	0,00	0,000	0,00	0,004	0,000%	0,519%
2	0,32	0,321	0,00	0,000	0,00	0,002	0,000%	0,687%
3	0,57	0,573	0,00	0,000	0,00	0,002	0,699%	0,338%
4	0,53	0,531	0,00	0,000	0,00	0,003	0,000%	0,497%
5	0,10	0,100	0,00	0,000	0,00	0,001	0,000%	0,830%
6	0,78	0,780	0,00	0,000	0,00	0,004	0,000%	0,457%
7	0,32	0,319	0,00	0,000	0,00	0,002	0,000%	0,568%
8	0,32	0,320	0,00	0,000	0,00	0,002	0,000%	0,662%
9	0,10	0,100	0,00	0,000	0,00	0,001	0,000%	0,831%
10	0,10	0,100	0,00	0,000	0,00	0,001	0,000%	0,831%

Fonte: Produção do próprio autor

Além disso, como pode-se observar no gráfico abaixo, o erro dos medidores se concentram na faixa de $\pm 1\%$, salvo algumas exceções onde o erro foi de 1,03% e -1,05%. A esses valores indesejados, por serem relativamente pequenos, considerou-se o erro como 1%. Então, nas condições analisadas o sensor alcança uma exatidão apropriada para um medidor de corrente uma vez que, $\pm 1\%$ em relação à referência representa um bom resultado. Todavia, não se pode afirmar que a faixa de $\pm 1\%$ do gráfico abaixo é realmente válida, visto que o valor registrado pelo medidor de referência é um valor arredondado.

Apesar disso, a situação anterior não invalida o medidor desenvolvido, no melhor dos casos ele estaria cumprindo os parâmetros de exatidão e, no pior dos casos, seria menos eficaz que um medidor de referência, porém, mesmo assim, seria um medidor útil.

Gráfico 10 – Dispersão do erro dos sensores de corrente

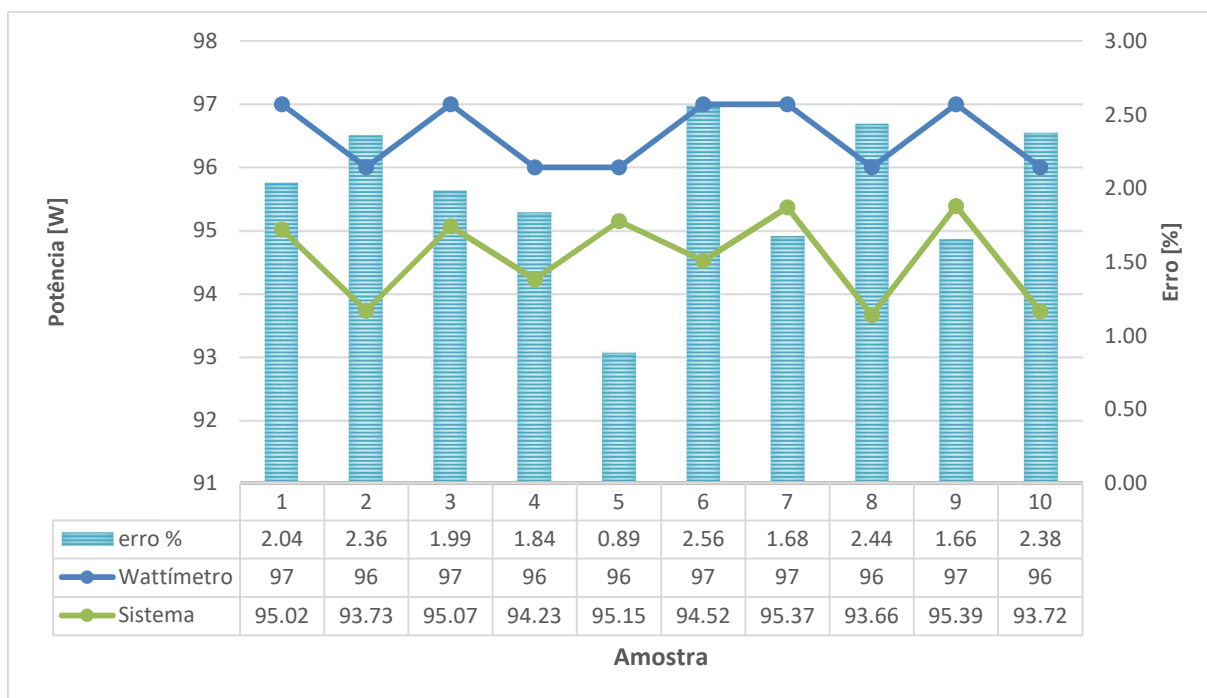


Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.3 Potência Ativa

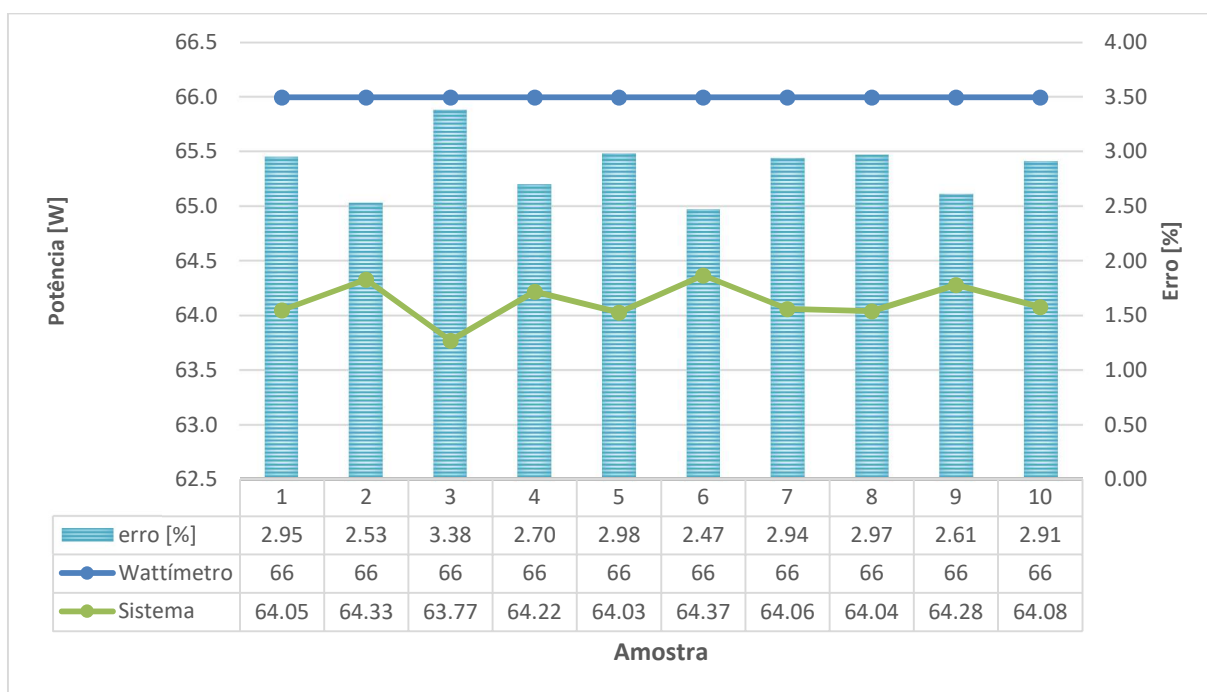
Os gráficos a seguir representam uma comparação entre os resultados das medições de potência do sistema e do wattímetro de referência, nas quatro faixas de potência de carga presentes na UC.

