

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

LUANDERSON SCHIPITOSKI

SISTEMA DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA PARA  
REDUÇÃO DE PERDAS NÃO TÉCNICAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Joinville

2021

LUANDERSON SCHIPITOSKI

SISTEMA DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA PARA  
REDUÇÃO DE PERDAS NÃO TÉCNICAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Monografia apresentada ao  
Curso de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica do  
Campus Joinville do  
Instituto Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do  
diploma de Engenheiro  
Eletricista.

Orientador: Luís Mariano  
Nodari

Joinville

2021

Schipitoski, Luanderson.

Sistema de medição e monitoramento da corrente elétrica para redução de perdas não técnicas de energia elétrica / Luanderson Schipitoski. – Joinville, SC, 2021.

88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Joinville, 2021.

Orientador: Luís Mariano Nodari.

1. Perdas de Energia. 2. Fiscalização. 3. Energia Elétrica. I. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. II. Sistema de medição e monitoramento da corrente elétrica para redução de perdas não técnicas de energia elétrica.

LUANDERSON SCHIPITOSKI

SISTEMA DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA PARA  
REDUÇÃO DE PERDAS NÃO TÉCNICAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenheiro Eletricista pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 06 de agosto de 2021.

---

Prof. Luís Mariano Nodari, Me.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Carlos Toshiyuki Matsumi, Dr.

Co-Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Janderson Duarte, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Nivaldo Theodoro Schiefler Junior, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a Mãe Rainha e Vencedora Três Vezes Admirável de Schoenstatt por me abençoarem e me protegerem no caminho percorrido durante a graduação.

A minha família, pelo amor, paciência, ajuda, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus colegas de turma durante toda a graduação, pelos momentos de descontração e principalmente pelas ajudas em momentos de dificuldades.

Aos docentes do Instituto Federal de Santa Catarina Campus Joinville, por todo o conhecimento transmitido, toda dedicação e todos os incentivos repassados.

A Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) por disponibilizar seu espaço físico de laboratório e fornecer os equipamentos necessários para realização dos testes e validação da ideia proposta.

E a todos que direta e indiretamente fizeram parte da minha caminhada até a formação, deixo aqui o meu muito obrigado.

## RESUMO

O referido trabalho acadêmico busca trazer uma proposta de implementação de sistema de medição da corrente elétrica em entradas de energia elétrica de unidades consumidoras possibilitando o monitoramento e a fiscalização desses locais. A aplicação dessa tecnologia permitirá a identificação de fraudes em medições e uma consequente redução das perdas não técnicas no setor elétrico brasileiro. Para atingir esse propósito, foi desenvolvido um projeto e implementado de modo a exemplificar como seria a atuação desse produto em uma aplicação prática, simulando situações de fraudes em medições e alcançando os objetivos propostos no estudo para solução do problema. Essa simulação, mesmo que em fase de testes, demonstrou-se satisfatória e comprovou que pode trazer um grande retorno financeiro em caso de aplicação comercial. Destaca-se que a prática de instalação de equipamentos de monitoramento de baixo custo, conforme o proposto nesse trabalho, em consonância com a permanência dos medidores convencionais torna-se um atrativo para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, tendo em vista a possibilidade de reduzir os percentuais de perdas não técnicas com um método de fiscalização eficiente e de custo reduzido para implementação.

**Palavras-Chave:** Perdas de Energia, Fiscalização, Energia Elétrica.

## **ABSTRACT**

This academic work seeks to bring a proposal for the implementation of a system for measuring the electrical current in electrical energy inputs of consumer units, enabling the monitoring and inspection of these locations. The application of this technology will allow the identification of measurement fraud and a consequent reduction in non-technical losses in the Brazilian electricity sector. To achieve this purpose, a project was developed and implemented in order to exemplify how this product would work in a practical application, simulating situations of fraud's measurement and achieving the objectives proposed in the work to solve the problem. This simulation, even though in the testing phase, proved to be satisfactory and proved that it can bring a great financial return in case of commercial application. It is worth highlighting that the practice of installing low-cost monitoring equipment, as proposed in this work, in line with the permanence of conventional meters becomes an attraction for electricity distribution concessionaires, in view of the possibility of reducing the percentages of non-technical losses with an efficient and cost-effective inspection method.

**Keywords:** Energy Losses, Inspection, Electrical Energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perdas sobre a Energia Injetada (2008-2019) .....	18
Figura 2 - Perdas Não Técnicas Reais e Regulatória sobre Baixa Tensão Faturado	19
Figura 3 - Perdas Não Técnicas Reais – Mapa Brasil (2019).....	20
Figura 4 – Composição da Tarifa de Energia Elétrica.....	22
Figura 5 – Microcontrolador ATmega328P .....	28
Figura 6 – Protocolo UART .....	29
Figura 7 - Comunicação SPI .....	30
Figura 8 - Transdutor de corrente elétrica YHDC modelo SCT-013-020 .....	30
Figura 9 - Esquemático SCT-013-020 .....	31
Figura 10 - Módulo Transceptor nRF24L01.....	33
Figura 11 - Módulo GSM/GPRS SIM800L.....	34
Figura 12 - Módulo Ethernet ENC28J60 .....	35
Figura 13 - CheckMeter 2.3 genX da marca MTE .....	37
Figura 14 - Diagrama principal do sistema de leitura .....	39
Figura 15 – Entrada de energia elétrica .....	40
Figura 16 - Diagrama do sistema de controle.....	41
Figura 17 – Esquema elétrico do circuito de condicionamento do ramal de ligação .	42
Figura 18 - Esquema elétrico do circuito de condicionamento do ramal de saída....	42
Figura 19 - Circuito auxiliar de condicionamento do transdutor de corrente elétrica .	43
Figura 20 – Módulo regulador de tensão LM317 DC-DC Step Down.....	44
Figura 21 – Esquema elétrico do sistema de controle.....	45
Figura 22 – Regressão linear no conjunto 1.....	47
Figura 23 – Regressão linear no conjunto 2.....	48
Figura 24 – Recebimento de SMS .....	49
Figura 25 – Envio e recebimento de SMS.....	50
Figura 26 – Valores salvos no banco de dados.....	50
Figura 27 – Sistema de controle em página WEB.....	51
Figura 28 – Circuito da montagem final do sistema de leitura.....	52
Figura 29 – Montagem final do sistema de leitura.....	53
Figura 30 – Montagem final do conjunto 1 do sistema de leitura .....	54
Figura 31 – Montagem final do conjunto 2 do sistema de leitura .....	55
Figura 32 – Modelo de montagem final da central de controle.....	56
Figura 33 – Forma de onda da primeira sequência de testes .....	58
Figura 34 – Forma de onda da segunda sequência de testes .....	60
Figura 35 – Forma de onda da terceira sequência de testes .....	61
Figura 36 – Formas de ondas da quarta sequência de testes .....	63
Figura 37 – Forma de onda da quinta sequência de testes .....	64
Figura 38 – Forma de onda da sexta sequência de testes.....	66
Figura 39 – Forma de onda da sétima sequência de testes.....	68
Figura 40 – Forma de onda da oitava sequência de testes.....	69
Figura 41 – Regressão linear no ramal de ligação .....	70
Figura 42 – Forma de onda da primeira sequência de testes com carga indutiva ....	72
Figura 43 – Formas de ondas da segunda sequência de testes com carga indutiva	74
Figura 44 – Formas de ondas da terceira sequência de testes com carga indutiva..	75
Figura 45 – Formas de ondas da quarta sequência de testes com carga indutiva....	77



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aferição dos Transdutores de Corrente Elétrica .....	46
Tabela 2 – Medições da primeira sequência de testes .....	57
Tabela 3 – Medições da segunda sequência de testes .....	59
Tabela 4 – Medições da terceira sequência de testes .....	60
Tabela 5 – Medições da quarta sequência de testes.....	62
Tabela 6 – Medições da quinta sequência de testes .....	63
Tabela 7 – Medições da sexta sequência de testes .....	65
Tabela 8 – Medições da sétima sequência de testes .....	67
Tabela 9 – Medições da oitava sequência de testes .....	68
Tabela 10 – Medições do projeto desenvolvido e carga aplicada.....	70
Tabela 11 – Medições da primeira sequência de testes com carga indutiva .....	71
Tabela 12 – Medições da segunda sequência de testes com carga indutiva .....	73
Tabela 13 – Medições da terceira sequência de testes com carga indutiva.....	74
Tabela 14 – Medições da quarta sequência de testes com carga indutiva.....	76
Tabela 15 – Medições do projeto desenvolvido e carga indutiva aplicada .....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica  
ASRO - Área com Severa Restrição à Operação  
EPE - Empresa de Pesquisa Energética  
FTP - File Transfer Protocol  
GPRS - General Packet Radio Services  
GSM - Global System for Mobile Communications  
HTTP - Hypertext Transfer Protocol  
IP - Internet Protocol  
I2C - Inter Integrated Circuit  
LAN - Local Area Networks  
LED - *Light Emitting Diode* (diodo emissor de luz)  
MISO - Master In, Slave Out  
MOSI - Master Out, Slave In  
NBR – Norma Brasileira  
PIC – Circuito integrado microcontrolador  
REI - Redes Elétricas Inteligentes  
SCK - Serial Clock  
SIM - Subscriber Identity Module  
SMS - Short Message Service  
SPI - Serial Peripheral Interface  
SQL - Standard Query Language  
SS - Slave Select  
TCP - Transmission Control Protocol  
TSEE - Tarifa Social de Energia Elétrica  
UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter  
WEB – Rede mundial de computadores da internet  
2G – Segunda Geração de Telefonia Móvel

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – Ampère

$A_{RMS}$  – Ampère RMS

$A_P$  – Ampère Pico

GHz – Giga Hertz

kHz – Quilo Hertz

kWh – Quilowatt-hora

kB – Quilo Byte

mA - MiliAmpère

Mb – Mega Bytes

RMS – Root Mean Square (Raiz Quadrática Média)

V – Volts

$V_{DC}$  – Volts Tensão Contínua

$V_{RMS}$  – Volts RMS

$V_P$  – Volts Pico

$\mu\text{F}$  – Micro Faraday

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	15
1.1.2 Objetivo específico .....	16
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Conceitos e definições técnicas</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Perdas técnicas e não técnicas de energia no setor elétrico brasileiro .....	17
2.1.2 Tarifação de energia elétrica no Brasil.....	21
2.1.3 Redes elétricas inteligentes e os medidores convencionais de grandezas elétricas.....	23
2.1.4 Medidas adotadas no combate as perdas não técnicas.....	25
<b>2.2 Dispositivos utilizados na implementação do projeto</b> .....	<b>27</b>
2.2.1 Microcontroladores .....	28
2.2.2 Aquisição de dados com transdutores de corrente elétrica .....	30
2.2.3 Transmissão de dados via radiofrequência .....	32
2.2.4 Transmissão de dados via GSM/GPRS.....	33
2.2.5 Conexão à rede local via módulo ethernet .....	35
2.2.6 Armazenamento de informações no banco de dados .....	36
2.2.7 Equipamento aferidor modelo CheckMeter 2.3 genX da marca MTE .....	36
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1 Desenvolvimento do projeto</b> .....	<b>41</b>
3.1.1 Sistema de leitura.....	41
3.1.2 Sistema de controle.....	44
<b>3.2 Testes preliminares dos dispositivos de medição e comunicação</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3 Sistema desenvolvido</b> .....	<b>52</b>
3.3.1 Comissionamento final .....	56
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>83</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>86</b>
<b>A1 – Resultados obtidos em sequências de testes iniciais</b> .....	<b>86</b>
<b>A2 – Custos do sistema desenvolvido</b> .....	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2021), o consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2019 foi de, aproximadamente, 481,82 TWh, representando um aumento de 1,38% em relação ao ano de 2018 e de 3,07% em relação ao ano de 2017.

O aumento no consumo de energia elétrica é um indicio de melhora nos indicadores de desenvolvimento econômicos e sociais, haja vista que o desenvolvimento de novas tecnologias e as produções industriais estão vinculadas ao uso de energia elétrica. Sendo assim, é de responsabilidade das concessionárias de distribuição de energia elétrica o fornecimento de energia elétrica com qualidade e confiabilidade ao cliente, garantindo que este possa desenvolver-se socialmente e economicamente.

O fornecimento de energia elétrica até a entrega ao consumidor final (residência, comércio, indústria, etc.) é realizado pelo sistema elétrico de potência. Entretanto, a energia elétrica adquirida pelas distribuidoras no início desse ciclo é diferente do valor faturado aos consumidores, pois ocorrem as perdas de energia elétrica. Essas perdas são definidas em técnicas e não técnicas, sendo a perda técnica aquela pertinente a atividade de distribuição (transformação de energia elétrica em térmica nos condutores, perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas, etc.) e a perda não técnica, também chamada de perda comercial, que é a diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, originando-se geralmente devido a furtos no sistema de medição (ligações clandestinas ou fraudes em medições), erros de leitura, entre outros.

As perdas totais representaram 13,77% sobre a energia injetada do mercado consumidor em 2019, sendo 7,33% de perdas técnicas (39,2 TWh) e 6,44% de perdas não técnicas (35,9 TWh), conforme Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2020). As perdas não técnicas regulatórias no Brasil no ano de 2019, calculadas conforme metodologia ANEEL, representaram um custo de aproximadamente R\$ 5,3 bilhões ao ano, o que representa aos consumidores cerca de 3% do valor da tarifa de energia elétrica, conforme ANEEL (2020).

Para ter um sistema de distribuição de energia elétrica estável e eficiente, é imprescindível que as concessionárias de distribuição de energia elétrica reduzam as perdas totais (técnicas e não técnicas) a uma porcentagem mínima, visando o

fornecimento de energia elétrica com maior qualidade e o controle aprimorado sobre a rede de distribuição elétrica com informações precisas de consumo por cada região.

Em relação as perdas não técnicas, destacam-se as incertezas de medição e os furtos de energia (ligações clandestinas ou fraudes em medições) como os dois principais componentes desse tipo de perdas.

As incertezas de medição são leituras não realizadas em medidores, erros de anotações de leituristas ou defeitos nos equipamentos de medição. Em relação a essas incertezas, surge como solução, conforme Falcão (2010), o conceito *Smart Grid* utilizando medidores inteligentes que tem como principal objetivo a realização de leitura automática da energia consumida. Porém, para aplicação desse conceito, surge a necessidade de troca dos medidores convencionais por novos medidores com o conceito *Smart Grid*. Levando em consideração que, conforme ANEEL (2019), em março/2019 havia, aproximadamente, 84 milhões de unidades consumidoras no Brasil e que na grande maioria dessas são utilizados medidores convencionais em bom estado de funcionamento, a substituição desses medidores traria uma grande despesa as concessionárias de distribuição de energia elétrica que acabaria sendo repassada aos consumidores através do aumento do valor da tarifa de energia elétrica.

No que se refere aos furtos de energia elétrica, separam-se em dois ramos: ligações clandestinas e fraudes em medições. As ligações clandestinas são caracterizadas por imóveis sem medição de energia elétrica com conexões diretas na rede de distribuição da concessionária, ou seja, trata-se de imóvel sem vínculo com a distribuidora local ligada irregularmente sem anuência da empresa. Já as fraudes em medições, parcela das perdas não técnicas de interesse desse trabalho, são definidas por imóveis que possuem contrato vigente com a distribuidora de energia elétrica local, isto significa que neste há uma unidade consumidora com medição de energia elétrica, entretanto esse sistema de medição possui alguma irregularidade, seja uma alteração no funcionamento do medidor, um desvio nos condutores de entrada de energia elétrica ou outras modificações que adulterem o bom funcionamento e ocasionem erros de medição da real energia consumida nos equipamentos desses sistemas.

Atualmente, pouco é feito para coibir o avanço das perdas não técnicas, tendo em conta que as concessionárias se limitam a denúncias em ouvidorias, análises de redução brusca de consumo via sistema de faturamento e inspeções em campo

através de equipes de fiscalização, porém com pouca efetividade, tendo em conta o elevado número de irregularidades existentes em relação ao número de equipes disponíveis.

Conforme Cagnon et al. (2007), uma solução para empregar técnicas de monitoramento em locais com grande quantidade de unidades consumidoras é o desenvolvimento de equipamentos destinados ao gerenciamento em sistemas de energia elétrica que apresentem baixo custo e facilidade de implementação. A instalação de equipamentos de monitoramento de baixo custo em consonância com a permanência dos medidores convencionais torna-se atrativo para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, tendo em vista a possibilidade de reduzir os percentuais de perdas não técnicas com um método de fiscalização de custo reduzido para implementação.

Portanto, esse trabalho visa o desenvolvimento de equipamento para medição de corrente elétrica possibilitando o monitoramento e fiscalização do sistema de medição de unidades consumidoras. Para isso, será comparado a corrente elétrica da saída do medidor da unidade consumidora com a corrente elétrica do ramal de ligação que deriva da rede de distribuição. Os dados são enviados de forma remota para um sistema de controle, identificando automaticamente os locais com irregulares em medições. Dessa forma, almeja-se ao final deste trabalho possibilitar que as concessionárias de energia elétrica possam dispor deste tipo de tecnologia aplicando-a de acordo com suas necessidades para a redução nos percentuais de perdas não técnicas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Desenvolver equipamento para medição de corrente elétrica possibilitando o monitoramento e fiscalização da corrente elétrica no sistema de medição de unidades consumidoras. Enviando remotamente para sistema de controle os dados de comparação entre a corrente elétrica do ramal de ligação com a corrente elétrica após o medidor da unidade consumidora, almeja-se identificar automaticamente locais com fraudes e erros em medições, gerando aviso para que a equipe da concessionária efetue a inspeção.

### 1.1.2 Objetivo específico

- Estudar os conceitos e definições de perdas não técnicas de energia elétrica.
- Apresentar o atual sistema de medição de energia elétrica utilizados pelas concessionárias e quais equipamentos compõem esse sistema.
- Desenvolver circuito de medição para monitoramento utilizando transdutores de corrente elétrica.
- Estudar e implementar sistema de comunicação remota via radiofrequência.
- Estudar e implementar envio de dados via protocolo de comunicação GPRS (*General Packet Radio Service*) utilizando módulo GSM (*Global System for Mobile*).
- Desenvolver plataforma online de sistema de controle para simulação do processo de monitoramento dos equipamentos de fiscalização.
- Analisar os resultados obtidos.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Conceitos e definições técnicas

Nessa seção do trabalho será realizada uma abordagem introdutória sobre as perdas de energia no setor elétrico brasileiro, efetuando um estudo sobre os conceitos e definições das perdas não técnicas de energia elétrica. Além disso, será discutido o modelo de tarifação de energia elétrica adotado no território brasileiro, destacando os métodos utilizados pela agência reguladora para cálculo e composição dessa tarifa. Evoluindo no estudo dos sistemas de medição de energia elétrica utilizados pelas concessionárias brasileiras, serão apresentados os equipamentos atualmente utilizados para medição da energia elétrica consumida e a evolução tecnológica nesse mercado para adequação aos sistemas de redes elétricas inteligentes. Por último, serão apresentadas algumas das principais medidas adotadas por empresas nacionais e internacionais de distribuição de energia elétrica para redução dos percentuais de perdas não técnicas de energia elétrica.

#### 2.1.1 Perdas técnicas e não técnicas de energia no setor elétrico brasileiro

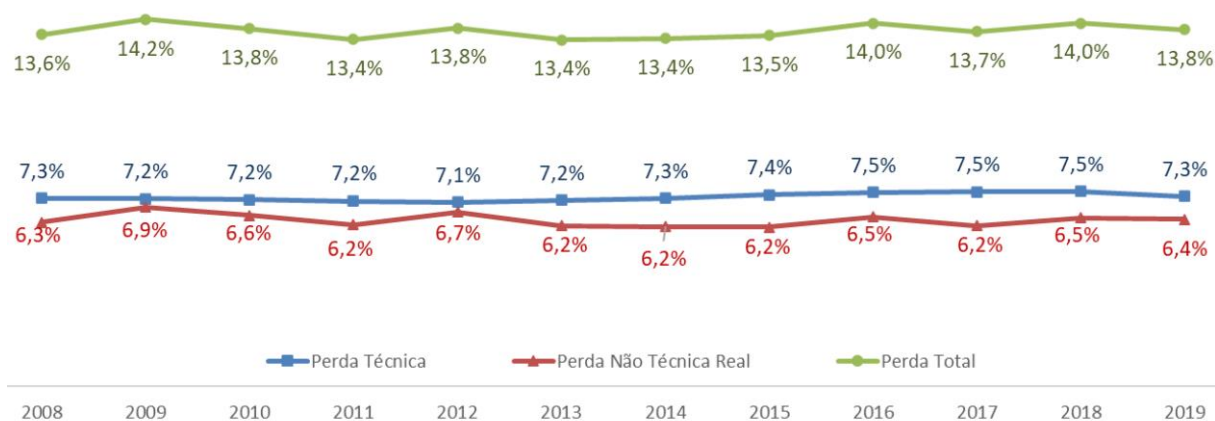
O sistema elétrico é dividido em geração, transmissão e distribuição até a entrega ao consumidor final, porém, devido a motivos técnicos ou comerciais, nem toda energia elétrica gerada e injetada na rede é comercializada. Essa diferença entre energia gerada e energia comercializada é definida como perdas de energia, subdividindo-se em perdas na rede básica e perdas na distribuição, sendo essa última a de interesse deste trabalho. Além disso, as perdas na distribuição são classificadas em perdas técnicas e perdas não técnicas.

As perdas técnicas são inerentes à atividade de distribuição de energia elétrica, pois parte da energia é dissipada no processo de transporte, transformação de tensão e medição em decorrência das leis da física. [...] Já as perdas não técnicas, apuradas pela diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, têm origem principalmente nos furtos (ligação clandestina, desvio direto da rede), fraudes (adulterações no medidor ou desvios), erros de leitura, medição e faturamento (ANEEL, 2020).

O gráfico com a evolução das perdas de energia de 2008 a 2019 sobre a energia injetada, apresentado na Figura 1, demonstra que esses índices se mantiveram quase constantes, tendo uma pequena elevação. Portanto, em um

período de 11 anos, mesmo com a grande exigência dos órgãos reguladores, pouco foi feito pelas empresas distribuidoras de energia elétrica para reduzir as suas perdas sobre a energia injetada. “As perdas totais representaram aproximadamente 14% do mercado consumidor em 2019. Essas perdas representam mais do que o consumo de energia elétrica das regiões Norte e Centro-Oeste em 2018.” (ANEEL, 2020).

Figura 1 - Perdas sobre a Energia Injetada (2008-2019)



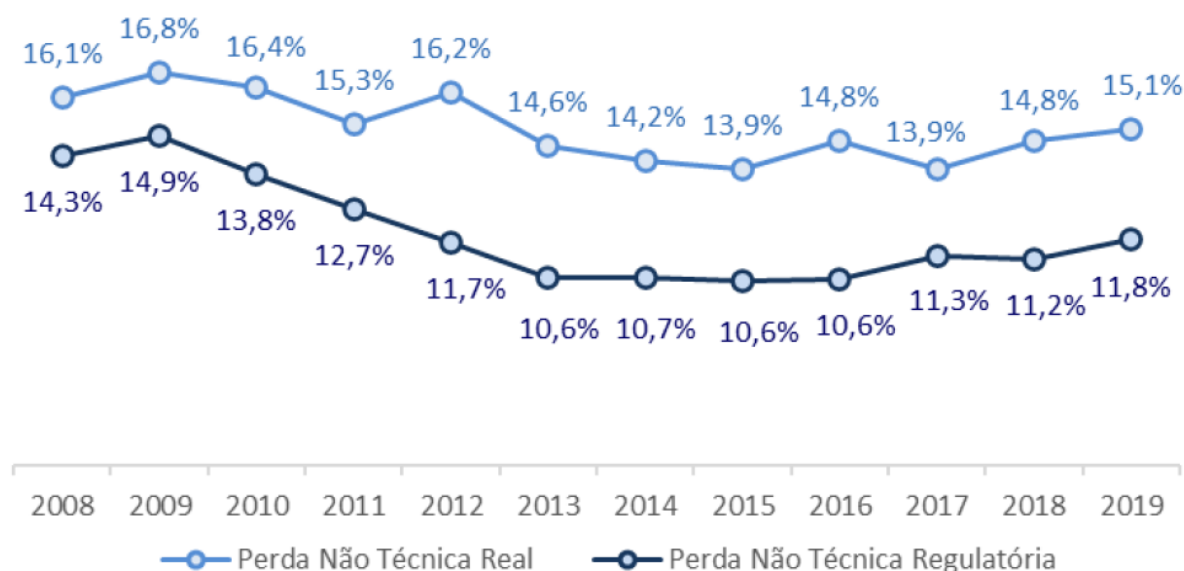
Fonte: ANEEL (2020).

As perdas totais são recompensadas na tarifa de energia elétrica por meio dos custos de compras de energia previstos nos contratos de concessão das empresas distribuidoras de energia elétrica com a agência reguladora. Como essa recompensa possui um limite regulatório estipulado pelos órgãos reguladores, vale também ressaltar a diferenciação em perdas não técnicas reais ou regulatórios. “Valores regulatórios são aqueles que são reconhecidos na tarifa de energia, enquanto os valores reais são os que efetivamente ocorrem” (ANEEL, 2020). Essa diferenciação foi implementada pela ANEEL visando incentivar que as empresas busquem reduzir seus índices de perdas não técnicas, pois não são mais repassados às tarifas de energia elétrica toda a parcela referente aos valores reais, mas apenas aqueles referentes aos valores regulatórios, sendo desconsiderado desses valores possíveis ineficiências ou negligências por meio da empresa. Sendo assim, “a diferença dos custos entre o valor regulatório e o real é de responsabilidade da concessionária” (ANEEL, 2020).

Analisando a Figura 2, é possível afirmar que as perdas não técnicas regulatórias sobre baixa tensão faturado tiveram uma baixa considerável de 2,5%, por outro lado, os valores de perdas não técnicas reais reduziram apenas 1% no período

de 11 anos analisado, do ano de 2008 até 2019. “Como boa parte das perdas não técnicas ocorre no mercado de baixa tensão faturado, a ANEEL homologa as perdas não técnicas sobre esse mercado, que é inferior ao da energia injetada, utilizado como denominador das perdas técnicas” (ANEEL, 2020).

Figura 2 - Perdas Não Técnicas Reais e Regulatória sobre Baixa Tensão Faturado



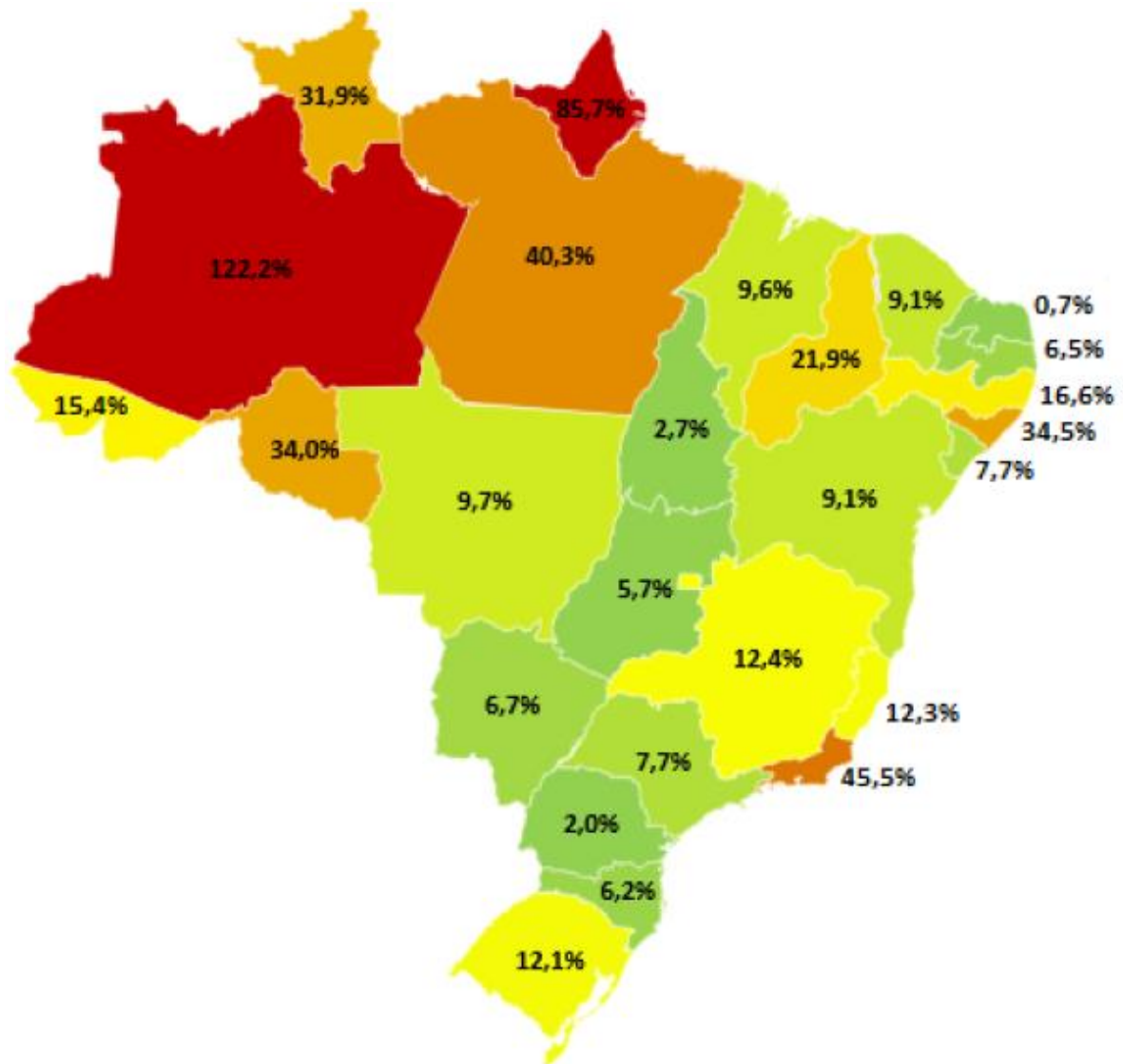
Fonte: ANEEL (2020).

“Os níveis de perdas não técnicas dependem da gestão das concessionárias, das características socioeconômicas e de aspectos comportamentais existentes em cada área de concessão” (ANEEL, 2020). Levando em consideração as características socioeconômicas de uma região, conclui-se que áreas de invasão e demais localidades sem licenciamento ambiental são os locais com maior incidência de ligações clandestinas. Definidas pela agência reguladora como Área com Severa Restrição à Operação (ASRO), esses locais se caracterizam por tratar-se de áreas com índices de desenvolvimento socioeconômico inferiores e maior incidência de violência, impedindo a atuação das equipes de fiscalizações das concessionárias de energia elétrica, desse modo os percentuais de perdas não técnicas de energia elétrica tendem a ser elevados.

Os percentuais de perdas não técnicas reais sobre o mercado de baixa tensão faturado são apresentados na Figura 3. Destacam-se negativamente, com valores de perdas superiores a 30%, os estados de Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia e

Roraima na região Norte, Alagoas na região Nordeste e o Rio de Janeiro na região Sudeste.

Figura 3 - Perdas Não Técnicas Reais – Mapa Brasil (2019)



Fonte: ANEEL (2020).

Outro fator que deve ser levado em consideração é a economia, pois uma variação brusca desta pode acarretar em um aumento da inadimplência no pagamento das faturas de energia elétrica, podendo essa inadimplência a longo prazo acarretar na suspensão de fornecimento de energia elétrica. Com isso, aumentam as possibilidades de ligações clandestinas ou adulterações em medidores de energia elétrica almejando a redução nos valores pagos pelos consumidores com o consumo de energia elétrica.

Ao analisar o impacto das perdas na tarifa de energia elétrica, a ANEEL (2020) relata um custo de aproximadamente R\$ 5,3 bilhões ao ano com as perdas não técnicas regulatórias no Brasil no ano de 2019, calculadas conforme metodologia ANEEL, que representa aos consumidores cerca de 3% do valor da tarifa de energia elétrica.

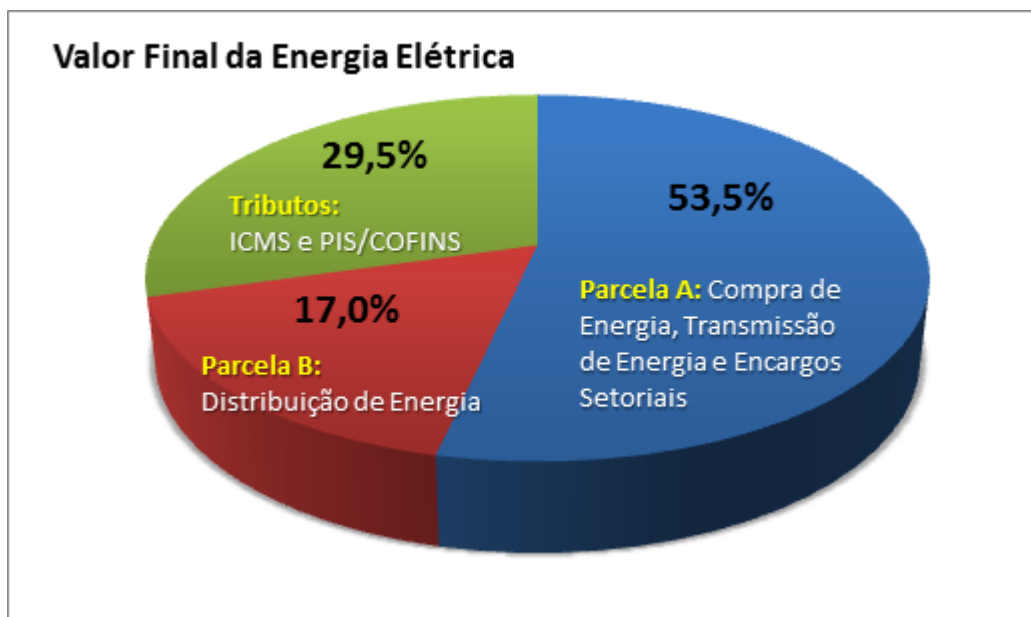
A redução das perdas pelas distribuidoras, segundo ANEEL (2020), deve ser de interesse dos consumidores, pois essas trazem impactos financeiros e o consumidor regular arca parcialmente pelo custo gerado pela fraude e furto de energia. Por fim, essa redução promoveria uma melhora na qualidade da energia elétrica disponibilizada ao consumidor pela concessionária de distribuição de energia elétrica, tendo em conta o maior controle sobre a real carga instalada nas redes de distribuição, e também ocasionaria uma redução dos valores regulatórios repassados aos consumidores.

### 2.1.2 Tarifação de energia elétrica no Brasil

A tarifação de energia elétrica no Brasil é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), baseado em fatores técnicos e fatores econômicos. O objetivo da agência reguladora é garantir que o consumidor final receba o serviço de fornecimento de energia elétrica com continuidade e qualidade, pagando uma tarifa adequada de modo a permitir que as empresas do setor elétrico possam desenvolver-se visando melhorar a qualidade do serviço prestado, além de cobrir custos operacionais e investimentos necessários. Conforme Asevedo (2011), a agência reguladora existe para garantir que as tarifas sejam justas para o consumidor final e concebidas apenas pelos custos que se relacionam efetivamente com os serviços prestados.

O modelo tarifário brasileiro segue as práticas do modelo de regulação por incentivo, ou seja, as empresas distribuidoras de energia elétrica são estimuladas a alcançar metas estabelecidas pela agência reguladora para atingir resultados eficientes. A tarifa de energia elétrica é calculada pela ANEEL através do reposicionamento tarifário, composto pela soma da Parcela A, Parcela B e os tributos, conforme Figura 4.

Figura 4 – Composição da Tarifa de Energia Elétrica



Fonte: ANEEL (2016).

Responsável por 29,5% do valor final da fatura de energia elétrica, conforme ANEEL (2016), os encargos setoriais e os tributos são instituídos por leis, ou seja, não são criados pela ANEEL. Desses tributos alguns incidem somente sobre o custo da distribuição, enquanto outros estão embutidos nos custos de geração e de transmissão. Portanto, o reposicionamento tarifário, utilizado para fins de cálculos pela ANEEL, é dividido em Parcela A, que representa os custos não-gerenciáveis, e em Parcela B, definida pelos custos gerenciáveis. “A parcela referente aos custos com distribuição, ou seja, o custo para manter os ativos e operar todo o sistema de distribuição representa apenas 17% dos custos das tarifas.” (ANEEL, 2016). O restante da fatura (53,5%) é composto pelos custos com compra e transmissão de energia, além de encargos setoriais.

As despesas com compra de energia elétrica possuem um custo significativo e estão alocadas na Parcela A, sendo repassadas integralmente na tarifa final. Levando em consideração que as concessionárias de distribuição de energia elétrica devem comprar um valor capaz de suprir toda a energia demandada que será consumida, é possível afirmar que nessa totalidade estão inclusos tanto a energia consumida faturada, como também a não-faturada. Portanto, os consumidores regulares assumem os custos referentes aos consumidores irregulares, ou seja, pagam na tarifa final os valores referentes as perdas não técnicas. “É papel do regulador construir

mecanismos para que a responsabilidade sobre o problema seja dividido pela sociedade e distribuidoras.” (ASEVEDO, 2011).

Ao analisar a Parcela B, segundo a ANEEL (2020), os valores das perdas não técnicas inclusos nas tarifas representaram, aproximadamente, 10,3% dessa parcela, na média Brasil em 2019. Esse valor é considerado alto, por isso a agência reguladora incentiva ações das distribuidoras de energia elétrica visando a redução desse percentual. “Quando uma distribuidora recupera o consumo irregular, os montantes faturados são incorporados no mercado, de modo que os custos passam a ser rateados com os demais consumidores, o que diminui a tarifa de energia.” (ANEEL, 2020).

### 2.1.3 Redes elétricas inteligentes e os medidores convencionais de grandezas elétricas

Conforme Resolução Normativa nº 414 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2010), “a distribuidora de energia elétrica é obrigada a instalar equipamentos de medição nas unidades consumidoras” (ANEEL, 2010). Portanto, a não ser por algumas exceções, em todo local que consome energia elétrica é obrigatório a instalação de um medidor de energia elétrica pela concessionária de distribuição de energia elétrica de modo a verificar a energia consumida para gerar a fatura de energia elétrica. Em relação a esses medidores, atualmente são utilizados do tipo eletromecânico ou do tipo eletrônico e exibem o consumo de energia elétrica por meio da potência consumida em um determinado tempo, ou seja, em *quilowatt-hora* (kWh).

O funcionamento dos medidores eletromecânicos é baseado no princípio de Ferraris, isto é, a corrente elétrica que percorre o condutor, na presença de um campo magnético externo, é submetida a uma força. Conforme descreve Velasco (2007), através da corrente que passa pelas bobinas é induzida uma corrente no disco do medidor eletromecânico, sendo que a interação entre o disco e o campo magnético resultante faz com que o disco gire em uma determinada velocidade, assim determina-se a energia elétrica consumida. Já os medidores eletrônicos efetuam a medição por meio de circuitos eletrônicos mostrando os valores medidos através de *displays* e um indicador luminoso (LED) cintilante que informa a atividade do consumo.

Conforme Pelegrini e Vale (2014), às redes elétricas inteligentes (REI), também conhecidas como *Smart Grid*, representam a evolução das redes elétricas atuais, proporcionando aumento na eficiência e na qualidade de fornecimento de energia elétrica aos consumidores, além de resultar em diminuição de custos. Baseado na utilização de tecnologia de automação, computação e comunicações para monitoração e controle da rede, Falcão (2010) corrobora que essa tecnologia permitirá que as concessionárias de distribuição de energia elétrica implementem estratégias de otimização e controle da rede de energia elétrica.

A transformação da rede de energia elétrica atual para a *Smart Grid* deverá acontecer de forma incremental: novas tecnologias de automação, computação e comunicações serão introduzidos em partes da rede, formando bolsões de sub-redes com as características da *Smart Grid*, as quais conviverão de forma harmoniosa com rede legada (FALCÃO, 2010).

Com o avanço tecnológico e a facilidade de acesso à internet, as pessoas passaram a ter maior interesse e controle sobre suas despesas, por exemplo, os gastos com tarifas de energia elétrica, água, gás ou outros. Segundo relata Pelegrini e Vale (2014), essa maior exigência dos consumidores por maior qualidade do fornecimento de energia elétrica é um dos aspectos mais importantes no segmento, tornando esse um grande motivador para implementação das redes elétricas inteligentes, haja vista que as empresas de energia elétrica no Brasil são avaliadas pelos órgãos reguladores através de metas baseadas em indicadores de qualidade de fornecimento.

“A eficiência comercial e energética seria obtida por meio da redução de perdas técnicas e comerciais, melhoria na qualidade da energia ofertada ao consumidor e gestão do horário de consumo de energia pelo consumidor” (RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013). Além disso, outro incentivo para a instalação dessa tecnologia por meio das concessionárias é a oportunidade de recuperação de receita e maior combate às perdas não técnicas, que apresentam altos índices no território brasileiro.

A substituição dos medidores convencionais por medidores inteligentes (*Smart Meter*) surge no sistema de distribuição como principal ferramenta para redução das incertezas de medição, uma das principais parcelas das perdas não técnicas, porém um medidor com funções de controle e circuitos eletrônicos aprimorados pode ser até dez vezes mais caro que um medidor convencional (PEREIRA; WEISS, 2017). Desse modo, cientes que a grande maioria dos medidores instalados no setor elétrico brasileiro são convencionais e estão em bom estado de funcionamento, as empresas



não investem na substituição desses medidores convencionais, haja vista que esse investimento deverá ser todo custeado pela distribuidora.

Falcão (2010) destaca que os medidores inteligentes acrescentam uma série de novas funcionalidades no sistema de faturamento com a possibilidade de efetuar leitura automática da demanda de consumidores, conexão e desconexão de consumidores, disponibilização de informação do preço da energia, etc.