Gráfico 11 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 100W



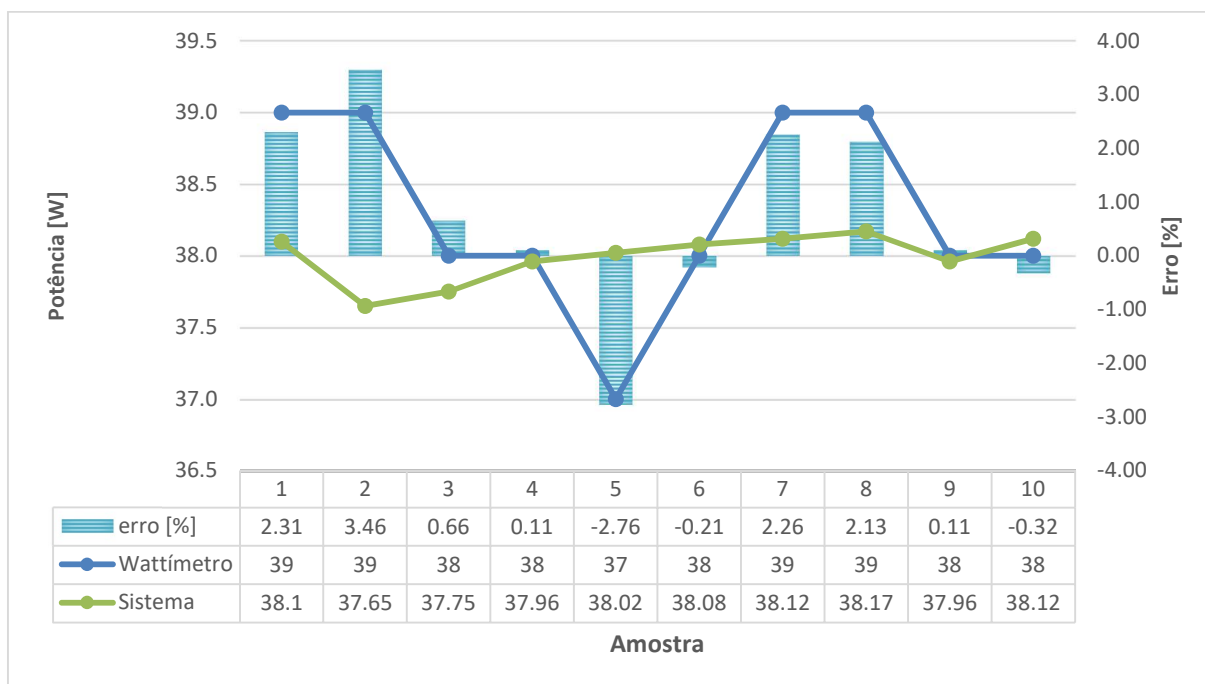
Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 12 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 70W



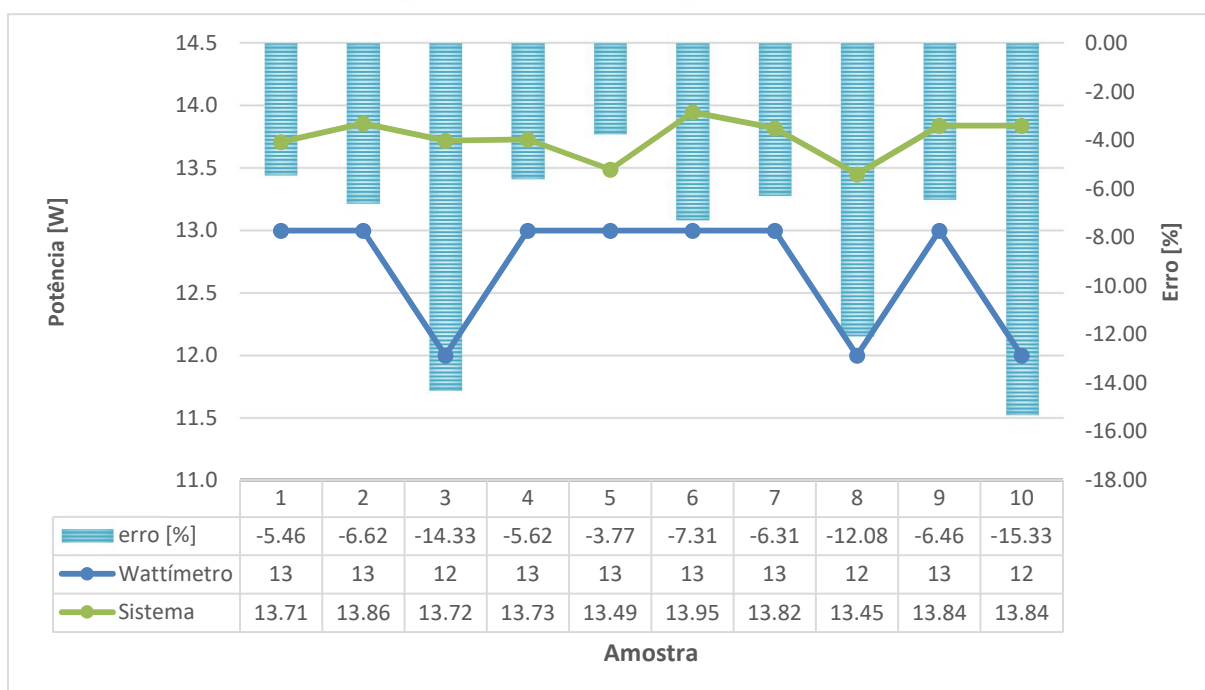
Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 13 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 40W



Fonte: Elaborada pelo Autor

Gráfico 14 – Análise de desempenho do medidor de potência do sistema com carga de 15W