Para as distribuidoras, alguns dos possíveis benefícios seriam a redução de custos operacionais devido à possibilidade de realizar leituras, cortes e religações de forma remota; a maior precisão para identificar eventuais problemas na rede tais como falhas, interrupções, quedas de fio e furto; a redução dos gastos relativos ao pagamento de multas por interrupção e reembolsos por equipamentos elétricos danificados devido a falhas; a redução das perdas não técnicas; a prestação de novos serviços, dentre outros (PEREIRA; WEISS, 2017).

A modernização do setor elétrico brasileiro é uma realidade, porém para isso, muitas empresas do setor buscam opções de baixo custo e de fácil implementação que se tornem viáveis para empresa e consumidor. Segundo Rivera, Esposito e Teixeira (2013), os custos para implantação das redes elétricas inteligentes são iguais ou superiores aos benefícios, portanto, para que os benefícios sejam percebidos, seriam necessários ajustes no sistema regulatório atual para equacionar os incentivos concedidos.

Portanto, conforme proposto nesse trabalho, surge como opção de baixo custo para as empresas de distribuição de energia elétrica a alternativa de implementar dispositivos adicionais com funções de controle aprimorados. Com isso, almeja-se proporcionar a essas empresas o monitoramento dos equipamentos de medição existentes sem a necessidade de substituição dos medidores convencionais instalados.

#### 2.1.4 Medidas adotadas no combate as perdas não técnicas

Em geral nas empresas de distribuição de energia elétrica do território brasileiro, o principal método utilizado para combater as perdas não técnicas são as fiscalizações realizadas por equipes próprias ou terceirizadas com o intuito de inspecionar e regularizar sistemas de medições adulterados. Porém, levando em consideração o elevado número de locais em situações irregulares, a atuação dessas

equipes acaba não sendo o suficiente para reduzir para porcentagens mínimas as perdas não técnicas de energia elétrica.

Destaca-se no processo de fiscalização das concessionárias de energia elétrica a utilização de medição fiscalizadora com o intuito de identificar locais com fraudes nas medições de energia elétrica. Esse medidor fiscal deve ser instalado de maneira provisória durante determinado período junto ao poste da distribuidora local com o objetivo de efetuar comparação das grandezas elétricas medidas nas instalações da entrada de energia elétrica do imóvel inspecionado com a real energia consumida derivada da rede de distribuição local. Dentre os métodos aplicados, esse evidencia-se pela assertividade, haja vista a comprovação de fraude no local analisado caso os valores gravados na medição fiscal diferirem das grandezas elétricas de consumo registradas no medidor convencional dessa unidade consumidora.

Conforme descrito anteriormente, as áreas com maior incidência de furtos de energia elétrica são em locais ocupados por habitantes com reduzido desenvolvimento socioeconômico. Tendo em conta isso, foi criada em 2002, pela Lei nº 10.438, a Tarifa Social de Energia Elétrica (TSEE) que concede descontos para consumidores enquadrados como subclasse residencial de baixa renda, beneficiando os mesmos com isenção em alguns impostos, além da aplicação de descontos sobre os níveis de consumo mensal de energia elétrica. Dentre outros requisitos, para se enquadrar nesse modelo de tarifação, o consumidor deve ter renda familiar mensal per capita menor ou igual a meio salário mínimo nacional. A aplicação desse tipo de tarifa é um dos métodos utilizados pelas empresas de distribuição de energia elétrica para redução das perdas não técnicas, visando estimular a regularização do fornecimento de energia elétrica ofertando um valor reduzido de tarifa de energia elétrica e mais atrativo financeiramente para os habitantes que compõem essa classe econômica.

Além disso, as empresas do setor elétrico estão investindo em alterações das configurações atuais das redes de distribuição de energia elétrica para inibir as ligações clandestinas. Destaca-se como principal método aplicado nesse sentido a substituição das redes convencionais de distribuição por redes blindadas, impedindo a realização das ligações irregulares, caracterizadas por conexões diretas a rede de distribuição de energia elétrica sem a anuência da empresa responsável. A pioneira na aplicação dessa solução em território brasileiro foi a LIGHT Serviços de Eletricidade S/A que aplicou esse modelo de rede blindada em alguns locais da sua área de

concessão, conforme reportagem do jornal EXTRA (2013). Nesse caso, o medidor eletrônico é instalado em uma caixa blindada no poste junto a rede de distribuição, mantendo no imóvel do cliente apenas um visor para acompanhamento e controle do consumo. Em caso de tentativa de abertura de uma dessas caixas de medição, toda a rede de energia elétrica do local é desligada.

Outro método utilizado em algumas concessionárias de energia elétrica do mercado internacional com problemas de furtos de energia foi a aplicação de medidores com sistema de pré-pagamento, algo semelhante aos modelos propostos pelas empresas de telefonia móvel. O consumidor deve comprar créditos de energia elétrica antes do uso e deverá recarregar conforme o seu consumo. Conforme estudo desenvolvido por Huback (2018), países como Colômbia, Jamaica e Filipinas possuem experiências bem sucedidas na aplicação desse método. O ônus da aplicação dessa opção é a necessidade de substituição dos medidores convencionais existentes por novos medidores com esse sistema pré-pago.

O estudo concebido por Huback (2018), destaca o método de implementação de instalação de medição elétrica em transformadores do sistema de distribuição. Com isso, possibilita que as concessionárias de distribuição de energia elétrica identifiquem com precisão os locais com maior índice de perdas não técnicas. “A distribuidora colombiana Codensa promoveu essa medida, que levou cinco anos para ser concluída, permitindo a identificação de áreas prioritárias no combate às perdas.” (HUBACK, 2018). Além disso, a empresa colombiana efetuou a troca dos medidores convencionais por medidores inteligentes em casos de reincidência, com isso possibilitou uma rápida identificação de furtos ou fraudes, gerando nova multa para o consumidor reincidente. A aplicação de multas em consonância com a identificação de usuários reincidentes é um método atrativo na inibição do avanço das perdas não técnicas, haja vista que o consumidor terá custos financeiros com as multas, além de ter que ressarcir o investimento feito para adulteração do sistema de medição.

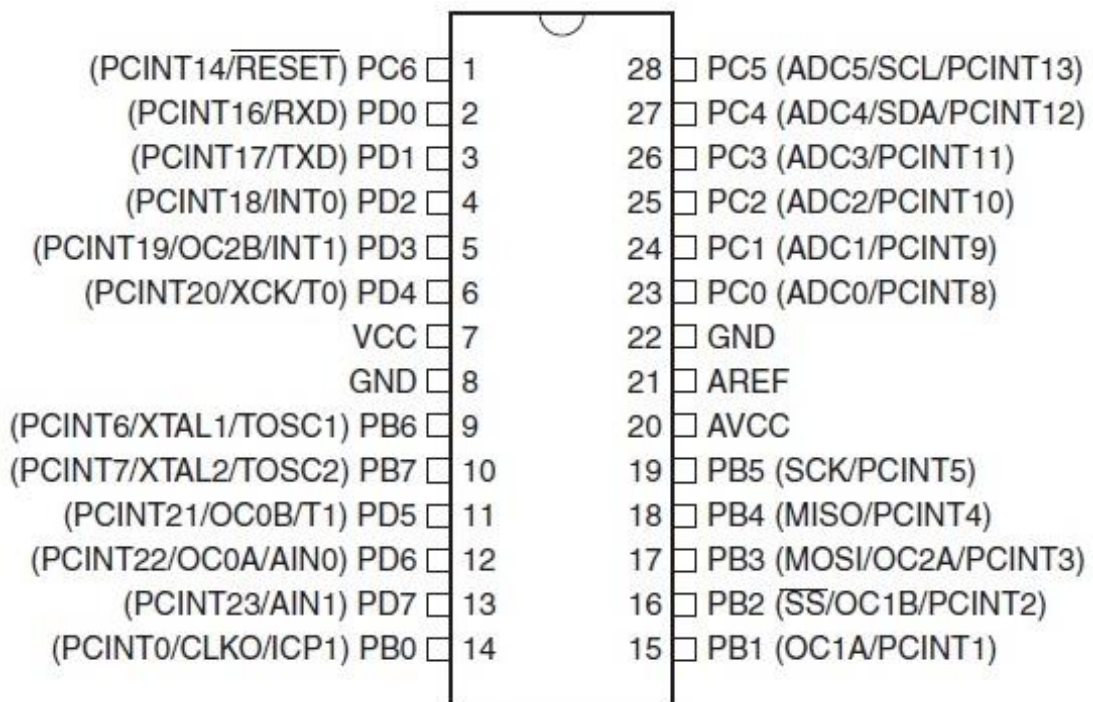
## **2.2 Dispositivos utilizados na implementação do projeto**

Nessa seção do trabalho será efetuada abordagem sobre os equipamentos aplicados para desenvolvimento da proposta do trabalho, abordando as características técnicas do microcontrolador utilizado e demais periféricos.

### 2.2.1 Microcontroladores

Como microcontrolador principal nesse projeto, será utilizado o modelo ATmega328P, da marca ATMEL. Esse microcontrolador pertence à família de 8 bits CMOS baseado na arquitetura AVR e será utilizado por meio de hardwares da plataforma Arduino. Possui uma memória flash de 32 kB e 23 entradas/saídas digitais programáveis de uso geral, sendo 6 dessas como opções de configuração como entradas analógicas por meio de conversor analógico/digital interno, conforme esquema interno apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Microcontrolador ATmega328P



Fonte: Microchip Technology Inc<sup>1</sup>.

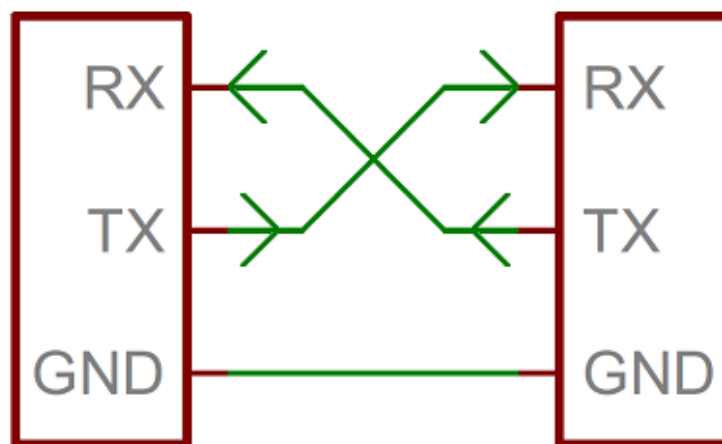
Entre os protocolos de comunicação serial entre microcontrolador e periféricos destacam-se três principais métodos: UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I2C (*Inter Integrated Circuit*). Sendo os dois primeiros métodos de interesse nesse projeto.

O protocolo UART é assíncrono, sem nenhum sinal de *clock*, e utiliza duas linhas de transmissão para comunicação, uma chamada de transmissor (Tx) e outra

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.microchip.com/ATmega328P>>. Acesso em 10 nov. 2020.

de receptor (Rx), conforme Figura 6. Permite a troca de informações de maneira não simultânea, ou seja, por meio de comunicação série, enviando *bit a bit* ao longo do tempo. Entre os principais parâmetros desse método destaca-se o *baud-rate*, que pode ser definida como a taxa de velocidade de envio e recepção de dados entre os dispositivos e deve ser igual entre ambos. Além disso, vale destacar a adição de bits extras de início e fim a cada *byte*, para facilitar a sincronização entre receptor e emissor.

Figura 6 – Protocolo UART



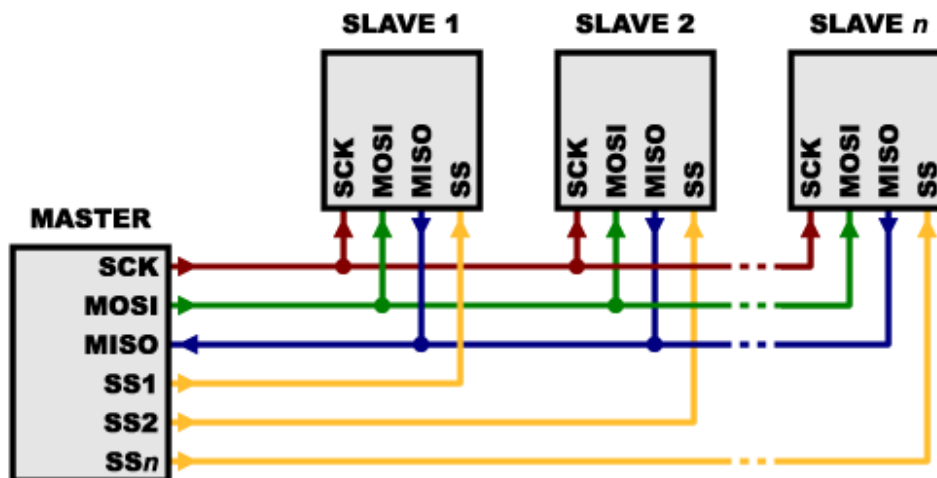
Fonte: SparkFun Electronics<sup>2</sup>.

Diferente do protocolo UART, o protocolo SPI é síncrono, ou seja, utiliza *clock* para sincronizar a comunicação entre ambos os dispositivos. O dispositivo que gera o sinal de *clock* é definido como mestre (*master*) e os demais são definidos como escravos (*slaves*). Vale ressaltar que nesse protocolo existe apenas um dispositivo mestre, porém podem existir vários dispositivos escravos, permitindo o envio de informações de um transmissor para vários receptores.

Conforme Figura 7, os pinos comuns nesse protocolo são SCK (*Serial Clock*), utilizado para geração de sinal de *clock*, MOSI (*Master Out, Slave In*), utilizado como linha de dados de envio entre mestre e escravo, e MISO (*Master In, Slave Out*), utilizado para envio de dados entre escravo e mestre. Além disso, em casos de circuitos com múltiplos dispositivos escravos, é também utilizado o pino SS (*Slave Select*), aplicado para selecionar com qual dispositivo escravo o dispositivo mestre deseja se comunicar.

<sup>2</sup> Disponível em: < <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication>>. Acesso em 15 ago. 2021

Figura 7 - Comunicação SPI



Fonte: SparkFun Electronics<sup>3</sup>.

### 2.2.2 Aquisição de dados com transdutores de corrente elétrica

Os transdutores de corrente elétrica são comumente utilizados para a aquisição dos valores de corrente elétrica em um determinado circuito elétrico. Para o desenvolvimento desse trabalho, serão utilizados transdutores da marca YHDC, modelo SCT-013-020, conforme Figura 8.

Figura 8 - Transdutor de corrente elétrica YHDC modelo SCT-013-020



Fonte: YHDC<sup>4</sup>.

A vantagem desse transdutor é o principal motivo para a sua aplicação neste projeto é o fato de não precisar de contato elétrico com o circuito para medir a grandeza desejada. Esse tipo de transdutor é semelhante a um alicate amperímetro, ou seja, não precisa de contato elétrico com o circuito para medição da amplitude

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>>. Acesso em 05 dez. 2020

<sup>4</sup> Disponível em: <<http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html>>. Acesso em 30 set. 2020.

desejada, basta apenas acoplar o dispositivo ao redor do condutor de energia elétrica, fazendo toda a medição de maneira não invasiva.

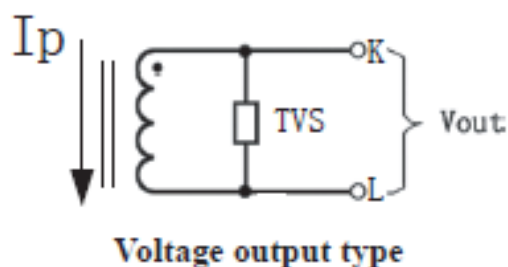
O funcionamento do transdutor utilizado é baseado na Lei de Ampère, que afirma que todo condutor percorrido por uma corrente elétrica induz a formação de um campo magnético ao seu redor de valor proporcional à corrente, e na Lei de Faraday, que declara que um campo magnético variante no tempo induz numa espira uma tensão e, conseqüentemente, uma corrente elétrica de valor proporcional à intensidade do campo magnético.

O transdutor de corrente elétrica aplicado, comumente chamado de transformador de corrente, possui uma bobina interna e é do tipo núcleo dividido. Quando o mesmo é colocado ao redor do condutor energizado é induzida nos seus pólos uma corrente elétrica de valor proporcional a que percorre o condutor ao qual deseja-se medir a corrente elétrica.

O modelo SCT-013-020 utilizado possibilita a medição de 0 a 20A de corrente alternada na entrada do transdutor com exatidão não linear de  $\pm 3\%$ , fornecendo equivalência de 0 a 1V na saída, permitindo que por meio dessa seja possível mensurar a corrente elétrica no condutor energizado.

Ciente que o funcionamento do dispositivo é o de um transformador de corrente, temos na especificação técnica deste que um valor de corrente elétrica de 20 A na bobina primária ( $I_p$ ) será equivalente a 1 V na bobina secundária ( $V_{OUT}$ ), conforme esquemático apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Esquemático SCT-013-020



Fonte: YHDC<sup>5</sup>.

Percebe-se que o transdutor já possui um circuito resistivo interno em paralelo com os pólos de saída da bobina secundária gerando o sinal de saída em níveis de

<sup>5</sup> Disponível em: <<http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html>>. Acesso em 30 set. 2020.

tensão alternada. Essa é uma vantagem desse modelo de transdutor pois fornece o sinal de saída na grandeza desejada, tendo em conta que o microcontrolador Arduino utilizado no desenvolvimento do projeto realiza a leitura de níveis de tensão nas suas entradas analógicas.

Conforme mencionado, o transdutor utilizado permite medir amplitudes de corrente elétrica de até 20A, sendo esse o valor eficaz ( $I_{RMSp}$ ), porém para cálculo desejamos o valor de corrente de pico ( $I_{PICOp}$ ) na bobina primária:

$$I_{PICOp} = \sqrt{2} * I_{RMSp} = 28,28 A \quad (3.1)$$

Conforme *datasheet* do SCT-013-020 disponibilizado no site do fabricante, a relação de espiras da bobina primária com a bobina secundária desse transformador é 0,001 ( $N_1/N_2$ ). Portanto, é possível determinar a corrente na bobina secundária:

$$I_{PICO_S} = \frac{N_1}{N_2} * I_{PICOp} = 0,02828 A \quad (3.2)$$

Convertendo esse valor de pico da corrente elétrica ( $I_{PICO_S}$ ) na bobina secundária para o valor eficaz ( $I_{RMS_S}$ ), temos:

$$I_{RMS_S} = \frac{I_{PICO_S}}{\sqrt{2}} = 0,02 A \quad (3.3)$$

Portanto, a corrente eficaz máxima suportada na bobina secundária do transformador de corrente será de 0,02A. Mantendo na mesma relação, podemos simplificar e afirmar que a cada 1A que circula no condutor elétrico será equivalente a 0,001A na bobina secundária.

### 2.2.3 Transmissão de dados via radiofrequência

A técnica de comunicação sem fio (*wireless*) por radiofrequência é um dos métodos mais utilizados atualmente, não só por seu baixo custo para instalação da estrutura como também pela flexibilidade para o envio dos dados remotamente. “Seu atrativo é que seus serviços podem ser oferecidos em lugares que não possuem ambientes naturais favoráveis à implementação de cabeamento, como lugares pouco urbanizados” (RAMOS, 2013).

Os módulos rádio transceptores permitem a transmissão e recepção de dados via radiofrequência e geralmente são utilizados em aplicações que necessitam de



comunicações sem fio, proporcionando a criação de um sistema confiável e seguro para recebimento e envio de dados.

No projeto desenvolvido, será utilizado o *nRF24L01 Single Chip 2.4 GHz Radio Transceiver*, da marca *Nordic Semiconductors*, conforme Figura 10.

Figura 10 - Módulo Transceptor nRF24L01



Fonte: Sparkfun<sup>6</sup>.

Esse dispositivo é utilizado junto a microcontroladores criando redes sem fio para troca de dados entre componentes, seja apenas entre dois pares ou entre um componente principal e vários subalternos. Além da versatilidade de transmitir e receber, destaca-se nesse módulo como principais características o baixo consumo de energia, o alcance de até 100 metros sem interferências em locais abertos e a operação na faixa de 2,4 GHz (faixa que é livre, não sendo necessário registro junto a órgãos reguladores de comunicação).

Vale também ressaltar que o módulo rádio transceptor aplicado nesse projeto utiliza o protocolo SPI para comunicação com os microcontroladores. Destaca-se também como grande vantagem desses dispositivos a comunicação direta entre ambos, ou seja, não sendo necessário roteadores, protocolos de internet ou outros.

A alimentação desse módulo é feita em 3.3V diretamente do microcontrolador utilizado. Também aceita e envia sinais em níveis de tensão compatíveis com as entradas digitais do microcontrolador Arduino, não sendo necessário desenvolvimento de circuitos de condicionamento adicionais.

## 2.2.4 Transmissão de dados via GSM/GPRS

A tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communications*) é um sistema para comunicação móvel que efetua a transmissão de maneira digital. A arquitetura

---

<sup>6</sup> Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/690>>. Acesso em 25 out. 2020.

desse sistema é baseada no terminal do utilizador chamado de estação móvel, sendo esta composta por um chip SIM (*Subscriber Identity Module*) que permite identificar de maneira única cada usuário.