Fonte: Elaborada pelo Autor

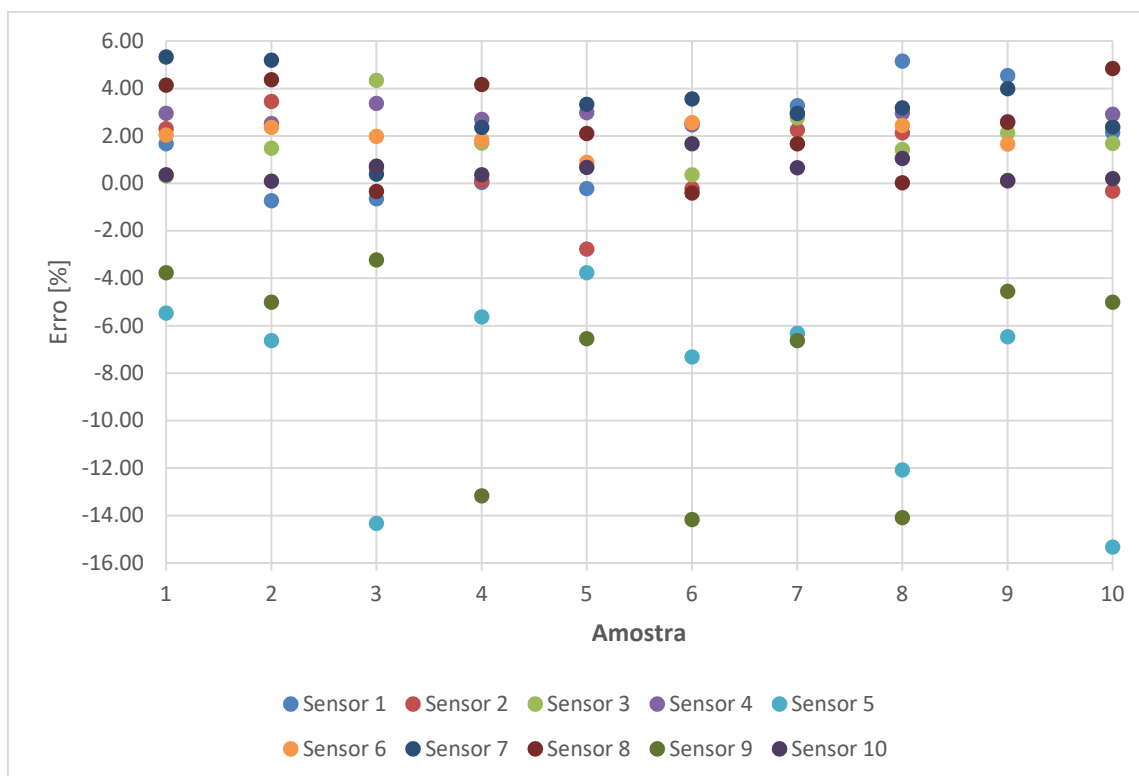
Como essa grandeza é produto da tensão, corrente e fator de potência, espera-se que haja acúmulo do erro das mesmas, portanto, na falta de uma análise completa da sessão anterior, será deixado para a próxima sessão a análise de precisão.

Isto posto, observando os gráficos abaixo, nota-se um padrão de deslocamento dos resultados: para cargas de 100W e 70W os dados do sensor são menores que os de referência; para cargas de 40W os dados são em média iguais; e para cargas de 15W os dados do sensor são maiores que os de referência.

Para entender esse padrão, verifica-se o datasheet do TC no ANEXO D. Nele, encontra-se a informação do erro do ângulo de fase para uma corrente primária de 5A usando um resistor de 50Ω , e, além disso, sabe-se que o erro de ângulo de fase do transformador é uma característica intrínseca do mesmo devido a sua natureza eletromagnética, e, que da mesma forma que ocorre no TP, o TC possui uma região não-linear para esse tipo de erro. Infelizmente a fabricante falhou em fornecer graficamente essa informação de erro do ângulo de fase em relação a corrente do enrolamento primário, então, tomando como referência o gráfico do TP presente no ANEXO C, assume-se que, como as cargas do sistema demandam correntes muito menores que os 5A, o TC, muito provavelmente, está trabalha numa área não linear. Portanto é compreensível que haja um deslocamento entre o valor medido pelo sistema e o do medidor de referência. Além disso, como explicado na sessão 3.3.3, existe um fator de correção do desvio do ângulo de fase no software desenvolvido, e, como esse fator é um valor fixo, ajustou-se o mesmo para corrigir o ângulo para uma carga de 40W, por esse motivo ocorre um deslocamento positivo ou negativo dependendo da potência da carga.

Por fim, analisando a dispersão do erro dos medidores de potência (Gráfico 15), fica claro que, há a necessidade de realizar ensaios com o TC para adquirir a curva do erro do deslocamento de fase afim de aprimorar o algoritmo do software, para que a correção do ângulo ocorra proporcionalmente ao módulo da corrente do primário. Assim sendo, o sistema não atende o parâmetro de exatidão do Wattímetro de referência, demonstrando erro inversamente proporcionais à potência da carga.

Gráfico 15 – Dispersão do erro dos medidores de potência ativa



Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.4 Carga total

Como o objetivo principal do sistema projetado é de estimar o consumo total da UC, é conveniente avaliar o desempenho do mesmo em carga total. A análise será realizada para tensão, corrente, fator de potência e potência ativa com o auxílio das tabelas 1, 2 e 3 e os gráficos abaixo.

Tabela 3 – Análise de precisão do sistema de medição

Medidor	Média		Variância		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação	
	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor	Medidor	Sensor
Tensão	122,42	123,56	0,006	0,0239	0,075	0,155	0,061%	0,125%
Corrente	4,24	4,14	0,000	0,0001	0,000	0,007	0,000%	0,181%
Potência	509,00	496,54	0,200	1,1521	0,447	1,073	0,088%	0,216%
FP	0,98	0,97	0,000	0,0000	0,001	0,001	0,121%	0,146%

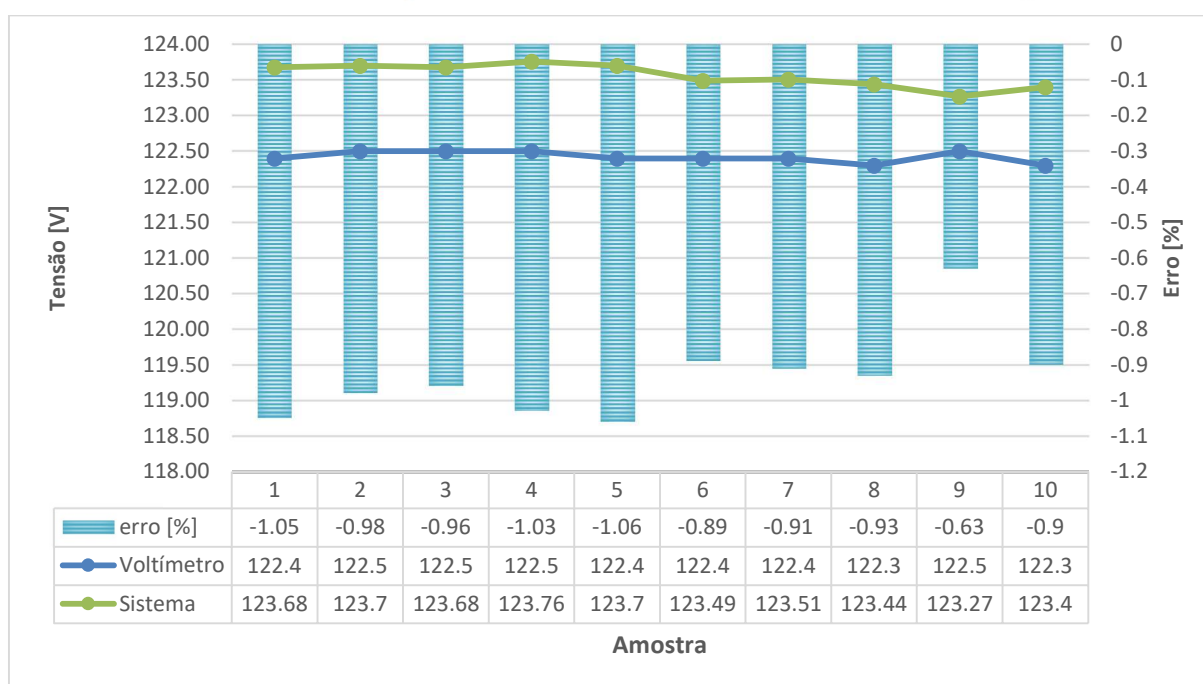
Fonte: Produção do próprio autor

5.1.4.1 Tensão

Observando o Gráfico, percebe-se que, o medidor de tensão manteve a capacidade de acompanhar os resultados do medidor de referência. E disso, destaca-se que, qualitativamente a precisão melhorou, uma vez que, comparando a tabela 1 e 3, o coeficiente de variação diminuiu significativamente.