Já a tecnologia GPRS (*General Packet Radio Services*) surgiu para facilitar a comunicação e o acesso a redes, tendo como objetivo o aumento das taxas de transferências de dados entre os aparelhos móveis. Destaca-se como vantagem dessa tecnologia a ampla cobertura de rede e a possibilidade de utilização de dados simultâneos no mesmo canal, se conectando de maneira imediata.

“Um sistema de comunicação eletrônica flexível requer baixa infraestrutura e oferece a liberdade de alteração da estrutura montada sem prejuízo na comunicação e exigindo baixo custo” (RAMOS, 2013). Levando em consideração a necessidade de confiabilidade no envio dos dados e de baixo custo para instalação da estrutura, dentre as alternativas existentes para comunicação, será utilizado o Módulo GSM/GPRS SIM800L da marca *SIMCom*, conforme Figura 11.

Figura 11 - Módulo GSM/GPRS SIM800L



Fonte: SIMCOM Wireless Solutions<sup>7</sup>.

A alimentação do módulo GSM/GPRS SIM800L é na faixa de tensão de operação entre 3,5 a 4,2 V<sub>DC</sub> com elevado consumo de corrente elétrica no envio de dados e sintonização.

Aplicando esse módulo em consonância com o microcontrolador utilizado, através de comunicação UART, permite o envio de dados por meio de SMS (*Short Message Service*), garantindo uma comunicação segura.

Esse módulo utiliza a linguagem do conjunto de comandos AT (*Attention*), também conhecido por comando Hayes, em referência ao seu criador Dennis Hayes. Esse conjunto é uma linguagem de comandos com uma série de cadeias de textos

---

<sup>7</sup> Disponível em: <simcom.ee>. Acesso em 05 dez. 2020.

curtas, sendo que com a combinação dessas séries é possível efetuar operações de parametrização da conexão, ligações, discagens e demais funções.

A escolha desse módulo para a aplicação no projeto visa a versatilidade para contato entre equipamentos, haja vista que para comunicação basta apenas de chip SIM de operadora local e ter disponibilidade de sinal 2G de telefone celular, que é algo disponível na maioria dos locais urbanos.

### 2.2.5 Conexão à rede local via módulo ethernet

A conexão à rede local com fio (LANs), tecnologia chamada de *ethernet*, é baseada no envio de pacotes com estruturas de transmissão de dados. Por meio deste permite a conexão do microcontrolador a internet e a rede local, possibilitando o armazenamento de informações em bancos de dados e a interação com servidores WEB.

Para a conexão à rede local do sistema desenvolvido nesse projeto, será utilizado o módulo ethernet ENC28J60, conforme Figura 12, conectado via protocolo SPI ao microcontrolador utilizado. Esse módulo tem como principal elemento o CI ENC28J60 da *MicroChip* que é um controlador ethernet que opera via protocolo SPI. É alimentado com tensão de operação de 3,3V, possui velocidade de conexão de 10 a 100 Mb, suporta os protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) e possui o conector de rede do tipo RJ45 da marca *HanRun*.

Figura 12 - Módulo Ethernet ENC28J60



Fonte: Microchip<sup>8</sup>.

Para a conexão do módulo a rede de internet local, utiliza-se um cabo de rede CAT.6 conectado ao módulo ethernet ENC28J60 por meio do conector de rede tipo

---

<sup>8</sup> Disponível em: <<https://www.microchip.com/ENC28J60>>. Acesso em 05 jan. 2021

RJ45 interligando com o modem local de internet.

Para a programação do servidor WEB será utilizado a linguagem PHP (*Personal Home Page*), responsável por rodar o site do sistema de controle na rede local, e o protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), que efetua o tratamento dos pedidos e respostas entre cliente e servidor da rede local. Essa linguagem de programação é voltada para o desenvolvimento de aplicações de modo a realizar a conexão entre os servidores e a interface do usuário.

O método utilizado para a criação do servidor WEB e banco de dados do projeto será o XAMPP, sendo esse um pacote de servidores de códigos abertos, incluindo *Apache*, banco de dados *MySQL (My Structured Query Language)*, *FTP (File Transfer Protocol)* e outros que possibilitam a criação e desenvolvimento de servidores com fins de testes.

#### 2.2.6 Armazenamento de informações no banco de dados

Um banco de dados pode ser definido como um local elaborado para armazenamento de informações de maneira organizada e estruturada. Destaca-se como características do armazenamento em banco de dados a acessibilidade com facilidade as informações sempre que necessário, possibilitando ao controlador uma gestão aprimorada sobre os dados acondicionados.

Como gerenciador do banco de dados será utilizado a plataforma *MySQL*, disponível dentro da aplicação XAMPP, que utiliza a linguagem de consulta estruturada, comumente chamada de SQL (*Structure Query Language*). Por meio dessa plataforma é possível inserir, acessar e gerenciar o banco de dados.

Para o projeto desse trabalho, será utilizado um banco de dados hospedado dentro de um servidor local, onde no mesmo será criado uma tabela de controle para cada sistema de leitura, armazenando nessa tabela os dados coletados em campo, além do horário de recebimento da informação.

#### 2.2.7 Equipamento aferidor modelo CheckMeter 2.3 genX da marca MTE

O equipamento aferidor utilizado para comissionamento e comprovações práticas do projeto proposto é do modelo CheckMeter 2.3 genX da marca MTE, conforme Figura 13.

Figura 13 - CheckMeter 2.3 genX da marca MTE



Fonte: MTE Meter Test Equipment AG<sup>9</sup>.

Esse equipamento possui classe de precisão de 0,2% e é utilizado para testar medidores de energia elétrica. Por meio de conjuntos de alicates amperímetro permite medições de 10mA a 120A em escala de tensão de 46 a 300V.

O produto foi calibrado em 18/03/2021 com validade de 1 ano utilizando como padrão de referência equipamento do modelo PTS3.3C de fabricação MTE número de série 37972. Essa verificação foi realizada por empresa especializada de acordo com portaria do INMETRO nº 587/2012 e resolução 414/2010 da ANEEL.

---

<sup>9</sup> Disponível em: <<https://www.mte.ch/en/products/portable-test-equipment/reference-standards-38>>. Acesso em 17 jun. 2021

### 3 DESENVOLVIMENTO

Esse trabalho tem como propósito o desenvolvimento de projeto para implementação de um sistema que possibilite a medição das correntes elétricas permitindo o monitoramento e fiscalização da medição elétrica de unidades consumidoras visando diminuir as perdas não técnicas do sistema de distribuição de energia elétrica. Para isso serão utilizados microcontroladores da plataforma Arduino, além de transdutores de corrente, módulos ethernet, módulos transmissores de dados via radiofrequência e via SMS.

Para o desenvolvimento desse trabalho buscou-se uma abordagem metodológica qualitativa a respeito das características e processos adotados, detalhando os métodos utilizados no desenvolvimento deste para atingir os objetivos definidos, além dos procedimentos empregados na coleta e análise dos dados.

O trabalho desenvolvido utiliza definições de uma pesquisa explicativa e conceitos de pesquisa exploratória, tendo em conta os levantamentos bibliográficos utilizados para aprofundar o conhecimento, levantar dados estatísticos sobre o problema analisado e melhor compreender as causas e efeitos do fenômeno a ser estudado.

No processo de desenvolvimento foram utilizadas técnicas que, por meio de técnicas de análise de amostragens, possibilitará uma maior compreensão a respeito das informações captadas possibilitando a definição da forma de controle e ação ideal a implementar no projeto.

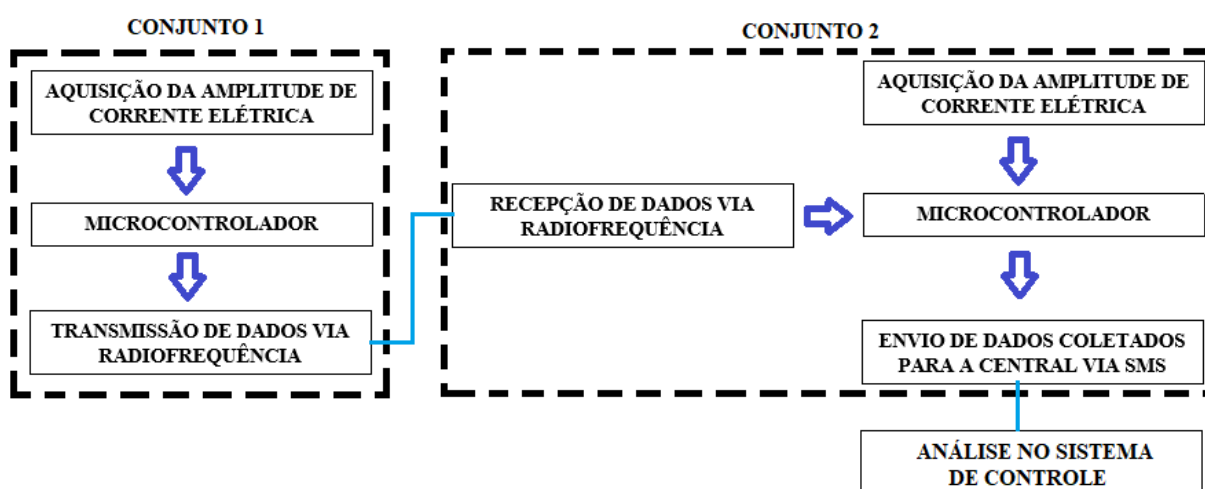
Vale também ressaltar a abordagem quantitativa na análise dos resultados coletados para quantificar e mensurar os dados almejando obter a melhor solução ao problema analisado. Visando uma análise de dados aprimorada, para mostrar os resultados de forma quantitativa, serão utilizados tabelas e gráficos, além de armazenamentos de informações em banco de dados.

Com o embasamento teórico proporcionado pela análise bibliográfica, foi possível situar-se a respeito do tema de interesse na literatura acadêmica, analisando os efeitos e razões do problema abordado, além de compreender as tecnologias já existentes a respeito desse tema. Com isso, ao definir o objeto de estudo, suas características e seus fatores determinantes, permite-se elaborar o esboço do projeto a desenvolver, tendo em vista já ter o problema de forma clara e estabelecida.

O projeto foi desenvolvido em duas sistemas, sendo um sistema de leitura e um

sistema de controle. O sistema de leitura é composto por dois conjuntos de condicionamento de dados, cujo diagrama é apresentado na Figura 14, sendo o conjunto 1 instalado acoplado no ramal de ligação da unidade consumidora e o conjunto 2 após o medidor convencional instalado na unidade. A comunicação entre esses conjuntos será feita via radiofrequência através dos módulos transceptores nRF24L01. Após o microcontrolador do conjunto 2 receber os dados adquiridos em cada conjunto, esses dados coletados serão enviados via SMS para o sistema de controle por meio dos módulos GSM/GPRS SIM800L.

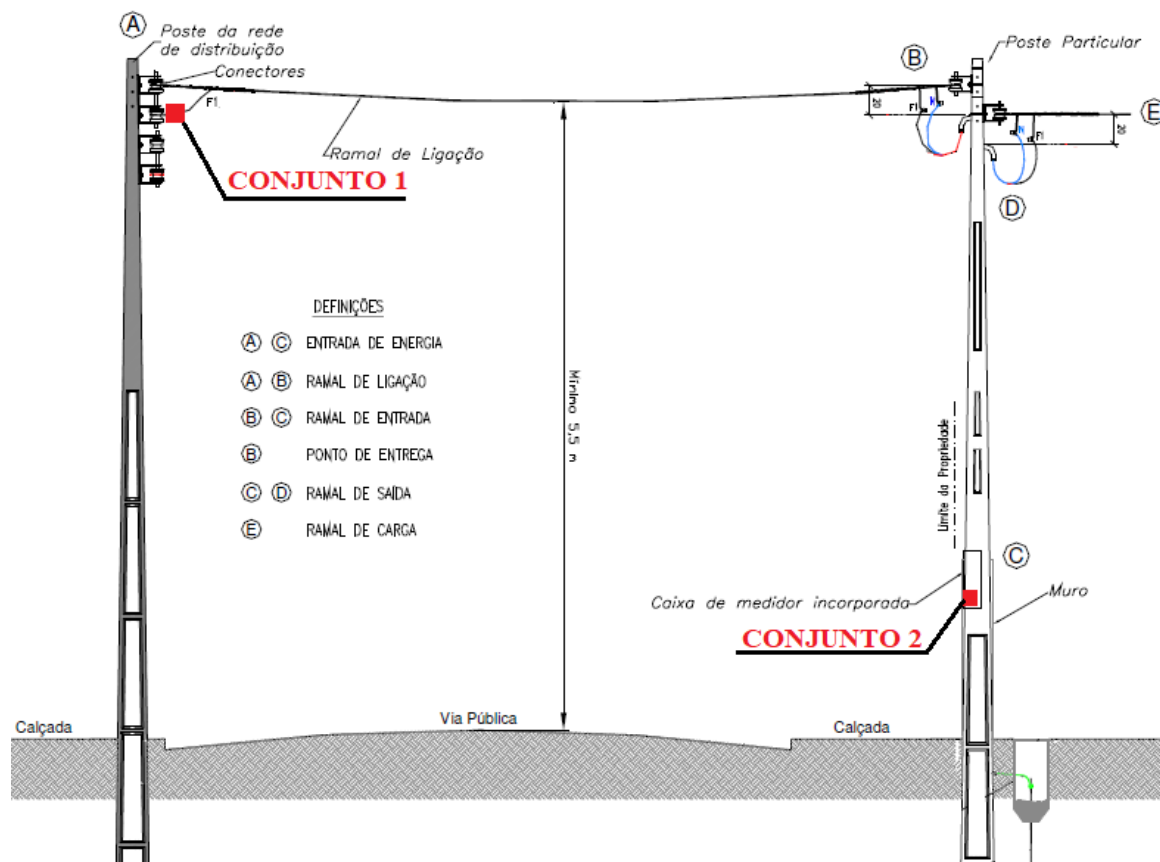
Figura 14 - Diagrama principal do sistema de leitura



Fonte: O Autor (2021).

A situação prática de aplicação do projeto desenvolvido em uma entrada de energia elétrica monofásica de uma unidade consumidora é demonstrada conforme Figura 15. No ponto A é apresentado a rede de distribuição da concessionária de energia elétrica, sendo nesse ponto derivado o ramal de ligação até o poste particular localizado no interior da propriedade da unidade consumidora, indicado como ponto B. Entre B e C é denominado de ramal de entrada, esse é o trecho de condutores que interligam o ramal de ligação até o medidor de energia elétrica localizado na caixa de medidor incorporada ao poste particular, indicada pelo ponto C. Os condutores de saída da medição são separados entre ramais de saída e de carga, sendo o primeiro indicado do ponto C ao D e o segundo pelo ponto E, que são os condutores que seguem do poste particular até o imóvel.

Figura 15 – Entrada de energia elétrica



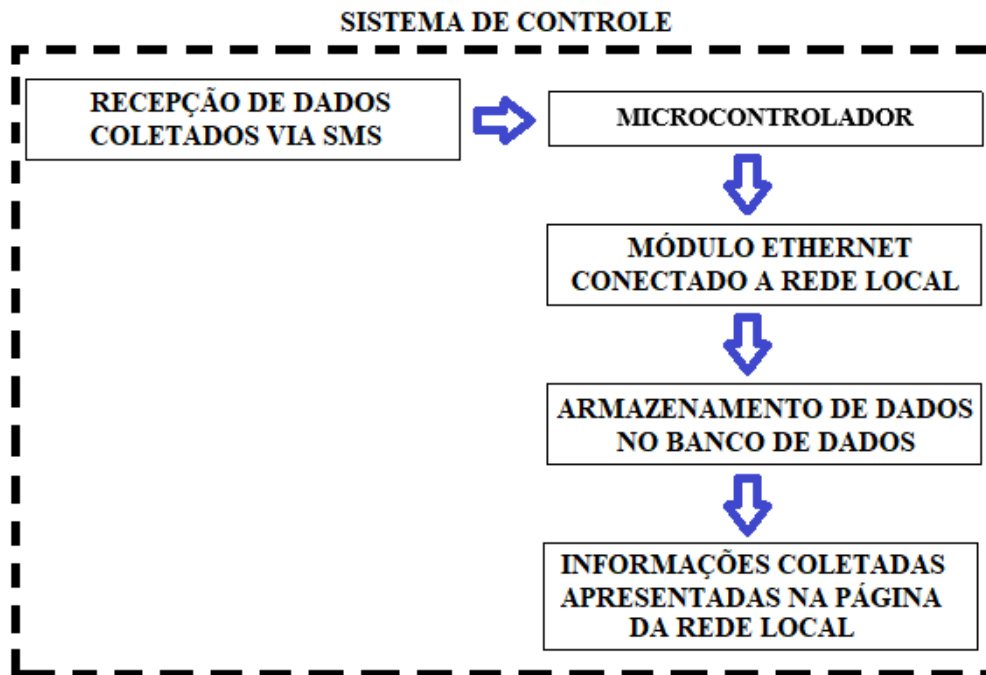
Fonte: Adaptado de CELESC (2019).

Cientes que os desvios de condutores, caracterizados como furtos de energia elétrica, são feitos no ramal de ligação e no ramal de entrada, que são as partes da entrada de energia que possuem condutores de energia elétrica não medidos, a proposta desse projeto é instalar um sistema de medição de corrente elétrica na conexão do ramal de ligação com a rede de distribuição (ponto A) e outro no ramal de saída logo após o medidor de energia elétrica (ponto C), conectando esses dois sistemas via radiofrequência para efeito comparativo dos valores adquiridos.

Após realizadas as medições, os dados serão enviados para o sistema de controle. No sistema de controle, conforme diagrama na Figura 16, os dados de cada sistema de leitura serão recebidos via SMS por meio do módulo GSM/GPRS SIM800L. Além disso, será utilizado um módulo *ethernet* para conectar a central na rede de internet local, armazenando todas as informações recebidas em um banco de dados e disponibilizando esse material coletado em uma página de servidor WEB.



Figura 16 - Diagrama do sistema de controle



Fonte: O Autor (2021).

Por meio dessa página da rede local do sistema de controle é possível verificar a situação em cada sistema de leitura (unidade consumidora analisada) e disponibilizar essas informações para as equipes de fiscalização da concessionária de distribuição de energia elétrica.

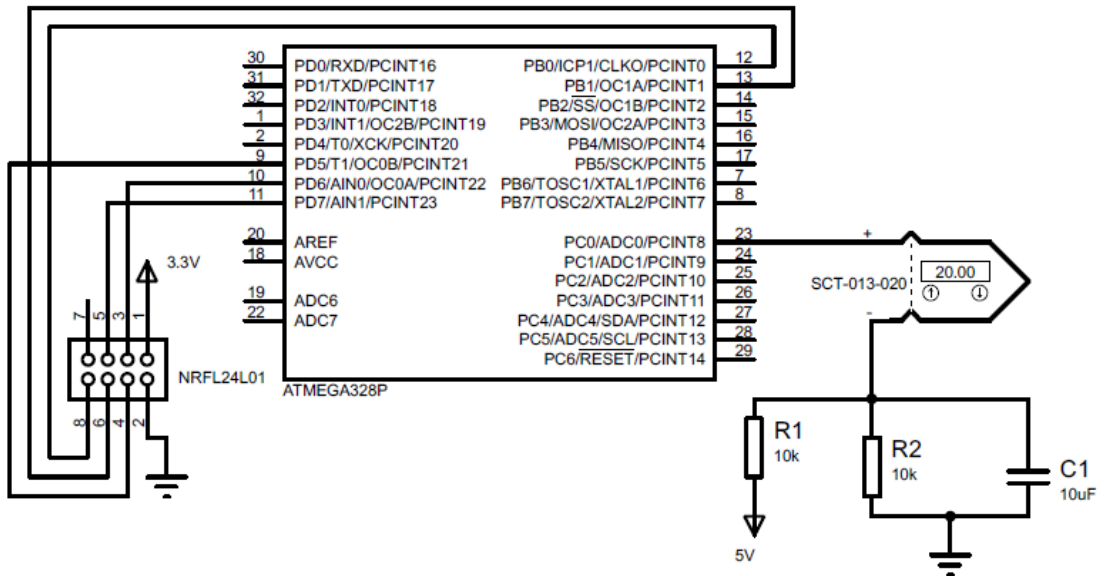
### 3.1 Desenvolvimento do projeto

#### 3.1.1 Sistema de leitura

Conforme previamente descrito, para melhor compreensão do sistema proposto por esse projeto, divide-se em sistema de leitura e sistema de controle. Além disso, para melhor entendimento do funcionamento da etapa definida como sistema de leitura, separa-se em circuito de condicionamento do ramal de ligação (conjunto 1) e circuito de condicionamento do ramal de saída (conjunto 2).

O circuito de condicionamento do ramal de ligação, denominado conjunto 1, cujo esquema elétrico apresentado na Figura 17, é composto por microcontrolador Arduino, módulo transceptor nRF24L01 e transdutor de corrente SCT-013-020.

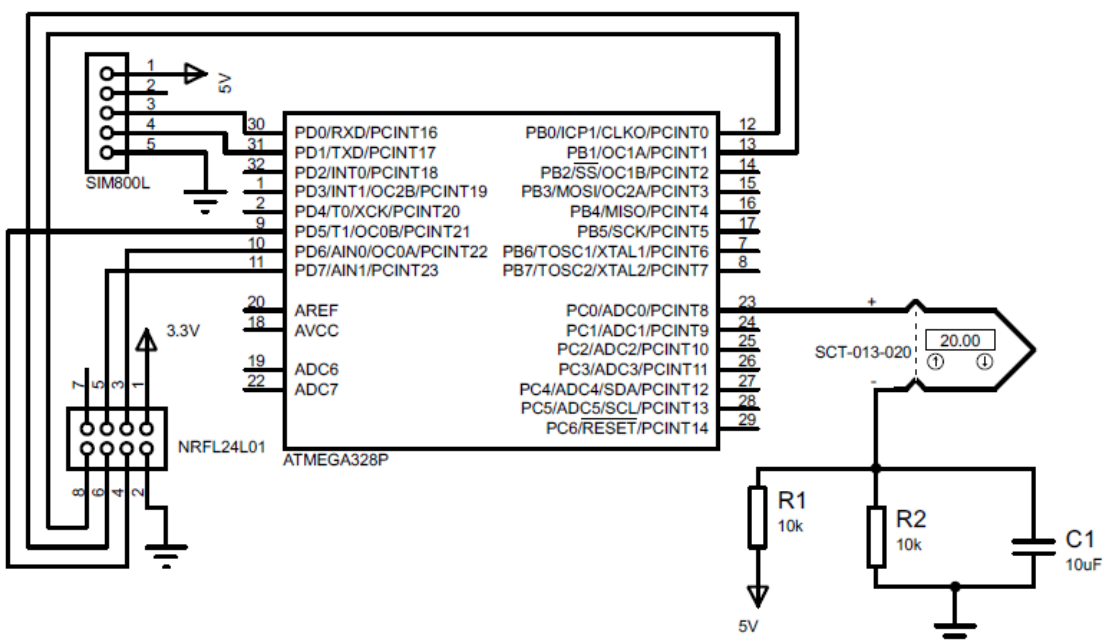
Figura 17 – Esquema elétrico do circuito de condicionamento do ramal de ligação



Fonte: O Autor (2021).

O circuito de condicionamento do ramal de saída, denominado conjunto 2, cujo esquema elétrico conforme Figura 18, é semelhante a composição do conjunto 1, porém possui adicionalmente o módulo GSM/GPRS SIM800L para envio das informações via SMS do sistema de leitura para o sistema de controle.

Figura 18 - Esquema elétrico do circuito de condicionamento do ramal de saída



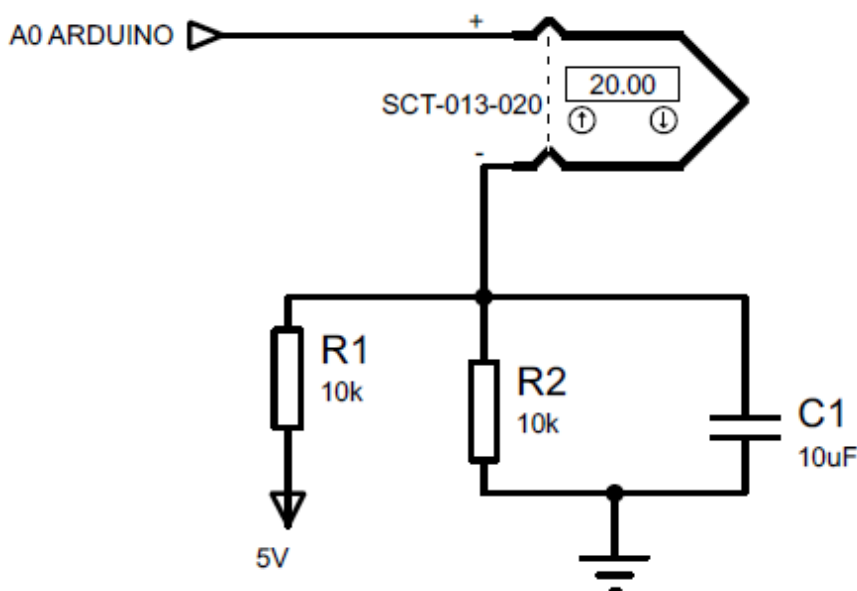
Fonte: O Autor (2021).

A função básica do circuito do conjunto 1 é coletar os dados das amplitudes de correntes elétricas lidas no condutor de fase de energia elétrica do ramal de ligação da unidade consumidora analisada e transmitir via radiofrequência para o conjunto 2.

Já no conjunto 2 objetiva-se adquirir as amplitudes de correntes elétricas lidas após o medidor de energia elétrica da concessionária distribuidora de energia elétrica, ou seja, no ramal de saída da unidade consumidora analisada. Além disso, nessa etapa é recebido via radiofrequência os dados do conjunto 1 e ambos os dados coletados são enviados via SMS por meio do módulo GSM/GPRS para o sistema de controle.

Como o microcontrolador utilizado não pode medir tensão negativa, antes de iniciar os testes práticos, foi desenvolvido circuito auxiliar de condicionamento e acoplado nos pólos de saída do transdutor de corrente para efetuar o *offset* convertendo os valores lidos de alternado para contínuo. Com isso, o circuito final do sistema de medição com o transdutor de corrente elétrica conectado ao microcontrolador é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Circuito auxiliar de condicionamento do transdutor de corrente elétrica



Fonte: O Autor (2021).

Para o funcionamento do software Arduino dessa etapa, são utilizadas as bibliotecas “SPI.h”, “nRF24L01.h”, “RF24.h”, “EmonLib.h” e “SoftwareSerial.h”. Sendo a biblioteca “SPI.h” utilizada para comunicação entre o microcontrolador e o módulo

radio transceptor, “nRF24L01.h” e “RF24.h” utilizadas para configurações do funcionamento do módulo radio transceptor, “EmonLib.h” para configuração do transdutor de corrente utilizado e “SoftwareSerial.h” para comunicação do módulo GSM/GPRS e microcontrolador.

Para alimentação do módulo GSM/GPRS na faixa de tensão de 3,5 a 4,2 V<sub>DC</sub> foi necessário utilizar um módulo regulador de tensão LM317 DC-DC Step Down da *ST Microelectronics*, conforme Figura 20.

Figura 20 – Módulo regulador de tensão LM317 DC-DC Step Down



Fonte: ST Eletronics<sup>10</sup>.

Na entrada deste módulo regulador de tensão foi conectado uma fonte de alimentação de 5V<sub>DC</sub> com capacidade de corrente de até 2A, regulando a saída do módulo regulador em 4V<sub>DC</sub>. Com isso além de fornecer alimentação no nível de tensão solicitado pelo módulo GSM/GPRS, atende a capacidade de corrente solicitada no processo de sintonização do módulo com a rede de telefonia local.

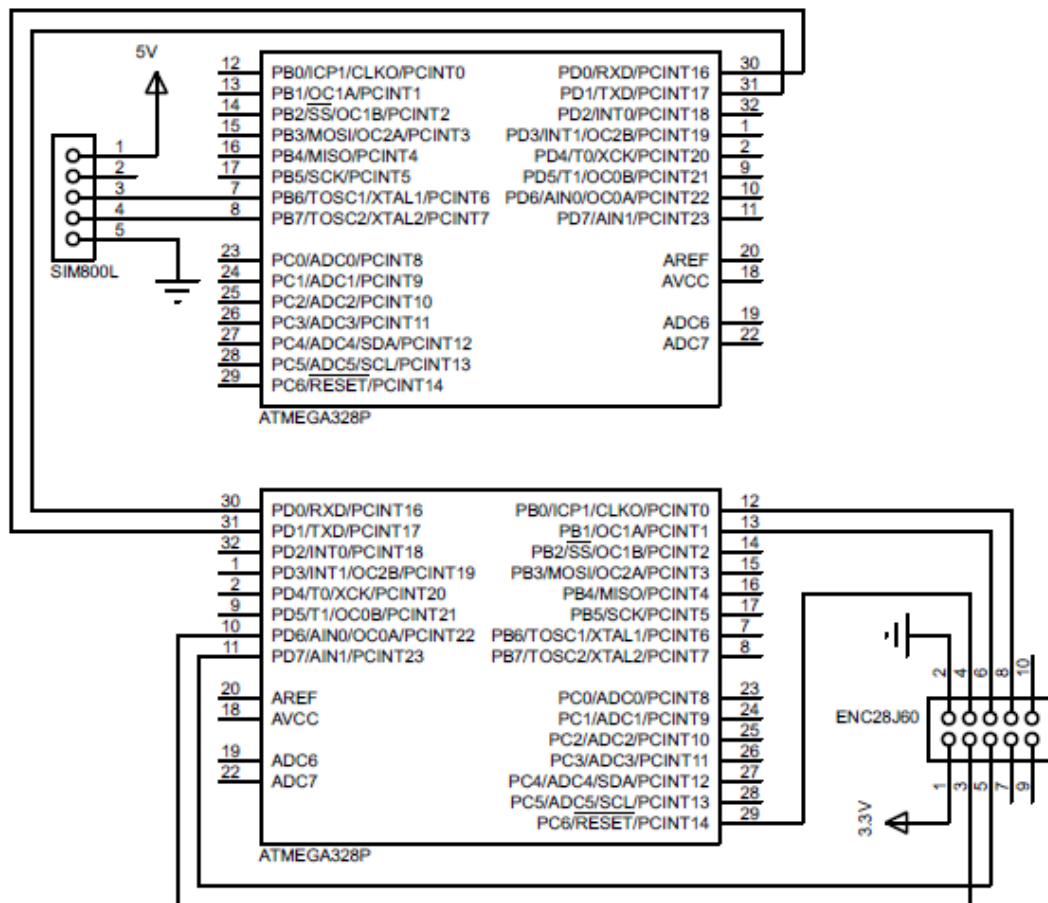
### 3.1.2 Sistema de controle

O sistema de controle, cujo esquema elétrico apresentado na Figura 21, é composto por dois microcontroladores Arduino, módulo GSM/GPRS SIM800L e módulo Ethernet ENC28J60. Vale destacar que um dos microcontroladores do sistema de controle é dedicado exclusivamente a função de recebimento de dados via SMS por meio do módulo GSM/GPRS SIM800L e o outro tem a função de conectar o sistema a rede de internet local através do módulo ethernet ENC28J60, sendo que esses microcontroladores trocam informações entre si através do protocolo UART.

---

<sup>10</sup> Disponível em: < [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/power-management/linear-voltage-regulators/standard-voltage-regulators/lm317.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/power-management/linear-voltage-regulators/standard-voltage-regulators/lm317.html)>. Acesso em 08 mar. 2021

Figura 21 – Esquema elétrico do sistema de controle



Fonte: O Autor (2021).

A comunicação entre os dois microcontroladores do sistema de controle é feita utilizando o protocolo UART, ou seja, através das saídas Rx (receptor) e Tx (transmissor) de cada microcontrolador, baseado no método emissor *master* e receptor *slave*. Como esse método é baseado na leitura ponto-a-ponto, na implementação de teste dessa etapa, os dados coletados no sistema de leitura e recebidos no sistema de controle via SMS são salvos em variáveis estabelecidas, sendo esses escritos na saída serial do microcontrolador configurado como *master*. Com isso, o microcontrolador parametrizado como *slave* verifica o recebimento de informação na sua entrada serial, efetua a leitura ponto-a-ponto e armazena os dados coletados em variável do tipo *string*. Posteriormente esse dado recebido deve ser convertido para variável do tipo *float*, pois o banco de dados criado foi definido para receber dados numéricos.

O recebimento dos dados coletados via SMS é a etapa inicial do sistema de

controle, porém não será abordada nessa seção pois já foi explicado seu funcionamento de recebimento de mensagens SMS anteriormente.

Para os testes do módulo ethernet ENC28J60 foi desenvolvido software baseado nos exemplos disponibilizados na biblioteca “UIPEthernet.h”. Além disso, para essa etapa de teste do projeto, foi utilizada a biblioteca “SPI.h”, para estabelecer comunicação entre módulo e microcontrolador.

### 3.2 Testes preliminares dos dispositivos de medição e comunicação

Visando comprovar a efetividade dos dispositivos de medição e comunicação aplicados ao modelo final desse projeto, foram realizados testes preliminares por etapa antes da integração do modelo final.

Os testes iniciais deste projeto demonstraram o funcionamento dos transdutores de corrente elétrica utilizados para medição de corrente elétrica do sistema de leitura. Para comprovação do bom funcionamento dos equipamentos utilizados, após efetuadas as conexões entre módulos e microcontrolador conforme previsto nos esquemas elétricos apresentados, foram realizados testes para aferição dos transdutores por meio de comparação dos valores lidos com a medição de um equipamento aferidor do modelo CheckMeter 2.3 genX da marca MTE. Vale também destacar que o software desenvolvido e aplicado ao microcontrolador Arduino para funcionamento dos transdutores de corrente elétrica baseou-se nos exemplos disponíveis na biblioteca “EmonLib.h”.

Para evidenciar a efetividade dos transdutores de corrente elétrica utilizados, foram utilizadas quatro cargas resistivas de  $106\Omega \pm 4,0\%$  associadas em paralelo em quatro combinações distintas, conforme apresentado na Tabela 1, de modo a variar as amplitudes de corrente elétrica lidas pelos equipamentos.

Tabela 1 – Aferição dos Transdutores de Corrente Elétrica

TESTE	Carga Aplicada ( $\Omega$ )	EQUIPAMENTO AFERIDOR		PROJETO DESENVOLVIDO	
		Corrente no Aferidor 1 (A)	Corrente no Aferidor 2 (A)	Corrente no Transdutor 1 (A)	Corrente no Transdutor 2 (A)
1	105,30	2,114	2,112	2,144	2,034
2	53,34	4,149	4,150	4,254	4,125
3	35,93	6,133	6,136	6,272	6,165
4	26,55	8,231	8,239	8,304	8,169

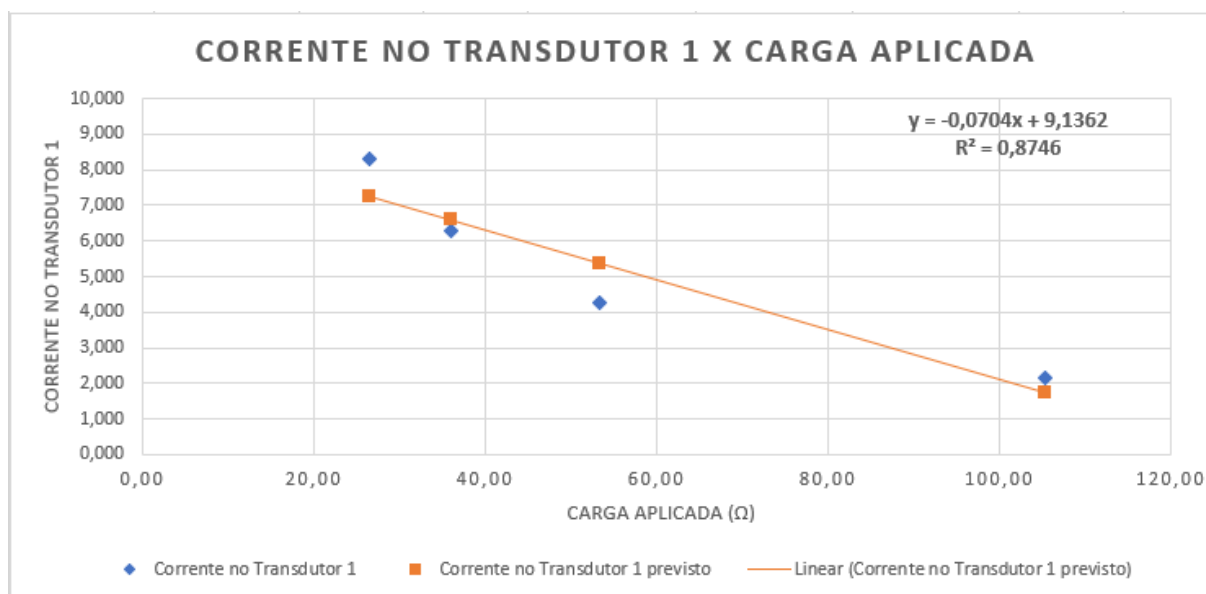
Fonte: O Autor (2021).

O transdutor de corrente elétrica aplicado ao conjunto 1 é identificado como transdutor 1 e o equipamento aplicado ao conjunto 2 é chamado de transdutor 2. Para efeito comprovatório, são também apresentadas as amplitudes de correntes elétricas adquiridas no equipamento aferidor, sendo o aferidor 1 referente a medição no conjunto 1 e o aferidor 2 em relação a medição no conjunto 2. Destaca-se também que os valores apresentados na Tabela 1 são referentes às médias obtidas de cada sequência de testes com um valor de carga resistiva, sendo cada sequência composta por 10 medições realizadas a cada 15 segundos. Todos os resultados obtidos nesses testes são apresentados na seção ANEXOS.

Confirma-se a efetividade dos transdutores ao comparar os erros percentuais das medições dos equipamentos utilizados nos quatro testes realizados com as medições do equipamento aferidor. O transdutor 1, aplicado ao conjunto 1, apresentou erro médio percentual de 0,367% e, para efeito comparativo, o aferidor 1 aplicado no mesmo ponto resultou erro médio percentual de 0,115%. O transdutor 2, aplicado ao conjunto 2, apresentou erro médio percentual de 0,307% e o aferidor 2 aplicado no mesmo ponto resultou erro médio percentual de 0,121%.

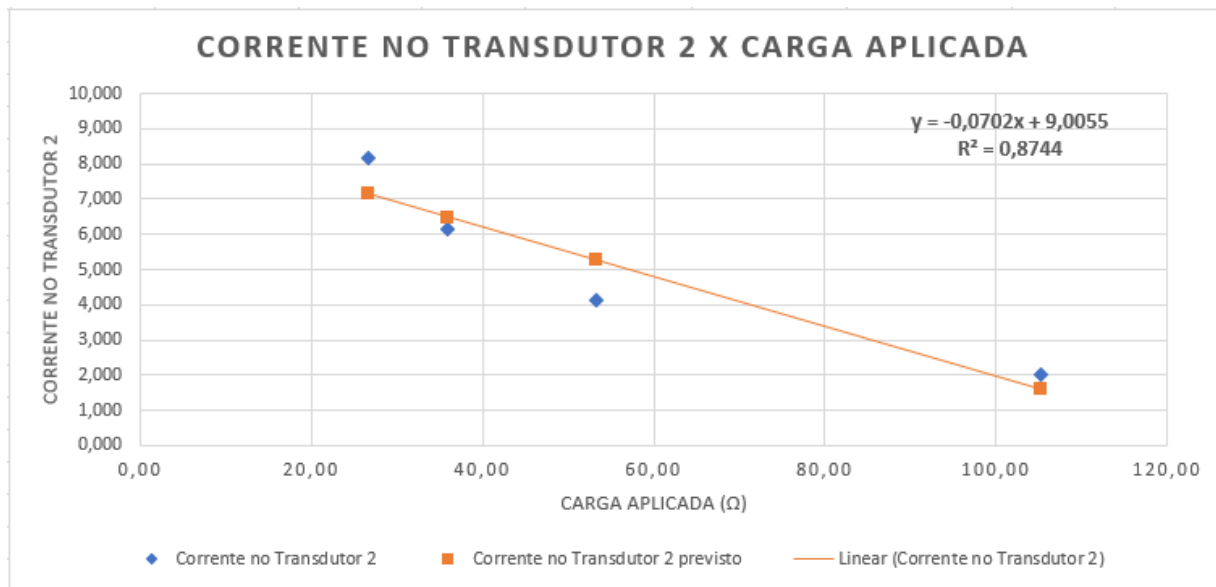
Por meio do processo de regressão linear é possível quantificar a relação entre a amplitude de corrente elétrica obtida com a carga resistiva aplicada nos conjuntos 1 e 2, conforme apresentado nas Figura 22 e Figura 23, respectivamente.

Figura 22 – Regressão linear no conjunto 1



Fonte: O Autor (2021).

Figura 23 – Regressão linear no conjunto 2



Fonte: O Autor (2021).

Analisando o coeficiente de determinação de regressão linear de cada equipamento, é possível afirmar que a carga aplicada ao conjunto 1 tem 87,46% de impacto sobre a corrente elétrica medida pelo transdutor 1 e a carga aplicada ao conjunto 2 tem 87,44% de impacto sobre a corrente elétrica medida pelo transdutor 2.

Outro fator que deve ser levado em consideração na análise das Figura 22 e Figura 23 é o comparativo entre os pontos reais e os pontos previstos. A diferença entre o real e o previsto é chamado de resíduo e é possível afirmar que ele se mantém linear nas duas análises, ou seja, com a variação da carga resistiva aplicada ocorre a variação na corrente elétrica lida mantendo uma linearidade, comprovando a eficácia dos equipamentos de medição aplicados ao projeto.