Além disso, nota-se um aumento no erro relativo, isso, pelo fato de que, apesar dos medidores individuais oferecerem exatidão de $\pm 0,8\%$, não há um medidor para registrar os valores da tensão de entrada da UC. Ou seja, o método utilizado (registrar a média da tensão de todos os sensores como a tensão de entrada) criou mais etapas suscetíveis a erro.

Gráfico 16 – Análise de desempenho do medidor de tensão do sistema com carga total



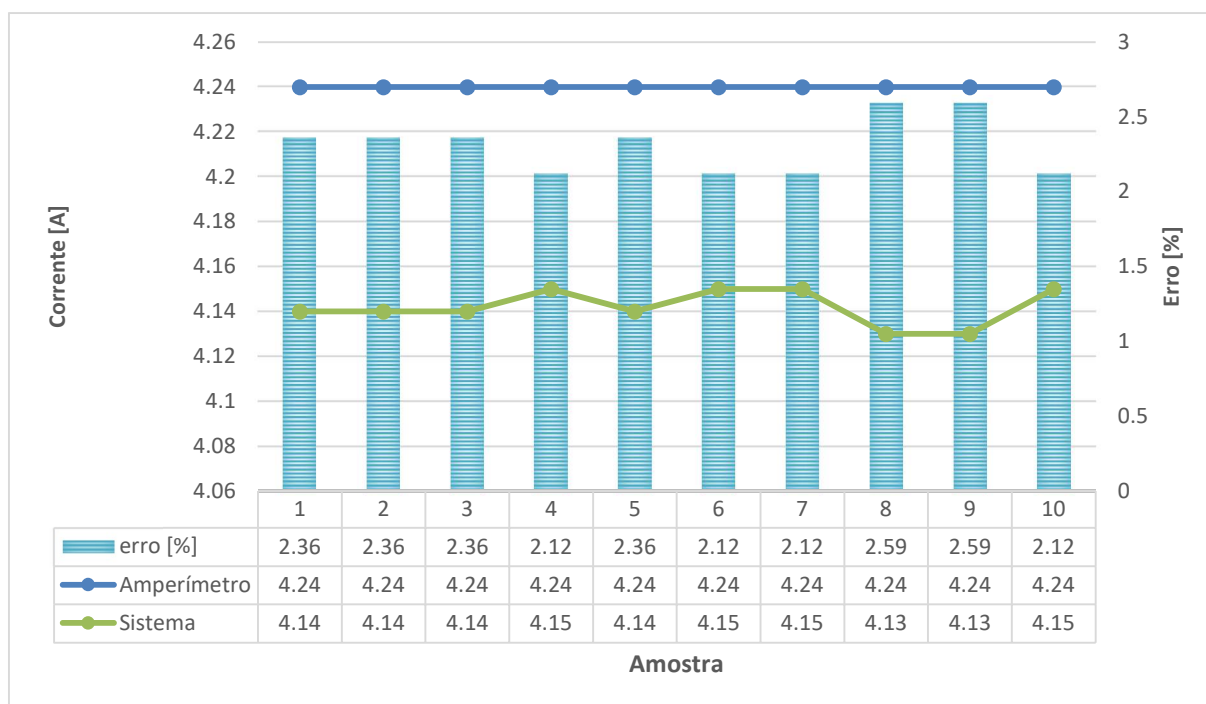
Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.4.2 Corrente

Diferente da sessão 5.1.2, os dados coletados pelo sistema e pelo amperímetro estão adequadamente na mesma resolução, portanto é admissível avaliar a sua precisão. Com isso em mente, observando a tabela 3, percebe-se que, o medidor de corrente pode ser considerado preciso, uma vez que o seu coeficiente de variação foi de apenas 0,181% e, ainda, comparando com a tabela 2, verifica-se que a precisão do sensor melhorou significativamente.

Apesar disso, infelizmente, observou-se o pior caso do que foi discutido na sessão 5.1.2, no momento em que a escala do medidor tornou-se adequada para a grandeza medida, ficou claro que o erro relativo era bem maior do que observado na análise individual.

Gráfico 17 – Análise de desempenho do medidor de corrente do sistema com carga total



Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.4.3 Fator de potência

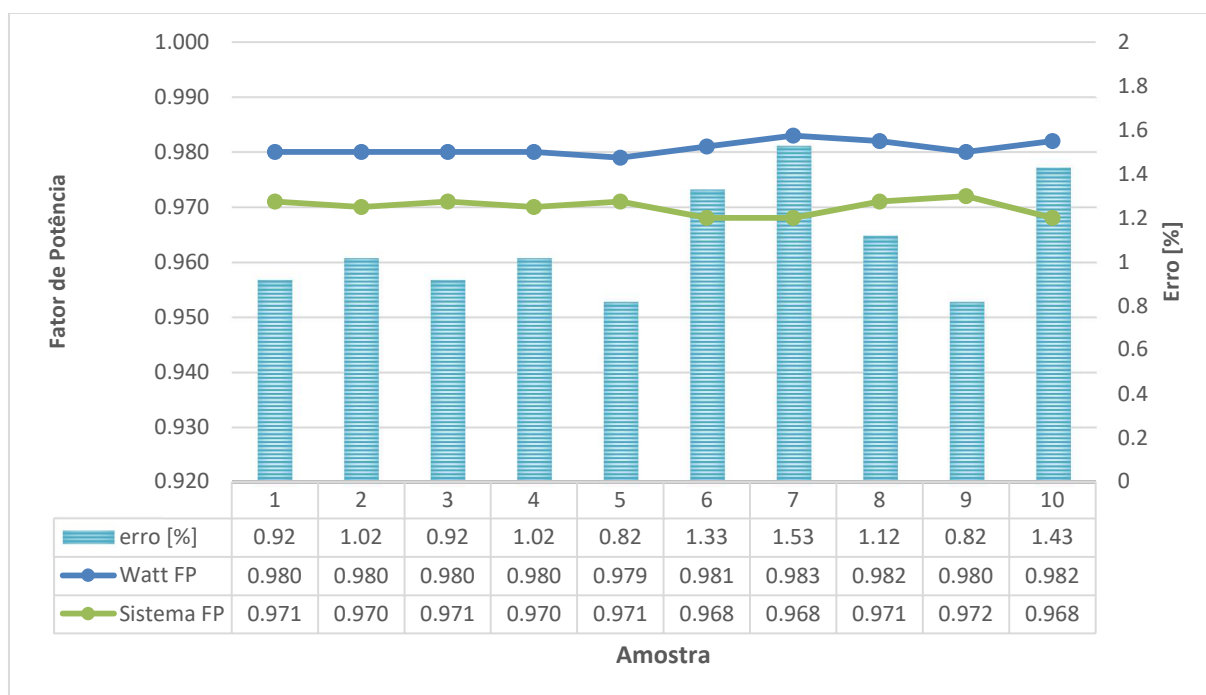
Tendo em vista o desempenho dos sensores de tensão e corrente, não é uma surpresa que o fator de potência apresenta uma boa precisão (tabela 3), entretanto, a parte importante dessa etapa é mensurar o desempenho do algoritmo de calcular esse fator a partir das informações dos sensores.