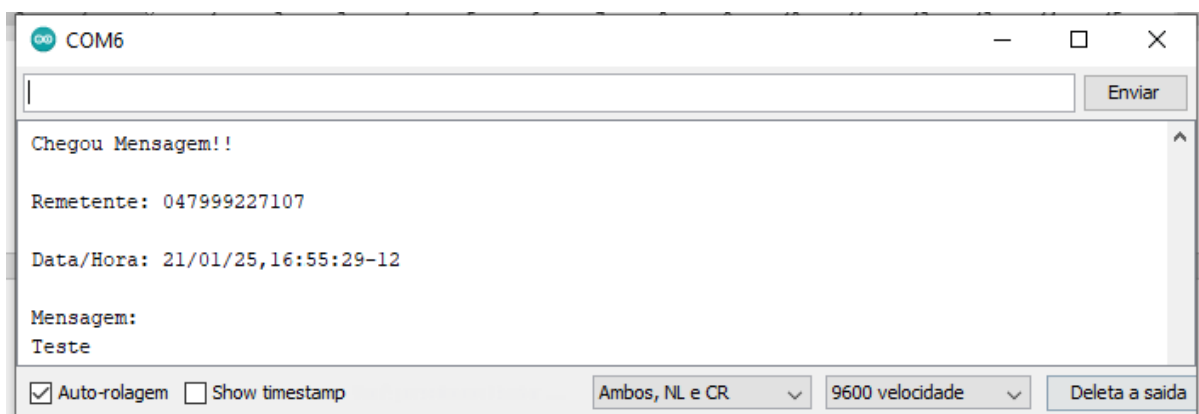
Outro teste realizado visou efetivar o funcionamento do sistema de comunicação entre microcontroladores via radiofrequência. Para essa etapa foram efetuadas as conexões entre módulos radio transceptores nRF24L01 e microcontroladores conforme apresentado nos esquemas elétricos dessa etapa do sistema nas Figura 17 e Figura 18. Destaca-se nessa etapa a criação de endereço para envio de dados entre os módulos do sistema de comunicação via radiofrequência, pois ambos os módulos radio transceptores devem ser configurados com o mesmo endereço e é por meio desse endereço que é aberto a transmissão e recepção de dados. Os softwares utilizados nessa etapa do projeto são baseados nas bibliotecas “nRF24L01.h” e “RF24.h”.



Para os testes do envio de mensagem via SMS, foram efetuadas as conexões do módulo GSM/GPRS SIM800L ao microcontrolador, conforme previsto no esquema elétrico, e desenvolvido software baseado na biblioteca “SoftwareSerial.h”. Como esse módulo funciona baseado no conjunto de comandos AT, é utilizado a função de programação “*serialGSM.print()*” para enviar os comandos AT necessários ao módulo e efetivar o sistema de comunicação.

Como teste inicial nessa etapa, foi enviado uma mensagem SMS de um telefone celular para o número do SIMCard utilizado no módulo GSM/GPRS visando testar a função de recebimento de mensagens e comprovar se o módulo efetuou conexão à rede de telefonia local. Abrindo o *Serial Monitor* do Arduino utilizado neste circuito, conforme Figura 24, é possível visualizar as informações da mensagem SMS recebida: número do telefone celular que enviou a mensagem SMS, data e hora do recebimento e texto da mensagem SMS recebida.

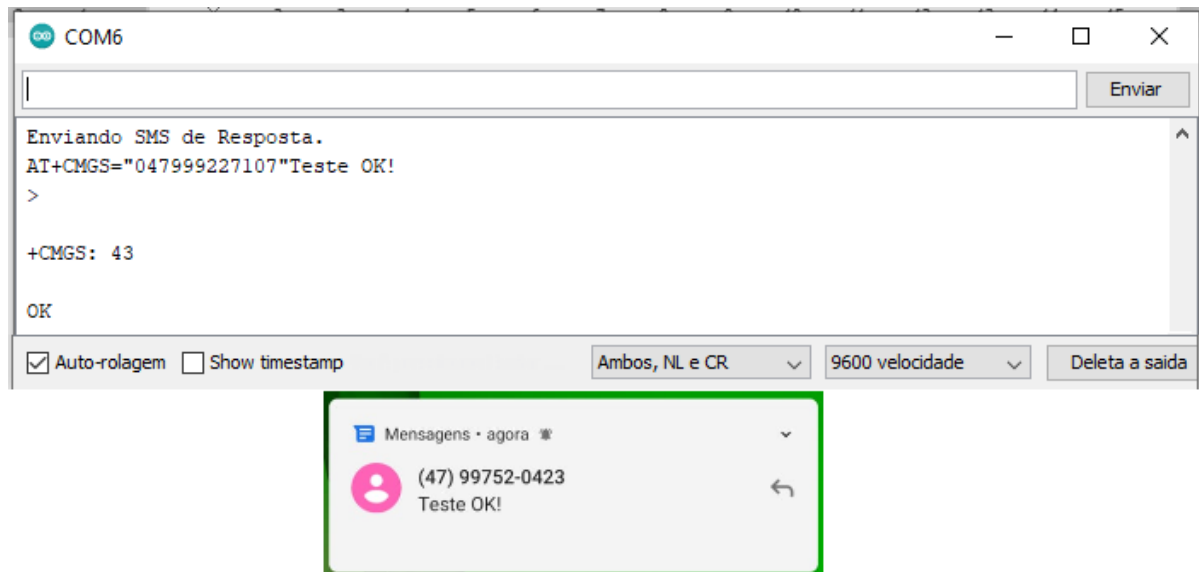
Figura 24 – Recebimento de SMS



Fonte: O Autor (2021).

Para efetivar o funcionamento desse módulo, foi realizado nesse mesmo software o procedimento de envio de SMS para um número de telefone celular pré-estabelecido. Na Figura 25 é possível visualizar o *Serial Monitor* do Arduino utilizado nessa etapa com a mensagem enviada e imagem da tela do celular mostrando a imagem recebida, comprovando o funcionamento do sistema de envio de dados via SMS.

Figura 25 – Envio e recebimento de SMS



Fonte: O Autor (2021).

Para comprovação da efetividade do sistema de comunicação entre sistema de controle e sistema de leitura, foi realizado o envio de dados via SMS do sistema de leitura para armazenamento no banco de dados do sistema de controle. Ao receber as informações do sistema de leitura via mensagem SMS, o sistema de controle, conectado ao servidor WEB através do módulo ethernet ENC28J60, armazena as informações coletadas no banco de dados MySQL, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Valores salvos no banco de dados

+ Opções									
		id	datahora	corrente1	corrente2	status			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	1	2021-01-26 14:56:15	0.03	0.09	0			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	2	2021-01-26 14:56:36	0.03	0.09	0			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	3	2021-01-26 14:57:07	2.58	2.52	0			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	4	2021-01-26 14:57:37	2.55	2.52	0			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	5	2021-01-26 14:58:08	3.40	2.50	1			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	6	2021-01-26 14:58:39	3.98	2.48	1			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	7	2021-01-26 14:59:08	2.53	2.49	0			
<input type="checkbox"/>	Edita Copiar Apagar	8	2021-01-26 14:59:38	2.51	2.45	0			

Fonte: O Autor (2021).

Por último, por meio de protocolos PHP e HTTP, é feito a integração entre banco de dados MySQL e página do servidor WEB da rede local para apresentar essas informações a equipe de fiscalização, além de indicar o status da unidade consumidora analisada nesse sistema de leitura, conforme Figura 27.

Figura 27 – Sistema de controle em página WEB

Posicao	Data e Hora	Corrente 1	Corrente 2	Status
1	26/01/2021 14:56	0.03	0.09	0
2	26/01/2021 14:56	0.03	0.09	0
3	26/01/2021 14:57	2.58	2.52	0
4	26/01/2021 14:57	2.55	2.52	0
5	26/01/2021 14:58	3.40	2.50	1
6	26/01/2021 14:58	3.98	2.48	1
7	26/01/2021 14:59	2.53	2.49	0
8	26/01/2021 14:59	2.51	2.45	0

Fonte: O Autor (2021).

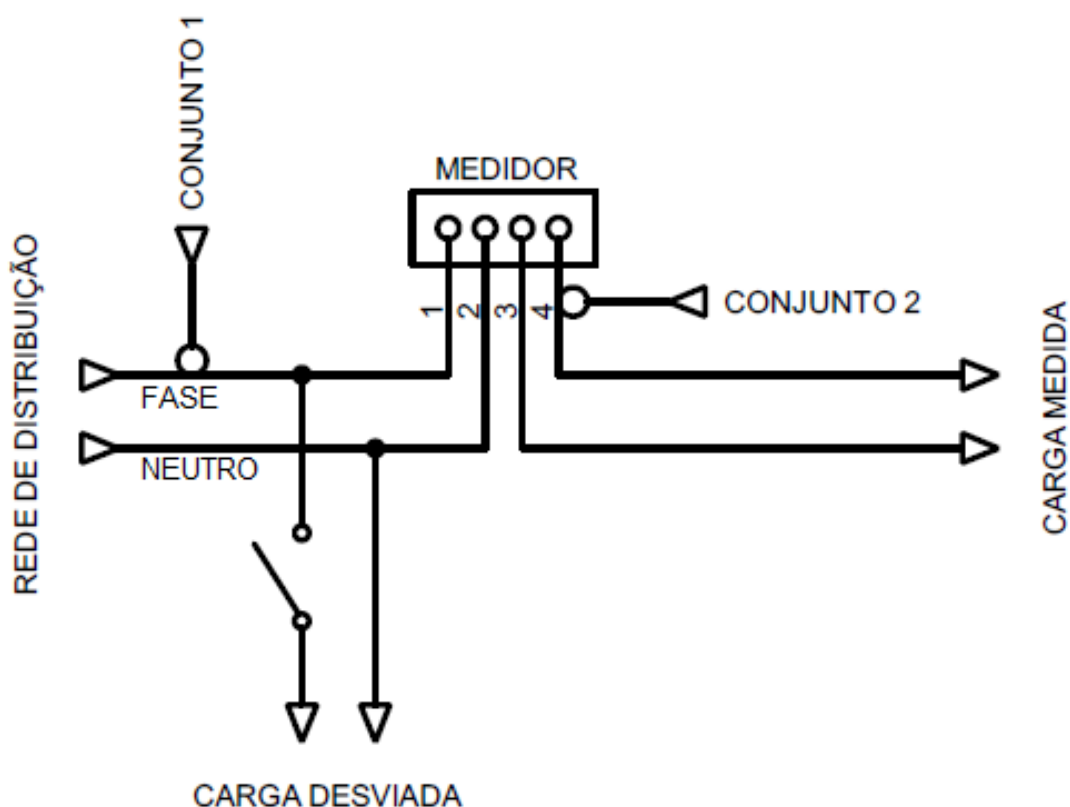
Analisando a Figura 27 verificam-se quatro situações distintas obtidas do sistema de leitura e apresentadas a equipe de fiscalização do sistema de controle. Nas posições 1 e 2 percebe-se situação com as cargas elétricas do local desligadas com corrente praticamente zerada. Nas posições 3 e 4 é simulado a situação de apenas a carga elétrica medida ligada, ou seja, as correntes elétricas medidas são iguais no ramal de ligação (Corrente 1) e após a medição (Corrente 2), desconsiderando pequeno erro de medição. Nesses dois casos anteriores, o status do ponto analisado é representado como 0, indicando que nesse local não há perdas não técnicas. Já na situação 5 e 6, o interruptor conectado no ramal de entrada é ativado e a corrente elétrica é desviada diretamente a carga clandestina, sem passar pelo medidor de energia elétrica. Nesse caso, há divergência entre o valor de corrente elétrica obtido pelo conjunto 1 com o valor obtido pelo conjunto 2, ou seja, nesse local há perdas não técnicas e o status desse ponto é alterado para 1. Nas posições 7 e 8, o interruptor é desativado e a carga clandestina é desligada, voltando à normalidade do sistema.

### 3.3 Sistema desenvolvido

Após a realização dos testes por etapas, iniciou-se o período de desenvolvimento da montagem final visando a integração entre etapas e validação da ideia proposta por esse trabalho.

Para simular uma situação de desvio de energia elétrica, principal tipo de fraude em medições de energia elétrica, foi elaborado circuito conforme apresentado na Figura 28, representando a medição de corrente elétrica pelo conjunto 1 no ramal de ligação conectado à rede de distribuição e a medição de corrente elétrica no ramal de carga após o medidor de energia elétrica pelo conjunto 2. Além disso, para simular um desvio de energia elétrica nos condutores da entrada de energia, foi implementado interruptor conectado diretamente ao ramal de entrada, antes do medidor de energia elétrica, que alimenta a carga desviada e não medida.

Figura 28 – Circuito da montagem final do sistema de leitura

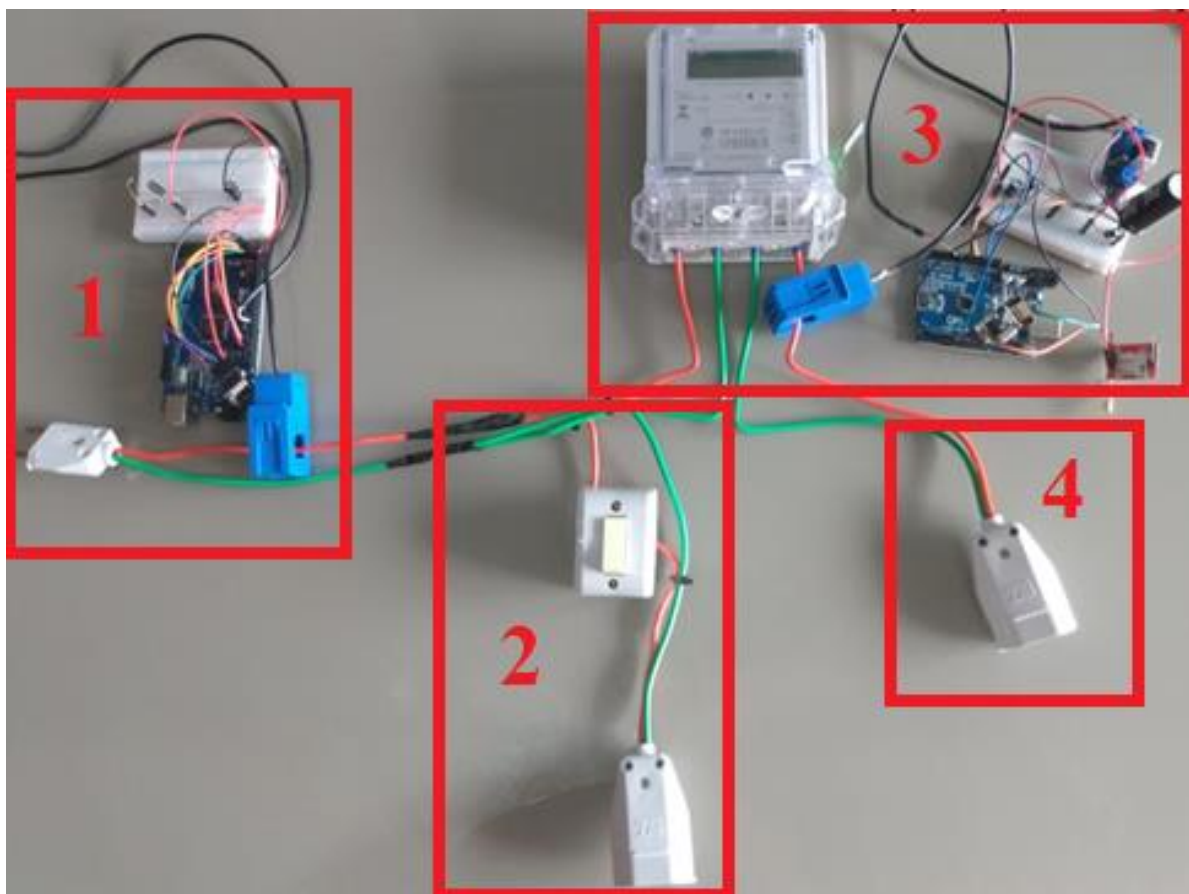


Fonte: O Autor (2021).

A montagem final do sistema de leitura desenvolvido para simular as instalações elétricas de entrada de energia monofásica de uma unidade consumidora é

apresentado na Figura 29. Na parte 1 é previsto a simulação da conexão dos condutores do ramal de ligação com a rede de distribuição da concessionária de energia elétrica, sendo conectado nesse ponto o transdutor de corrente elétrica do conjunto 1. Na parte 2 são indicados os condutores da ligação clandestina derivados diretamente do ramal de entrada, além disso também foi instalado nessa etapa um interruptor para ativar e desativar o desvio de corrente elétrica para fins de testes do projeto. Já na parte 3 é representado o medidor de energia elétrica com a entrada dos condutores no lado esquerdo e saída no lado direito, sendo acoplado nessa saída o transdutor de corrente elétrica referente ao conjunto 2. A parte 4 simboliza os condutores de energia elétrica que compõem o ramal de carga, ou seja, seguem do medidor de energia elétrica para o interior da unidade consumidora para alimentar as cargas elétricas desse local.

Figura 29 – Montagem final do sistema de leitura



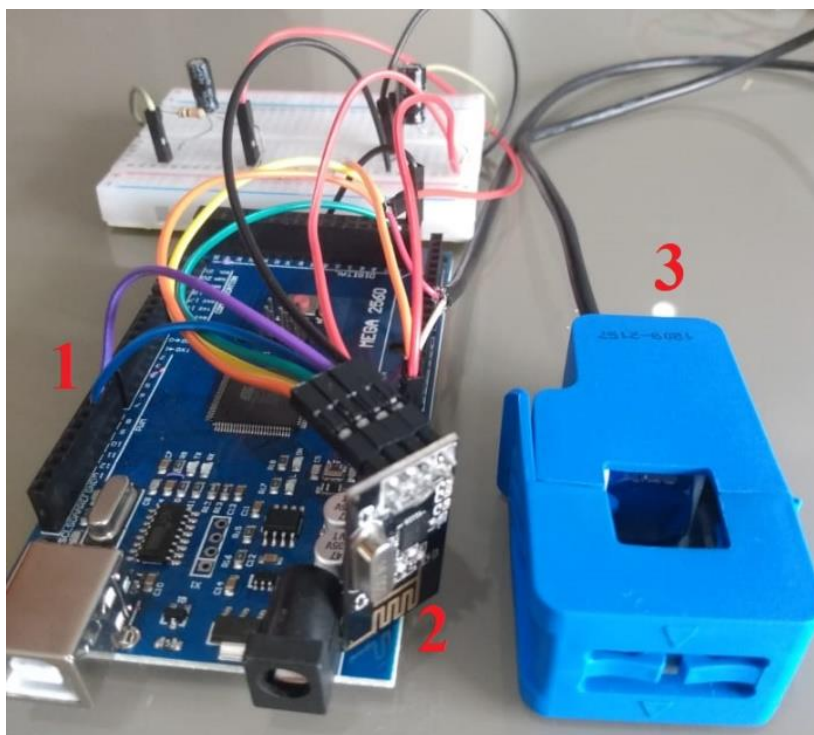
Fonte: O Autor (2021).

Com a implementação desse sistema é possível verificar e simular a situação de uma futura aplicação em uma unidade consumidora com desvio nos condutores do

ramal de entrada, haja vista que ao acionar o interruptor conectado diretamente ao ramal de entrada é desviado corrente elétrica para alimentar a carga clandestina sem passar pelo medidor de energia elétrica, ou seja, a corrente elétrica medida no conjunto 1 será diferente da corrente elétrica medida no conjunto 2. Nesse caso, comparando com a prática, a energia medida pelo medidor de energia elétrica será diferente da energia consumida e derivada da rede de distribuição da concessionária de energia elétrica na alimentação desta unidade consumidora.

Na Figura 30 é apresentada a montagem final desenvolvido para o circuito de condicionamento do ramal de ligação, denominado de conjunto 1 do sistema de leitura. No ponto 1 é indicado o microcontrolador utilizado, no ponto 2 o módulo transceptor nRF24L01 utilizado para envio de informações via radiofrequência e no ponto 3 o transdutor de corrente elétrica SCT-013-020 utilizado para medição da corrente elétrica.