Para isso, primeiramente, é preciso entender como esse cálculo é feito. Então, recapitulando a sessão 2, temos que o fator de potência representa a proporção de potência ativa presente na potência aparente, e que essas potências são definidas pelas equações (12) e (17), respectivamente. Disso, nota-se que, as potências dependem do módulo da tensão, do módulo da corrente e da diferença de fase entre essas grandezas. Por isso, o que o algoritmo faz é, aplicar a constante de correção do ângulo de fase, explicado na sessão 3.3.3, para corrigir os

efeitos do transformador sobre o sinal, depois, calcula a potência ativa como o valor médio da potência instantânea de múltiplas amostras, calcula a potência aparente como produto da raiz quadrada do quadrado do valor médio da tensão e da corrente e, com essas informações, calcula o fator de potência.

Com isso e com a conclusão da sessão 5.1.3 em mente, pode-se afirmar que o erro entre a referência e o sistema apresentado no gráfico abaixo acontece, justamente, devido ao transformador estar trabalhando numa zone de não-linearidade, portanto, apesar do erro estar fluando em 1% do valor de referência é possível melhorar esse resultado de exatidão.

Gráfico 18 – Análise do fator de potência da UC



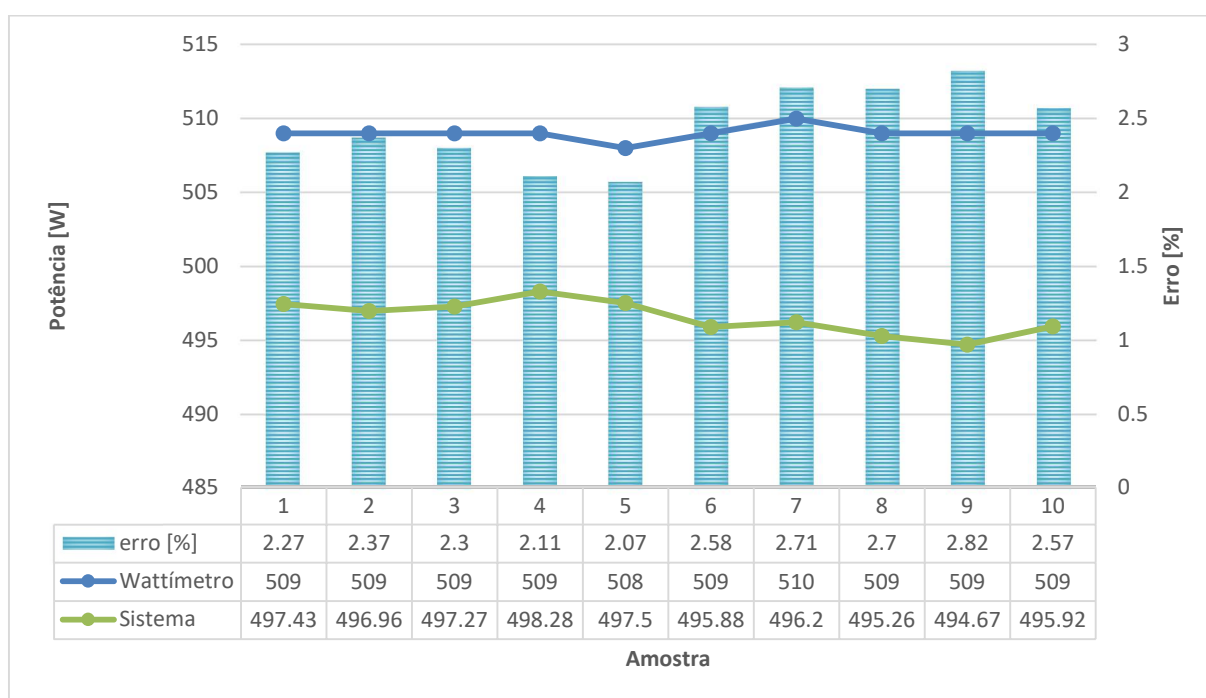
Fonte: Elaborada pelo Autor

5.1.4.4 Potência ativa

Apoiado em toda a discussão da sessão 5.1, é trivial que o resultado do sistema é preciso, uma vez que as grandezas que o definem demonstraram um nível adequado de precisão. Quanto à exatidão, pode-se observar, do gráfico abaixo, um erro relativo médio de 2,45% que é reflexo direto do desempenho dos sensores, principalmente dos sensores de corrente, que tiveram as piores performances.

Felizmente, calibrar os sensores tensão é uma tarefa simples, porém, não se pode dizer o mesmo dos sensores de corrente. Pelo que foi discutido na sessão 5.1.3, há uma distorção na fase do sinal e a forma proposta para resolver digitalmente essa questão está longe de ser algo simples, todavia, uma outra opção é reprojeter o circuito do TC para que ele tenha uma resistência de carga de 50Ω garantindo, dessa forma, a linearidade da leitura, com a ressalva de que esse projeto precisa de um circuito de amplificação do sinal do secundário do TC para que não haja perda de informação na conversão A/D do Arduino.

Gráfico 19 – Análise de desempenho do medidor de potência com carga total



Fonte: Elaborada pelo Autor

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, pode-se afirmar que o sistema embarcado desenvolvido cumpre o seu papel de realizar a aquisição dos dados, trata-los e envia-los via internet. Entretanto, é fácil de perceber que o processador utilizado foi uma escolha infeliz para o projeto, uma vez que foi necessário utilizar um conjunto de microcontroladores para suprir a necessidade de processamento e, além disso, usar um servidor externo para hospedar o banco de dados e o painel de controle. Portanto, uma proposta interessante para complementar esse trabalho seria ao invés de utilizar um microcontrolador desenvolver o mesmo projeto num microprocessador como, por exemplo o Raspberry Pi.

Como apresentado no Capítulo 5, outra excelente implementação seria trabalhar com APIs garantindo assim a atualização automática das tarifas e bandeiras tarifárias em vigência na data da leitura. Para mais, seria interessante instalar o sistema embarcado numa rede elétrica residencial durante um ciclo de leitura da concessionária para ter o comparativo da conta de energia com o valor previsto pelo programa.

Além disso, seria indispensável reprojeter o circuito do TC, proposto na sessão 7.1.4.4, para que o sistema consiga cumprir o requisito da ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica) de que o medidor de potência ativa seja, no mínimo, classe 2 para atender ao grupo B.

Por fim, uma implementação valiosa seria utilizar redes neurais e *machine learning*, para que o sistema seja capaz de aprender a rotina dos habitantes da UC e, desse modo, otimizar o uso das cargas para minimizar os custos da conta de energia sem interferir nas atividades dos moradores.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SANTOS, Bruno P.; SILVA, Lucas A. M.; CELES, Clayson S. F. S.; BORGES NETO, João B.; PERES, Bruna S.; VIEIRA Marcos Augusto M.; VIEIRA, Luiz Filipe M.; GOUSSEVSKAIA, Olga N.; LOUREIRO, Antonio A. F. **Internet das Coisas: da Teoria à Prática**. Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>. Acesso em: 18 de Julho de 2019

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos**: 8. ed. São Paulo: Editora Pearson Education do Brasil Ltda, 2009. Cap. 10, p. 272-290.