Figura 30 – Montagem final do conjunto 1 do sistema de leitura

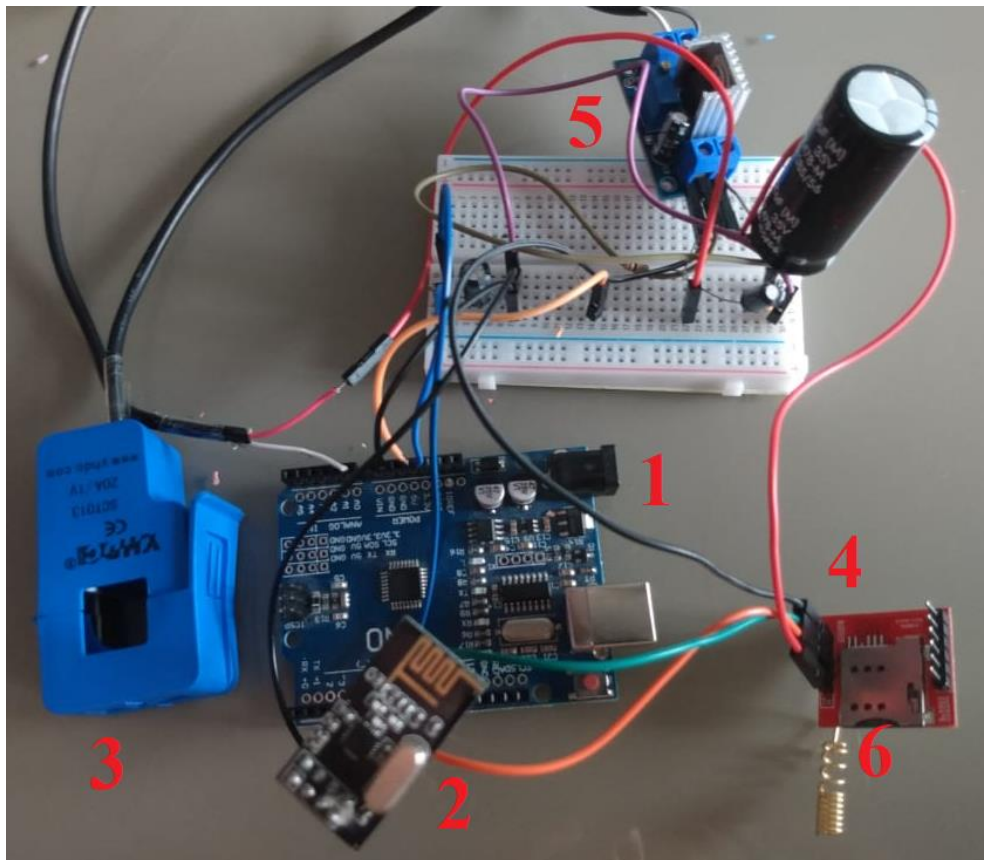


Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 31 é exibida a montagem final desenvolvida para o circuito de condicionamento do ramal de saída, denominado conjunto 2 do sistema de leitura. No ponto 1 é indicado o microcontrolador utilizado, no ponto 2 o módulo transceptor nRF24L01 utilizado para recebimento de informações via radiofrequência, no ponto 3

o transdutor de corrente elétrica SCT-013-020 utilizado para medição da corrente elétrica, no ponto 4 o módulo GSM/GPRS SIM800L responsável por enviar os dados coletados no sistema de leitura para o sistema de controle via mensagem SMS, no ponto 5 o módulo regulador de tensão LM317 utilizado na alimentação do módulo GSM/GPRS e no ponto 6 é indicado o local para conexão de chip telefônico no módulo GSM/GPRS que irá conectar esse sistema a rede de telefonia local.

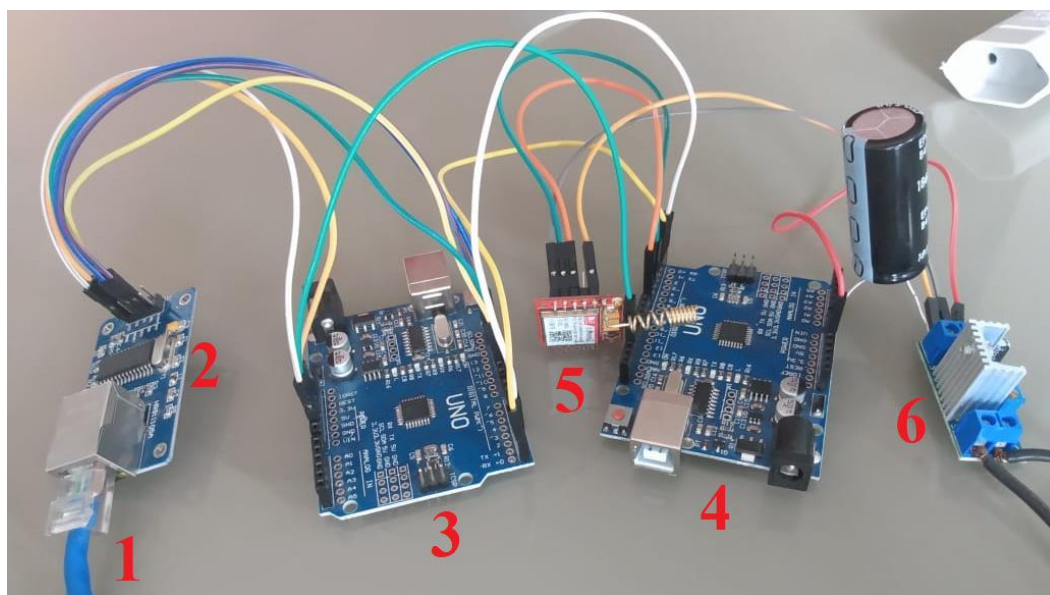
Figura 31 – Montagem final do conjunto 2 do sistema de leitura



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 32 é apresentado a montagem final da central de controle, composta por dois microcontroladores. No ponto 1 é identificado o cabo de rede CAT.6 utilizado para conexão à rede de internet local, no ponto 2 o módulo ethernet ENC28J60 e no ponto 3 o microcontrolador com o *firmware* para efetuar a conexão do sistema à rede local. Esse microcontrolador é conectado fisicamente (via cabos) com o microcontrolador indicado no ponto 4, sendo esse o responsável pelo recebimento de dados dos pontos de operação via mensagem SMS por meio do módulo GSM/GPRS SIM800L, que é identificado como ponto 5. No ponto 6 é identificado o módulo regulador de tensão LM317 utilizado na alimentação do módulo GSM/GPRS.

Figura 32 – Modelo de montagem final da central de controle



Fonte: O Autor (2021).

### 3.3.1 Comissionamento final

Após a integração das partes desenvolvidas, foram realizados experimentos para comprovar a efetividade do projeto proposto para aplicação futura em fiscalização de uma unidade consumidora. Visando comprovar matematicamente a eficácia desse trabalho, foram analisadas as grandezas elétricas obtidas como resultado final da variação das cargas aplicadas ao projeto desenvolvido.

Vale ressaltar que o trabalho desenvolvido realiza a medição de corrente elétrica em dois pontos da simulação de entrada de energia elétrica de uma unidade consumidora (ramal de ligação e após o medidor), obtendo o valor de corrente elétrica desviado por meio da diferença entre essas amplitudes medidas. Para validar as medições realizadas nas sequências de testes, foi aplicado em paralelo ao projeto desenvolvido um equipamento aferidor do modelo CheckMeter 2.3 genX da marca MTE que realiza a medição de corrente elétrica em três pontos: ramal de ligação, ramal de carga medido e carga desviada. Lembrando que é possível medir a corrente elétrica da carga desviada com o equipamento aferidor, uma vez que essa é uma carga aplicada e conhecida. Entretanto, para uma aplicação prática essa medição não é possível tendo em vista não ser uma carga conhecida, desse modo a corrente elétrica da carga desviada é calculada pela subtração do valor obtido no ramal de entrada em relação ao ramal de carga.



Para a realização dos testes foram utilizadas quatro cargas resistivas de  $106\Omega \pm 4,0\%$  associadas em paralelo em combinações distintas de modo a variar a carga elétrica aplicada na carga medida e carga desviada, variando também a carga total medida no ramal de ligação. Posteriormente também foi aplicada carga indutiva (motor de indução monofásico de 1/2 CV) para verificação do funcionamento do sistema de medição desenvolvido com esse tipo de carga. Vale ressaltar que foram realizadas medições a cada 15 segundos em cada sequência de testes, obtendo os resultados que serão apresentados a seguir.

Os resultados obtidos na primeira sequência de testes são apresentados na Tabela 2. Nesse teste foram associadas em paralelo no ramal de carga medido quatro cargas resistivas, mantendo o ramal desviado sem carga. Logo após a execução dos testes foi realizada a medição da carga resistiva obtendo valor de  $26,62\ \Omega$  para a carga aplicada ao ramal de carga medido.

Tabela 2 – Medições da primeira sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
8,083	8,085	-	8,110	8,080	-
8,079	8,083	-	8,100	8,040	-
8,077	8,078	-	8,110	8,160	-
8,073	8,073	-	8,070	8,040	-
8,082	8,084	-	8,160	8,080	-
8,090	8,091	-	8,170	8,130	-
8,079	8,083	-	8,110	8,090	-
8,071	8,066	-	8,160	8,080	-
8,070	8,080	-	8,050	8,040	-
8,084	8,091	-	8,080	8,090	-

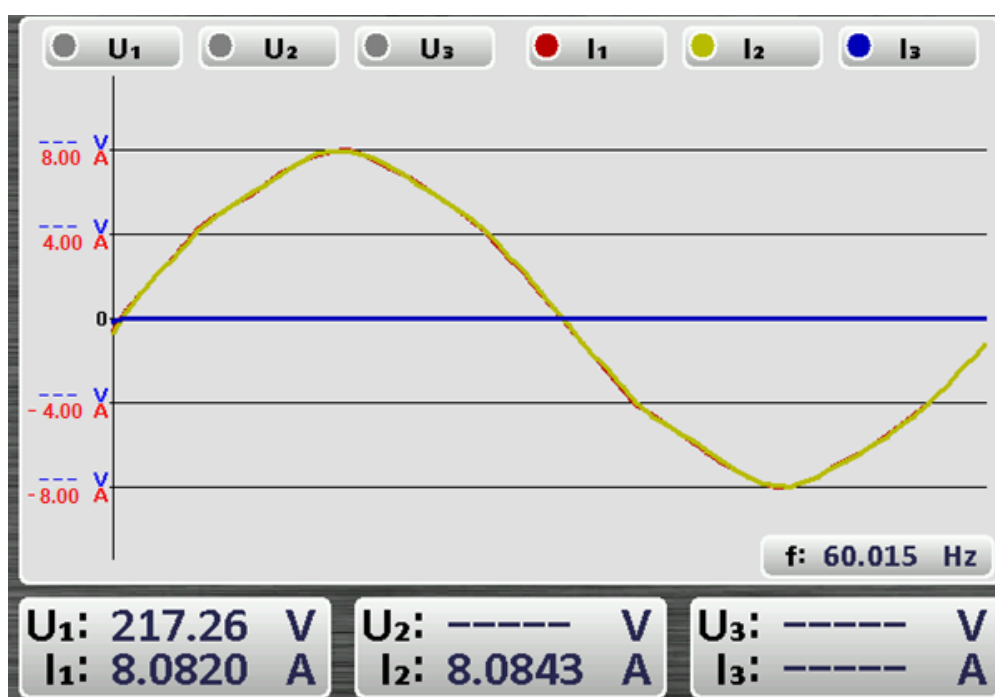
Fonte: O Autor (2021).

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 8,112 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 8,083 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,040 e do conjunto 2 é de 0,039, apresentando erro percentual médio de 0,380% e 0,341% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente.

Para efeito comparativo, os valores médios das leituras de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 8,079A e no conjunto 2 de 8,081A com desvio padrão de 0,006 e 0,008, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,059% para o conjunto 1 e 0,071% para o conjunto 2.

Na Figura 33 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 33 – Forma de onda da primeira sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal desviado, a corrente elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica medida após o medidor.

Os resultados obtidos na segunda sequência de testes são apresentados na Tabela 3. Nesse teste foram associadas em paralelo no ramal de carga medido três cargas resistivas e conectada uma carga resistiva ao ramal desviado. Logo após a execução dos testes foram realizadas as medições das cargas resistivas obtendo valor de 35,98  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada ao ramal de carga medido e valor de 102,2  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada a carga desviada.

Tabela 3 – Medições da segunda sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
8,131	5,993	2,134	8,240	5,980	2,260
8,122	5,989	2,133	8,160	5,940	2,220
8,123	5,994	2,135	8,160	5,960	2,200
8,139	6,001	2,138	8,170	5,970	2,200
8,135	5,999	2,137	8,260	5,900	2,360
8,141	6,000	2,140	8,240	5,970	2,270
8,133	5,990	2,137	8,210	5,960	2,250
8,128	5,992	2,136	8,210	5,900	2,310
8,130	5,996	2,136	8,210	5,980	2,230
8,124	5,990	2,134	8,190	5,970	2,220

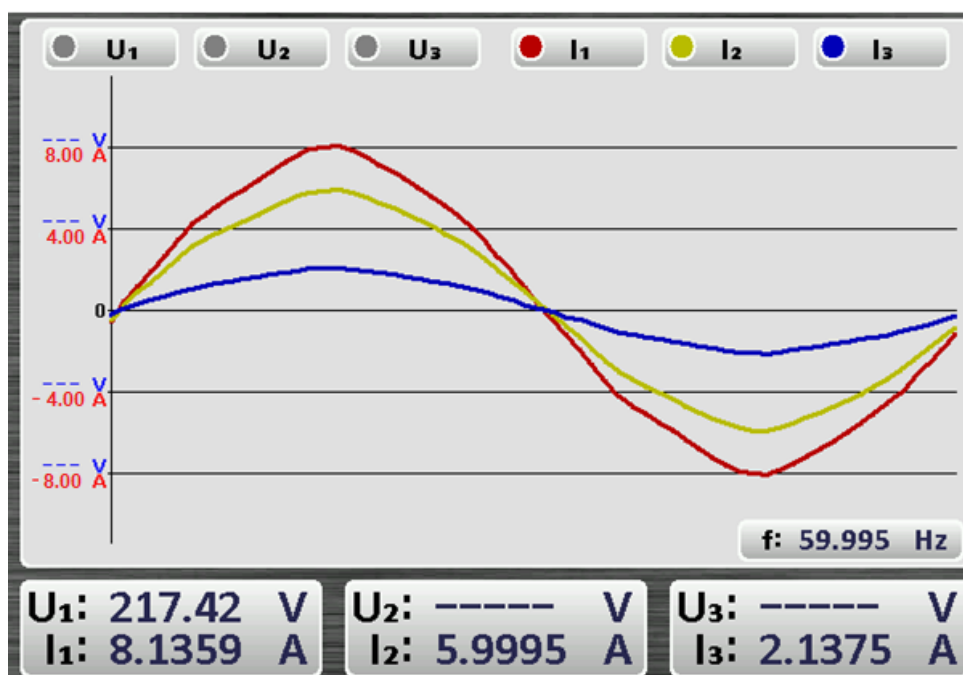
Fonte: O Autor (2021).

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 8,205 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 5,953 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,035 e do conjunto 2 é de 0,030, apresentando erro percentual médio de 0,341% e 0,400% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é de 2,252 A.

Para efeito comparativo, os valores médios das leituras de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 8,131 A e no conjunto 2 de 5,994 A com desvio padrão de 0,007 e 0,004, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,064% para o conjunto 1 e de 0,061% para o conjunto 2. O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 2,136 A com desvio padrão de 0,002 e erro percentual médio de 0,075%.

Na Figura 34 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 34 – Forma de onda da segunda sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados obtidos na terceira sequência de testes são apresentados na Tabela 4. Nesse teste foram associadas em paralelo no ramal de carga medido duas cargas resistivas e no ramal desviado em paralelo duas cargas resistivas. Logo após a execução dos testes foram realizadas as medições das cargas resistivas obtendo valor de 53,57  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada ao ramal de carga medido e valor de 52,68  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada a carga desviada.

Tabela 4 – Medições da terceira sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
8,180	4,030	4,149	8,290	4,100	4,190
8,186	4,036	4,151	8,290	4,090	4,200
8,191	4,037	4,152	8,260	4,130	4,130
8,196	4,041	4,157	8,220	4,130	4,090
8,206	4,041	4,164	8,250	4,100	4,150
8,204	4,043	4,161	8,250	4,110	4,140
8,202	4,045	4,151	8,250	4,130	4,120
8,182	4,050	4,128	8,260	4,100	4,160
8,177	4,051	4,124	8,290	4,090	4,200
8,174	4,047	4,123	8,230	4,110	4,120

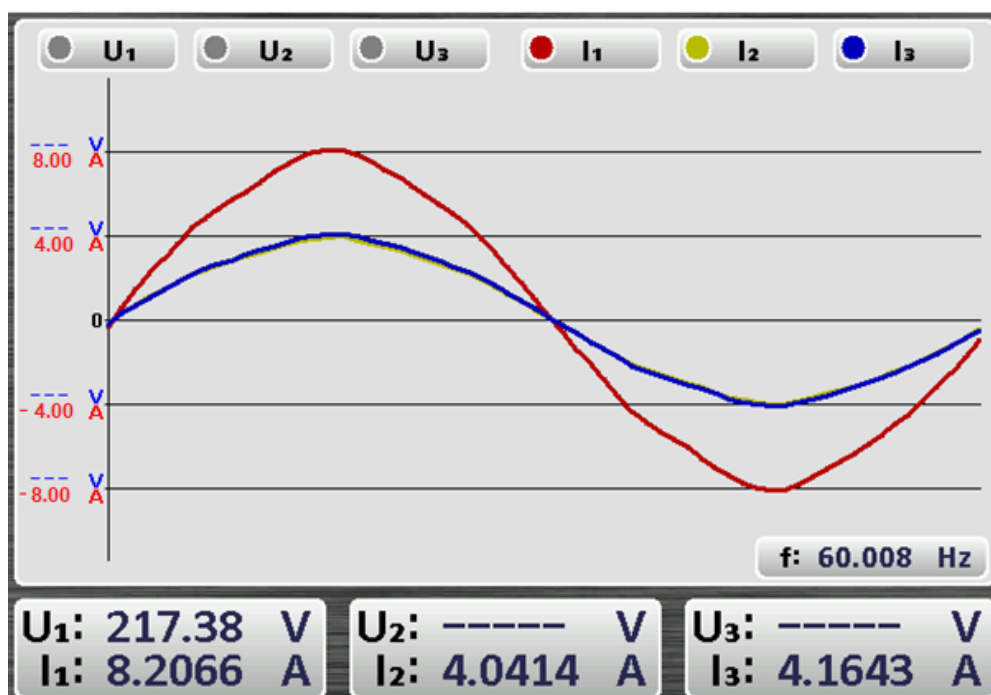
Fonte: O Autor (2021).

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 8,259 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 4,109 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,025 e do conjunto 2 é de 0,016, apresentando erro percentual médio de 0,230% e 0,316% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é de 4,150 A.

Para efeito comparativo, os valores médios das leituras de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 8,190 A e no conjunto 2 de 4,042 A com desvio padrão de 0,012 e 0,007, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,122% para o conjunto 1 e de 0,126% para o conjunto 2. O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 4,146 A com desvio padrão de 0,015 e erro percentual médio de 0,304%.

Na Figura 35 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 35 – Forma de onda da terceira sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados obtidos na quarta sequência de testes são apresentados na Tabela 5. Nesse teste foi conectada uma carga resistiva ao ramal de carga medido e associadas em paralelo no ramal desviado três cargas resistivas. Logo após a execução dos testes foram realizadas as medições das cargas resistivas obtendo valor de 104,80  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada ao ramal de carga medido e valor de 35,21  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada a carga desviada.

Tabela 5 – Medições da quarta sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
8,205	2,057	6,143	8,260	2,020	6,240
8,202	2,061	6,142	8,230	2,030	6,200
8,210	2,060	6,149	8,230	2,020	6,210
8,200	2,060	6,141	8,200	2,020	6,180
8,197	2,059	6,137	8,360	2,010	6,350
8,189	2,058	6,134	8,200	2,000	6,200
8,194	2,059	6,136	8,210	1,990	6,220
8,202	2,059	6,136	8,300	2,020	6,280
8,199	2,058	6,130	8,270	2,030	6,240
8,180	2,055	6,127	8,290	2,010	6,280

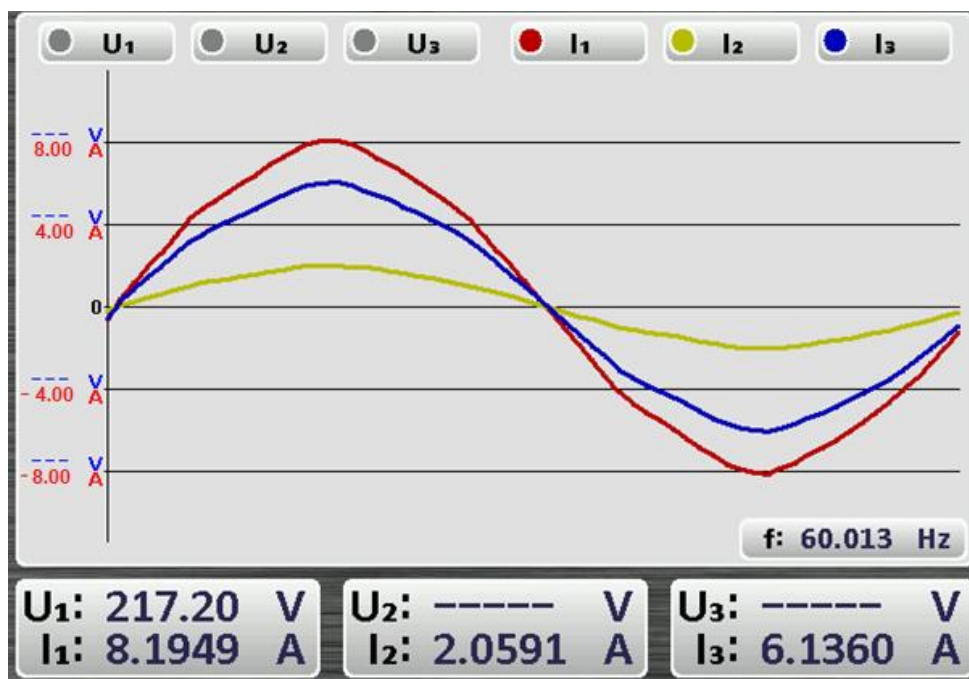
Fonte: O Autor (2021).