ARDUINO. **What is Arduino**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>> Acesso em: 27 de Novembro de 2018

SGT. **Tarifa Branca**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>> Acesso em: 25 de Novembro de 2018

LE MOS, M. **Construindo um medidor de consumo de energia elétrica com Arduino**. Disponível em: <<http://blog.fazedores.com/construindo-um-medidor-de-consumo-de-energia-elétrica-com-arduino/>> Acesso em: 28 de Novembro de 2018

NXP SEMICONDUCTORS. **UM10204: I²C-bus specification and user manual**. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>> Acesso em: 27 de Novembro de 2018

ASSESSORIA DE IMPRENSA. **Tarifa branca é nova opção para os consumidores a partir de 2018**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/tarifa-branca-e-nova-opcao-para-os-consumidores-a-partir-de-2018/656877?inheritRedirect=false> Acesso em: 28 de Novembro de 2018

ZEMING ELETRONIC CO., LTD. **ZMPT101B**. Disponível em: <<http://www.zeming-e.com/English/prodviewtype5-298.html>> Acesso em 29 de Novembro de 2018

OPEN ENERGY MONITOR. **CT Sensors - Interfacing with na Arduino**. Disponível em: <<https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>> Acesso em 28 de Novembro de 2018

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?Version=1.0>> Acesso em 28 de Novembro de 2018

JSON. **Introdução ao JSON**. Disponível em: <<https://www.json.org/json-pt.html>> Acesso em 29 de Novembro de 2018

FILIPEFLOP. **Ethernet Shield WD5100**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/ethernet-shield-w5100-para-arduino/>> Acesso em: 28 de Novembro de 2018

APACHE FRIENDS. **O que é XAMPP**. Disponível em: <https://www.apachefriends.org/pt_br/index.html> Acesso em: 28 de Novembro de 2018

BLOG TECHTUDO. **O que é e como usar o MySQL**. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/04/o-que-e-e-como-usar-o-mysql.html>> Acesso em 29 de Novembro de 2018

EDP. **RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 2432 de 07 DE AGOSTO DE 2018**. Disponível em: <http://www.edp.com.br/CentralDocumentos/tabela_de_tarifas_bt_mt_precos_abertos_07082018.pdf> Acesso em 29 de Novembro de 2018

ARDUINO. **Ficha técnica Arduino MEGA**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>> Acesso em: 27 de Novembro de 2018

ARDUINO. **Ficha técnica Arduino NANO**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>> Acesso em: 27 de Novembro de 2018

INTERPLUS INDUSTRY CO., LTD. **Ficha técnica ZMPT101B**. Disponível em: <http://www.interplus-industry.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=173&lang=en> Acesso em: 29 de Novembro de 2018

ZEMING ELETRONIC CO., LTD. **Ficha técnica ZMCT103C**. Disponível em: <<http://www.zeming-e.com/English/prodviewbid5-280-70.html>> Acesso em: 29 de Novembro de 2018

8 ANEXO A

Figura 28 – Captura de tela da especificação técnica do Arduino MEGA

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>. Acesso em: 28 de Novembro de 2018

9 ANEXO B

Figura 29 – Captura de tela da especificação técnica do Arduino NANO

Microcontroller	ATmega328
Architecture	AVR
Operating Voltage	5 V
Flash Memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
Clock Speed	16 MHz
Analog IN Pins	8
EEPROM	1 KB
DC Current per I/O Pins	40 mA (I/O Pins)
Input Voltage	7-12 V
Digital I/O Pins	22 (6 of which are PWM)
PWM Output	6
Power Consumption	19 mA
PCB Size	18 x 45 mm
Weight	7 g
Product Code	A000005

Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em: 28 de Novembro de 2018

10 ANEXO C

Figura 30 – Captura de tela das especificações técnicas do ZMPT101B

ZMPT101B VOLTAGE TRANSFORMER

Applications

- * Sensing Overload Current
- * Ground fault detection
- * Metering
- * Analog to Digital Circuits

Electrical Specification

Primary Current	2mA
Secondary Current	2mA
Turns Ratio	1000:1000
Phase Angle Error	$\leq 20'$ (50 Ω)
Current Range	0 ~ 3mA
Linearity	0.1%
Accuracy Class	0.2
Rated Burden	$\leq 200 \Omega$
Frequency Range	50 ~ 60Hz
Dielectric Level	3000VAC/min
DC Resistance at 20°C	110 Ω

Mechanical Specification

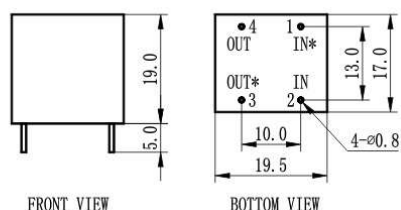
Cup	PBT
Encapsulant	Epoxy
Terminals	Pin $\phi 0.80\text{mm}$
Tolerance	$\pm 0.2 \text{ mm}$
Approx. Weight	13g
Case	Carton

Environment Specification

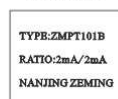
Storage Temperature	$-40^\circ\text{C} \sim +130^\circ\text{C}$
Insulation Resistance	$>100 \text{ M}\Omega$

Dimensions (mm)

Same Polarity *

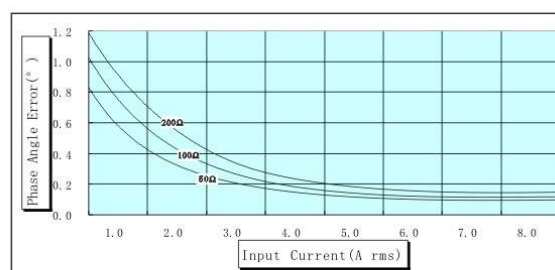
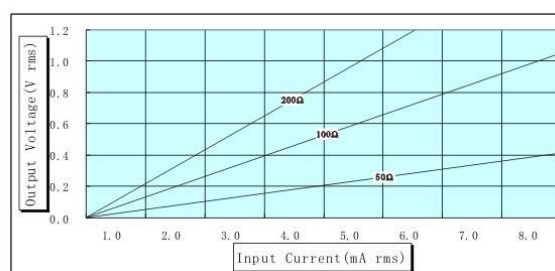


Label



Product Illustration

Output Characteristic



Description: Micro Precision Voltage Transformers, with low price, small size and easy PCB mounting, are mainly used in electrical energy meters, household electrical equipment, industrial apparatuses, electrical testing equipment and relay protection, widely acclaimed as well.

11 ANEXO D

Figura 31 – Captura de tela das especificações técnicas do ZMCT103C

The main technical parameter:

model	ZMCT103C (class A)
primary current	5A
secondary current	5mA
turns ratio	1000:1
phase angle error	$\leq 15'$ (input 5A, sampling resistor 50Ω)
linear range	0~15A (50Ω)
linearity	$\leq 0.2\%$ (5%~120%)
Permissible error	$-0.2\% \leq f \leq +0.2\%$ (input 5A, sampling resistor 50Ω)
isolation voltage	4500V
application	Precise measurement of current and power
Encapsulation	Epoxy
installation	PCB mounting
operating temperature	$-40^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$

Fonte: <http://www.zeming-e.com/English/prodviewbid5-280-70.html>. Acesso em: 29 de Novembro de 2018

12 ANEXO E

Tabela 4 – Análise de precisão do medidor de energia #1

Medidor de Energia #1								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
122,0	122,01	-0,01	0,80	0,795	0,63	93	91,45	1,67
122,1	122,03	0,06	0,80	0,804	-0,50	91	91,66	-0,73
122,1	122,20	-0,08	0,80	0,801	-0,13	91	91,59	-0,65
122,2	122,12	0,07	0,80	0,793	0,88	91	90,96	0,04
121,3	121,45	-0,12	0,80	0,801	-0,13	92	92,19	-0,21
121,5	121,15	0,29	0,80	0,801	-0,13	93	90,64	2,54
121,6	121,33	0,22	0,80	0,792	1	94	91,92	2,21
121,2	121,25	-0,04	0,80	0,795	0,63	96	93,05	3,07
120,5	119,33	0,97	0,80	0,792	1	95	92,68	2,44
120,2	120,08	0,1	0,80	0,797	0,38	93	92,01	1,06

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 5 – Análise de precisão do medidor de energia #2

Medidor de Energia #2								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
119,5	119,75	-0,21	0,32	0,317	0,94	39	38,10	2,31
119,0	119,37	-0,31	0,32	0,317	0,94	39	37,65	3,46
119,2	118,95	0,21	0,32	0,320	0	38	37,75	0,66
119,6	119,01	0,49	0,32	0,323	-0,94	38	37,96	0,11
119,5	119,46	0,03	0,32	0,323	-0,94	37	38,02	-2,76
119,4	119,67	-0,23	0,32	0,321	-0,31	38	38,08	-0,21
119,2	118,84	0,3	0,32	0,323	-0,94	39	38,12	2,26
119,0	118,73	0,23	0,32	0,320	0	39	38,17	2,13
119,8	119,80	0	0,32	0,319	0,31	38	37,96	0,11
119,3	118,85	0,38	0,32	0,322	-0,63	38	38,12	-0,32

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Medidor de referência da bancada (Wattímetro ou Multímetro)

Tabela 6 – Análise de precisão do medidor de energia #3

Medidor de Energia #3								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
120,3	120,50	-0,17	0,57	0,572	-0,35	68	67,79	0,31
120,2	120,56	-0,28	0,57	0,571	-0,18	69	67,98	1,48
120,5	120,65	-0,12	0,57	0,571	-0,18	71	67,91	4,35
120,5	120,30	0,17	0,57	0,571	-0,18	70	68,81	1,70
120,4	120,03	0,31	0,58	0,574	1,03	69	68,51	0,71
120,4	120,58	-0,15	0,57	0,576	-1,05	69	68,75	0,36
120,4	120,49	-0,07	0,57	0,572	-0,35	70	68,06	2,77
120,6	120,69	-0,07	0,58	0,574	1,03	69	68,01	1,43
120,6	120,79	-0,16	0,57	0,576	-1,05	70	68,51	2,13
120,5	120,82	-0,27	0,57	0,575	-0,88	70	68,82	1,69

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 7 – Análise de precisão do medidor de energia #4

Medidor de Energia #4								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
119,4	119,38	0,02	0,53	0,532	-0,38	66	64,05	2,95
119,5	119,39	0,09	0,53	0,527	0,57	66	64,33	2,53
119,7	119,80	-0,08	0,53	0,529	0,19	66	63,77	3,38
119,7	119,70	0	0,53	0,534	-0,75	66	64,22	2,70
119,6	119,11	0,41	0,53	0,530	0	66	64,03	2,98
119,8	119,64	0,13	0,53	0,526	0,75	66	64,37	2,47
119,4	119,10	0,25	0,53	0,533	-0,57	66	64,06	2,94
119,7	119,68	0,02	0,53	0,532	-0,38	66	64,04	2,97
119,7	120,44	-0,62	0,53	0,531	-0,19	66	64,28	2,61
119,5	119,71	-0,18	0,53	0,534	-0,75	66	64,08	2,91

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Medidor de referência da bancada (Wattímetro ou Multímetro)

Tabela 8 – Análise de precisão do medidor de energia #5

Medidor de Energia #5								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
119,6	120,01	-0,34	0,10	0,101	-1	13	13,71	-5,46
119,5	119,81	-0,26	0,10	0,100	0	13	13,86	-6,62
120,4	119,97	0,36	0,10	0,100	0	12	13,72	-14,33
119,7	120,25	-0,46	0,10	0,101	-1	13	13,73	-5,62
119,9	120,10	-0,17	0,10	0,099	1	13	13,49	-3,77
119,8	119,22	0,48	0,10	0,101	-1	13	13,95	-7,31
120,0	119,77	0,19	0,10	0,099	1	13	13,82	-6,31
119,7	120,61	-0,76	0,10	0,101	-1	12	13,45	-12,08
119,9	119,46	0,37	0,10	0,100	0	13	13,84	-6,46
119,5	119,33	0,14	0,10	0,099	1	12	13,84	-15,33

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 9 – Análise de precisão do medidor de energia #6

Medidor de Energia #6								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
120,5	121,16	-0,55	0,78	0,782	-0,26	97	95,02	2,04
120,0	120,43	-0,36	0,78	0,784	-0,51	96	93,73	2,36
120,4	120,83	-0,36	0,78	0,784	-0,51	97	95,07	1,99
120,5	121,41	-0,76	0,78	0,78	0	96	94,23	1,84
120,5	120,12	0,32	0,78	0,784	-0,51	96	95,15	0,89
120,2	119,83	0,31	0,78	0,783	-0,38	97	94,52	2,56
119,6	119,42	0,15	0,78	0,776	0,51	97	95,37	1,68
119,8	119,83	-0,03	0,78	0,777	0,38	96	93,66	2,44
120,4	120,27	0,11	0,78	0,776	0,51	97	95,39	1,66
120,6	120,51	0,07	0,78	0,775	0,64	96	93,72	2,38

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Medidor de referência da bancada (Wattímetro ou Multímetro)

Tabela 10 – Análise de precisão do medidor de energia #7

Medidor de Energia #7								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
120,7	120,14	0,46	0,32	0,32	0	40	37,87	5,33
120,7	120,55	0,12	0,32	0,317	0,94	40	37,92	5,20
120,2	120,45	-0,21	0,32	0,318	0,63	38	37,85	0,39
120,6	120,23	0,31	0,32	0,323	-0,94	39	38,08	2,36
120,8	120,92	-0,1	0,32	0,317	0,94	39	37,70	3,33
120,7	120,74	-0,03	0,32	0,319	0,31	39	37,61	3,56
120,4	120,55	-0,12	0,32	0,318	0,63	39	37,85	2,95
119,5	119,75	-0,21	0,32	0,32	0	39	37,76	3,18
120,4	120,44	-0,03	0,32	0,321	-0,31	39	37,44	4,00
120,0	120,42	-0,35	0,32	0,318	0,63	39	38,07	2,38

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 11 – Análise de precisão do medidor de energia #8

Medidor de Energia #8								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
120,7	120,63	0,06	0,32	0,319	0,31	41	39,30	4,15
120,7	120,55	0,12	0,32	0,318	0,63	41	39,21	4,37
120,7	120,07	0,52	0,32	0,32	0	39	39,13	-0,33
120,7	120,07	0,52	0,32	0,323	-0,94	41	39,29	4,17
120,6	119,92	0,56	0,32	0,32	0	40	39,16	2,10
120,6	119,87	0,61	0,32	0,317	0,94	39	39,16	-0,41
120,6	119,89	0,59	0,32	0,317	0,94	40	39,33	1,68
120,5	119,98	0,43	0,32	0,322	-0,63	39	38,99	0,03
120,5	119,88	0,51	0,32	0,32	0	40	38,97	2,58
120,6	120,48	0,1	0,32	0,323	-0,94	41	39,01	4,85

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Medidor de referência da bancada (Wattímetro ou Multímetro)

Tabela 12 – Análise de precisão do medidor de energia #9

Medidor de Energia #9								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
121,3	120,99	0,26	0,1	0,100	0	13	13,49	-3,77
121,3	121,01	0,24	0,1	0,099	1	13	13,65	-5,00
121,3	120,51	0,65	0,1	0,101	-1	13	13,42	-3,23
121,3	121,04	0,21	0,1	0,100	0	12	13,58	-13,17
121,2	121,02	0,15	0,1	0,099	1	13	13,85	-6,54
121,2	120,99	0,17	0,1	0,099	1	12	13,7	-14,17
121,3	120,50	0,66	0,1	0,099	1	13	13,86	-6,62
121,3	120,70	0,49	0,1	0,100	0	12	13,69	-14,08
121,3	120,98	0,26	0,1	0,101	-1	13	13,59	-4,54
121,3	121,04	0,21	0,1	0,101	-1	13	13,65	-5,00

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 13 – Análise de precisão do medidor de energia #10

Medidor de Energia #10								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
119,5	118,95	0,46	0,33	0,331	-0,30	41	40,85	0,37
120,0	120,16	-0,13	0,33	0,333	-0,91	41	40,96	0,10
120,9	120,67	0,19	0,33	0,327	0,91	41	40,70	0,73
119,9	119,55	0,29	0,33	0,329	0,30	41	40,85	0,37
120,2	119,9	0,25	0,33	0,333	-0,91	41	40,72	0,68
120,3	119,89	0,34	0,33	0,327	0,91	41	40,31	1,68
119,7	120,19	-0,41	0,33	0,329	0,30	41	40,73	0,66
120,1	119,77	0,27	0,34	0,338	0,59	41	40,57	1,05
120,1	119,86	0,20	0,33	0,329	0,30	41	40,95	0,12
120,2	120,08	0,10	0,33	0,330	0	41	40,92	0,20

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Medidor de referência da bancada (Wattímetro ou Multímetro)

Tabela 14 – Análise de precisão do medidor de energia com carga total

Medidor de Energia								
Tensão [V]		Erro [%]	Corrente [A]		Erro [%]	Potência [W]		Erro [%]
Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Sensor		Medidor ¹	Arduino	
122,4	123,68	-1,05	4,24	4,14	2,36	509	497,43	2,27
122,5	123,70	-0,98	4,24	4,14	2,36	509	496,96	2,37
122,5	123,68	-0,96	4,24	4,14	2,36	509	497,27	2,3
122,5	123,76	-1,03	4,24	4,15	2,12	509	498,28	2,11
122,4	123,70	-1,06	4,24	4,14	2,36	508	497,50	2,07
122,4	123,49	-0,89	4,24	4,15	2,12	509	495,88	2,58
122,4	123,51	-0,91	4,24	4,15	2,12	510	496,20	2,71
122,3	123,44	-0,93	4,24	4,13	2,59	509	495,26	2,7
122,5	123,27	-0,63	4,24	4,13	2,59	509	494,67	2,82
122,3	123,40	-0,90	4,24	4,15	2,12	509	495,92	2,57

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 15 – Análise do fator de potência do medidor de energia com carga total

Medidor de Energia								
Potência [W]			Potência [VA]			Fator de Potência		
Medidor ¹	Arduino	Erro [%]	Medidor ¹	Sensor	Erro [%]	Medidor ¹	Arduino	Erro [%]
509	497,43	2,27	518,98	512,04	1,34	0,980	0,971	0,9
509	496,96	2,37	519,4	512,12	1,4	0,980	0,970	1
509	497,27	2,30	519,4	512,04	1,42	0,980	0,971	0,9
509	498,28	2,11	519,4	513,6	1,12	0,980	0,970	1
508	497,50	2,07	518,98	512,12	1,32	0,979	0,971	0,8
509	495,88	2,58	518,98	512,48	1,25	0,981	0,968	1,3
510	496,20	2,71	518,98	512,57	1,24	0,983	0,968	1,5
509	495,26	2,70	518,55	509,81	1,69	0,982	0,971	1,1
509	494,67	2,82	519,4	509,11	1,98	0,980	0,972	0,8
509	495,92	2,57	518,55	512,11	1,24	0,982	0,968	1,4

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Medidor de referência da bancada (Wattímetro ou Multímetro)

13 ANEXO E

Tabela 16 - Custos do Sistema Embarcado

Custos do Sistema Embarcado			
Material	Quantidade	Preço Unitário ¹ [R\$]	Preço Total [R\$]
Arduino Mega ²	1	99,90	99,90
Arduino Nano ³	3	29,90	89,70
Sensor com ZMPT101B ⁴	10	25,00	250,00
ZMCT103C ⁵	10	17,50	175,00
<i>Shield Ethernet</i> ⁶	1	59,90	59,90
Módulo com 8 relés ⁷	1	39,90	39,90
Módulo com 4 relés ⁸	1	24,90	24,90
Placa de Fenolite 30x20 ⁹	1	14,55	14,55
Resistores (10 unidades) ¹⁰	4	1,90	7,60
Capacitores ¹¹	10	0,50	5,00
<i>Protoboard</i> ¹²	1	14,90	14,90
Jumpers (40unidades) ¹³	5	9,90	49,50
Total	-	-	830,85

Fonte: Produção do próprio autor

¹ Todos os preços foram verificados no dia 19 de julho de 2019

² Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/arduino-mega-2560>

³ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/placa-nano-v3-0-usb-arduino-451>

⁴ Consulado em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-929927117-sensor-de-tenso-ac-de-0-250vca-zmpt101b-_JM?matt_tool=88344885&matt_word&gclid=Cj0KCQjw1MXpBRDjARIsAHtdN-12H4sGiOW2NmeXZxZqpk8QEMK3DOgzunxAKwkipIrro3qjJByQyIgaAuCLEALw_wcB&quantity=1

⁵ Consulado em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1263936235-sensor-de-corrente-zmct103c-5a5ma-comp092-_JM

⁶ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/shield-ethernet-w5100>

⁷ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/modulo-rele-8-canais>

⁸ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/modulo-rele-4-canais>

⁹ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/placa-de-fenolite-cobreada-face-simples-20x15-459>

¹⁰ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/resistor-1k-ohm-10un>

¹¹ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/capacitor-eletrolitico-100uf>

¹² Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/protoboard-830>

¹³ Consulado em: <https://www.vidadesilicio.com.br/catalogsearch/result/?q=jumpers>