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 8,255 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 2,105 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,051 e do conjunto 2 é de 0,013, apresentando erro percentual médio de 0,497% e 0,496% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é de 6,240 A.

Para efeito comparativo, os valores médios de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 8,198 A e no conjunto 2 de 2,059 A com desvio padrão de 0,009 e 0,002, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,076% para o conjunto 1 e de 0,061% para o conjunto 2. O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 6,138 A com desvio padrão de 0,006 e erro percentual médio de 0,083%.

Na Figura 36 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 36 – Formas de ondas da quarta sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados obtidos na quinta sequência de testes são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Medições da quinta sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
8,094	-	8,092	8,120	-	8,120
8,103	-	8,102	8,150	-	8,150
8,111	-	8,106	8,150	-	8,150
8,116	-	8,111	8,160	-	8,160
8,116	-	8,108	8,160	-	8,160
8,093	-	8,088	8,190	-	8,190
8,112	-	8,108	8,210	-	8,210
8,110	-	8,105	8,170	-	8,170
8,108	-	8,108	8,150	-	8,150
8,109	-	8,107	8,180	-	8,180

Fonte: O Autor (2021).

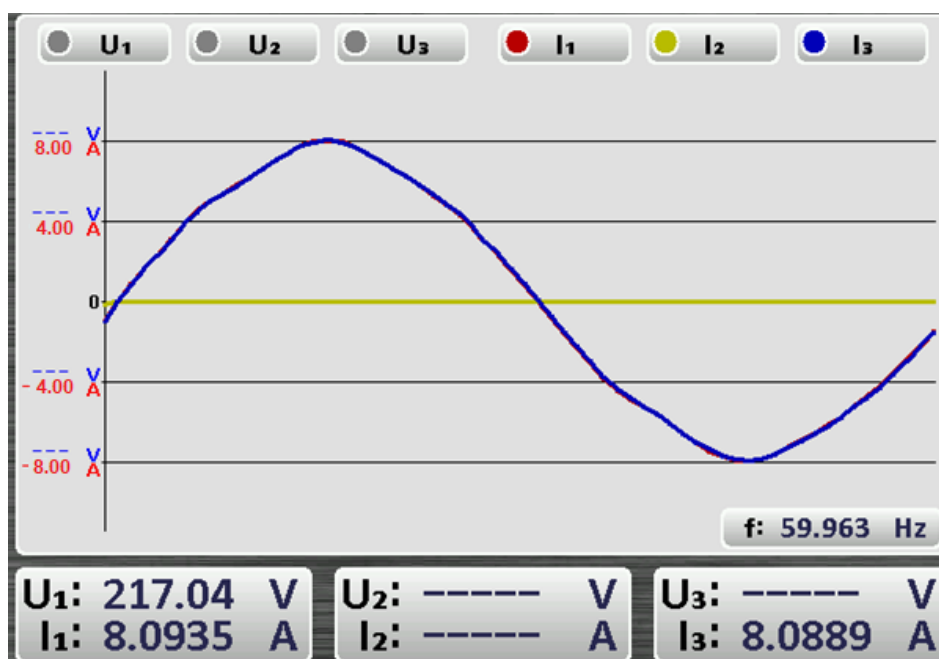
Nesse teste foram associadas em paralelo no ramo desviado quatro cargas resistivas, mantendo o ramo de carga medido sem carga. Logo após a execução dos testes foram realizadas as medições das cargas resistivas obtendo valor de  $26,53 \Omega$  para a carga resistiva aplicada a carga desviada.

Levando em consideração apenas o valor medido pelo transdutor do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras da corrente elétrica do ramo de ligação (conjunto 1) com amplitude de  $8,164 \text{ A}$ . Lembrando que nesse caso é zero a corrente medida no transdutor do conjunto 2, haja vista não ter nenhuma carga aplicada nesse ponto. O desvio padrão do conjunto 1 é de  $0,025$  e erro percentual médio de  $0,230\%$ . Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é igual a medição do conjunto 1 ( $8,164 \text{ A}$ ).

Para efeito comparativo, o valor médio das leituras de corrente elétrica lido pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de  $8,107 \text{ A}$  com desvio padrão de  $0,008$  e erro percentual médio de  $0,078\%$ . O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramo desviado é de  $8,104 \text{ A}$  com desvio padrão de  $0,008$  e erro percentual médio de  $0,068\%$ .

Na Figura 37 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramo de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 37 – Forma de onda da quinta sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).



Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal de carga medido, a corrente elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica medida no ramal desviado.

Os resultados obtidos na sexta sequência de testes são apresentados na Tabela 7. Nesse teste foi conectada uma carga resistiva ao ramal de carga medido e associadas em paralelo no ramal desviado duas cargas resistivas. Logo após a execução dos testes foram realizadas as medições das cargas resistivas obtendo valor de 105,30  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada ao ramal de carga medido e valor de 54,52  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada a carga desviada.

Tabela 7 – Medições da sexta sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
6,229	2,123	4,102	6,230	2,040	4,190
6,224	2,123	4,103	6,240	2,030	4,210
6,229	2,124	4,107	6,270	2,040	4,230
6,226	2,123	4,106	6,240	2,050	4,190
6,232	2,124	4,108	6,220	2,040	4,180
6,235	2,126	4,108	6,270	2,040	4,230
6,231	2,125	4,104	6,280	2,050	4,230
6,235	2,127	4,107	6,220	2,030	4,190
6,235	2,129	4,106	6,270	2,050	4,220
6,230	2,128	4,103	6,240	2,050	4,190

Fonte: O Autor (2021).

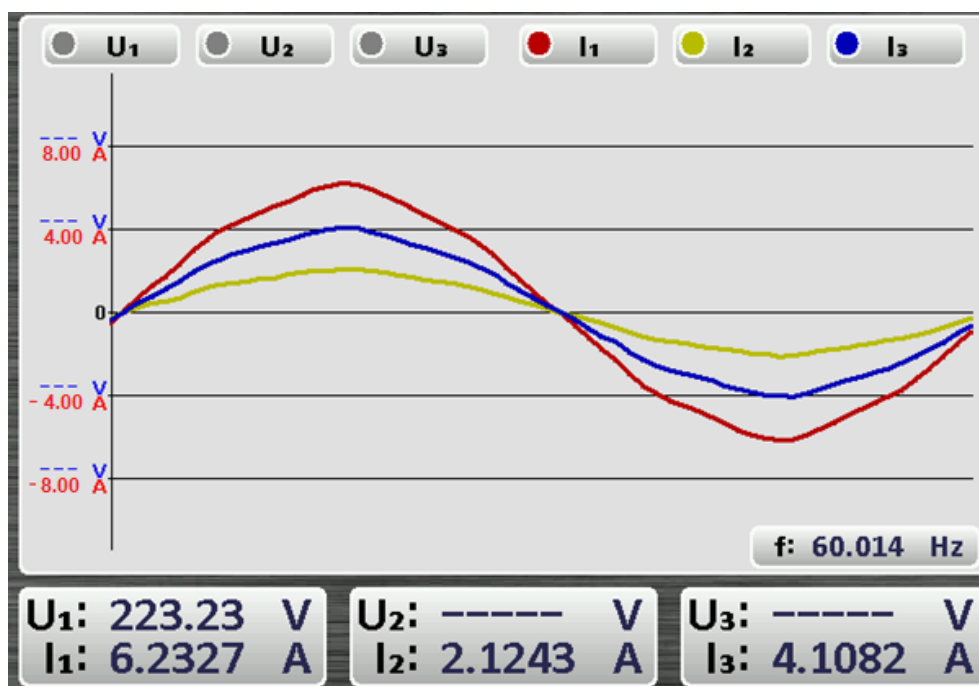
Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 6,248 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 2,042 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,023 e do conjunto 2 é de 0,008, apresentando erro percentual médio de 0,314% e 0,313% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é de 4,206 A.

Para efeito comparativo, os valores médios de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 6,231 A e no conjunto 2 de 2,125 A com desvio padrão de 0,004 e 0,002, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,049% para o conjunto 1 e de 0,087% para o conjunto 2.

O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 4,105 A com desvio padrão de 0,002 e erro percentual médio de 0,047%.

Na Figura 38 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 38 – Forma de onda da sexta sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados obtidos na sétima sequência de testes são apresentados na Tabela 8. Nesse teste foi conectado uma carga resistiva ao ramal de carga medido e uma carga resistiva ao ramal desviado. Logo após a execução dos testes foram realizadas as medições das cargas resistivas obtendo valor de 105,40  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada ao ramal de carga medido e valor de 108,10  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada a carga desviada.

Tabela 8 – Medições da sétima sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
4,208	2,130	2,077	4,250	2,050	2,200
4,209	2,135	2,079	4,260	2,050	2,210
4,209	2,131	2,079	4,270	2,060	2,210
4,212	2,132	2,079	4,260	2,040	2,220
4,215	2,133	2,081	4,280	2,060	2,220
4,218	2,133	2,082	4,260	2,050	2,210
4,214	2,131	2,082	4,280	2,040	2,240
4,211	2,129	2,080	4,260	2,040	2,220
4,213	2,131	2,082	4,260	2,040	2,220
4,215	2,131	2,084	4,260	2,060	2,200

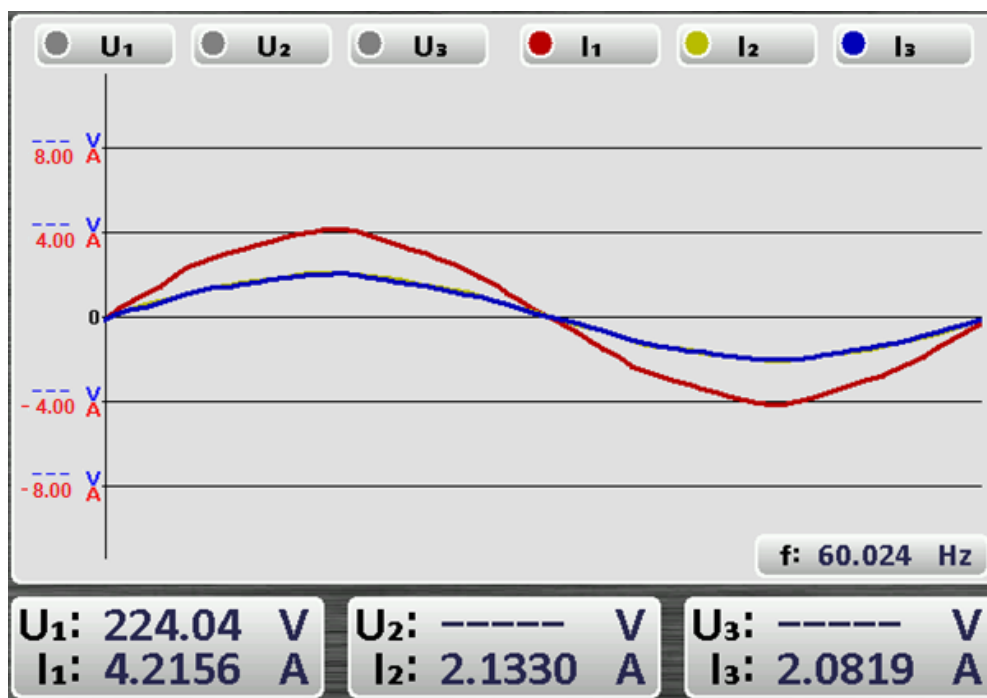
Fonte: O Autor (2021).

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 4,264 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 2,049 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,010 e do conjunto 2 é de 0,009, apresentando erro percentual médio de 0,178% e 0,351% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é de 2,215 A.

Para efeito comparativo, os valores médios de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 4,212 A e no conjunto 2 de 2,132 A com desvio padrão de 0,003 e 0,002, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,062% para o conjunto 1 e de 0,062% para o conjunto 2. O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 2,081 A com desvio padrão de 0,002 e erro percentual médio de 0,082%.

Na Figura 39 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 39 – Forma de onda da sétima sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados obtidos na oitava sequência de testes são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Medições da oitava sequência de testes

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
2,140	2,137	-	2,170	2,040	-
2,139	2,135	-	2,160	2,040	-
2,139	2,137	-	2,190	2,040	-
2,137	2,134	-	2,170	2,050	-
2,138	2,136	-	2,170	2,060	-
2,139	2,136	-	2,170	2,060	-
2,140	2,137	-	2,180	2,050	-
2,143	2,141	-	2,180	2,060	-
2,144	2,142	-	2,180	2,060	-
2,143	2,141	-	2,180	2,050	-

Fonte: O Autor (2021).

Nesse teste foi conectada no ramal de carga medido uma carga resistiva, mantendo o ramal desviado sem carga. Logo após a execução dos testes foi realizada a medição da carga resistiva obtendo valor de 105,50  $\Omega$  para a carga resistiva aplicada

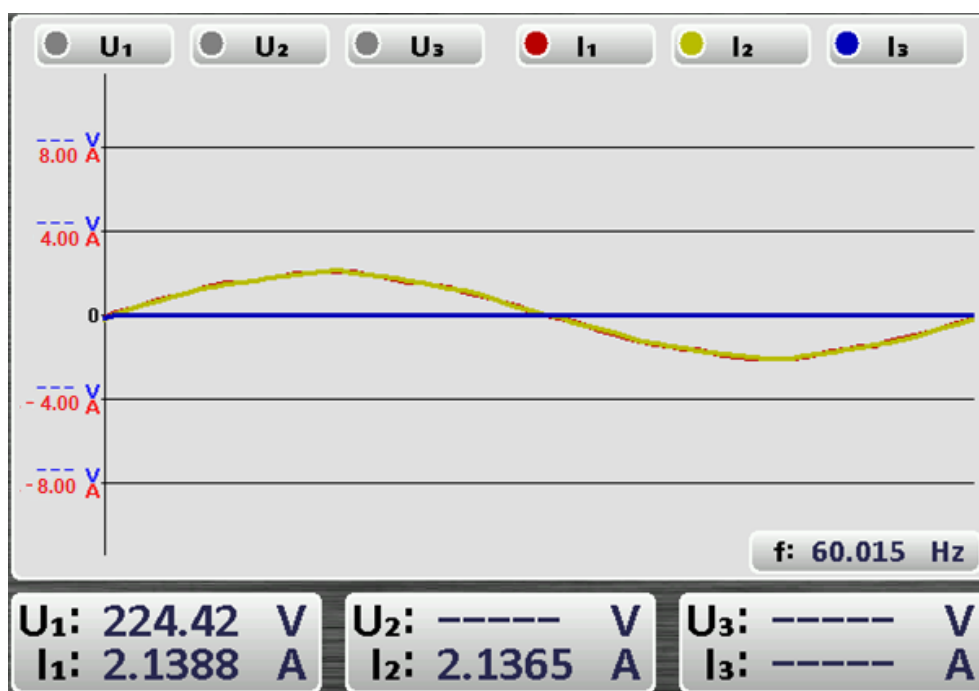
ao ramal de carga medido.

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 2,175 A e da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 2,051 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,008 e do conjunto 2 é de 0,009, apresentando erro percentual médio de 0,322% e 0,351% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é zero, haja vista não ter nenhuma carga aplicada nesse ponto.

Para efeito comparativo, os valores médios de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 2,140 A e no conjunto 2 de 2,138 A com desvio padrão de 0,002 e 0,003, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,088% para o conjunto 1 e de 0,141% para o conjunto 2.

Na Figura 40 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 40 – Forma de onda da oitava sequência de testes



Fonte: O Autor (2021).

Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal desviado, a corrente

elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica medida após o medidor.

Para análise final dos resultados obtidos no comissionamento realizado com cargas resistivas, é apresentado na Tabela 10 as médias dos valores adquiridos nos oito testes realizadas e apresentadas anteriormente. Vale ressaltar que as medições foram realizadas no ramal de ligação (conjunto 1) e no ramal de carga (conjunto 2), obtendo o valor do ramal desviado como a diferença dos valores entre ramal de ligação e ramal de carga medido.

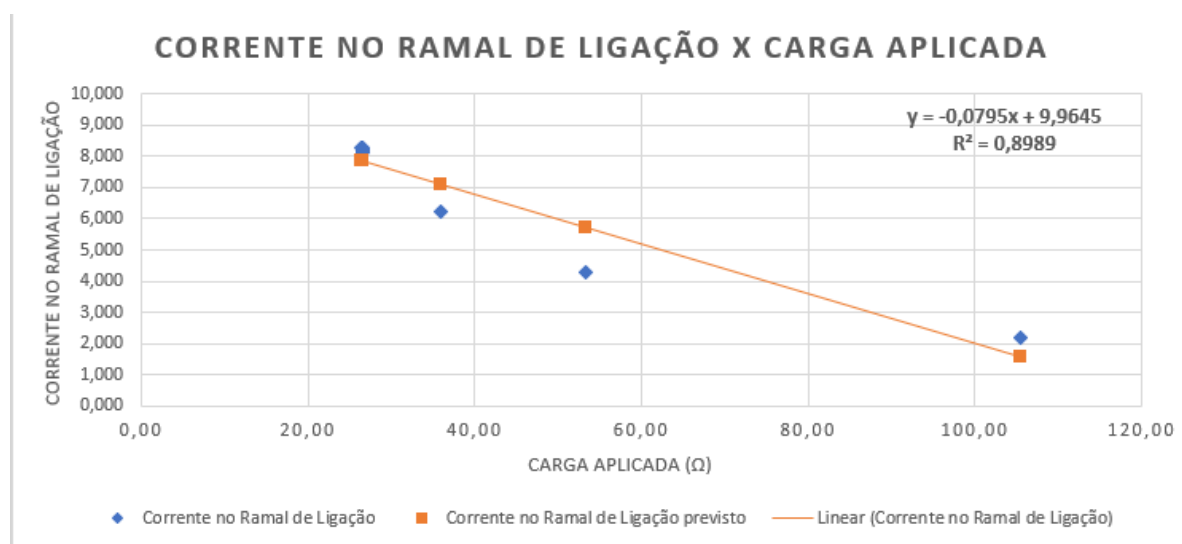
Tabela 10 – Medições do projeto desenvolvido e carga aplicada

TESTE	MEDIÇÕES PROJETO DESENVOLVIDO			RESISTÊNCIA APLICADA ( $\Omega$ )		
	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Carga Total no Ramal de Ligação ( $\Omega$ )	Carga Aplicada no Ramal de Carga ( $\Omega$ )	Carga Aplicada no Ramal Desviado ( $\Omega$ )
1	8,112	8,083	0,000	26,62	26,62	0,00
2	8,205	5,953	2,252	26,61	35,98	102,20
3	8,259	4,109	4,150	26,56	53,57	52,68
4	8,255	2,015	6,240	26,36	104,80	35,21
5	8,164	0,000	8,164	26,53	0,00	26,53
6	6,248	2,042	4,206	35,92	105,30	54,52
7	4,264	2,049	2,215	53,37	105,40	108,10
8	2,175	2,051	0,000	105,50	105,50	0,00

Fonte: O Autor (2021).

Por meio do processo de regressão linear é possível quantificar a relação entre a amplitude de corrente elétrica obtida com a carga resistiva aplicada no ramal de ligação (conjunto 1), conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Regressão linear no ramal de ligação



Fonte: O Autor (2021).

Analisando o coeficiente de determinação da regressão linear é possível afirmar que a carga aplicada ao ramal de ligação tem 89,89% de impacto sobre a corrente elétrica medida no conjunto 1. Outro fator que deve ser levado em consideração na análise da Figura 41 é o comparativo entre os pontos reais e os pontos previstos, a diferença entre o real e o previsto é chamado de resíduo e é possível afirmar que ele se mantém linear, ou seja, com a variação da carga resistiva aplicada ocorre a variação na corrente elétrica lida mantendo uma linearidade.

Tendo em conta a tecnologia atual dos equipamentos, grande parte das cargas elétricas existentes não são puramente resistivas, ou seja, são indutivas ou indutivas e resistivas. Desse modo, foram realizados testes com esses tipos de cargas para comprovar a efetividade do projeto desenvolvido em todos os tipos de cargas aplicadas.

Inicialmente foi aplicado um motor de indução monofásico de 1/2 CV no ramal de carga medido (conjunto 2), obtendo as medições de amplitude de corrente elétrica apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Medições da primeira sequência de testes com carga indutiva

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
3,188	3,227	-	3,250	3,180	-
3,180	3,230	-	3,230	3,180	-
3,176	3,223	-	3,200	3,160	-
3,180	3,225	-	3,240	3,150	-
3,178	3,227	-	3,220	3,170	-
3,174	3,213	-	3,200	3,160	-
3,165	3,213	-	3,240	3,190	-
3,169	3,213	-	3,220	3,160	-
3,174	3,219	-	3,230	3,150	-
3,171	3,215	-	3,200	3,160	-

Fonte: O Autor (2021).

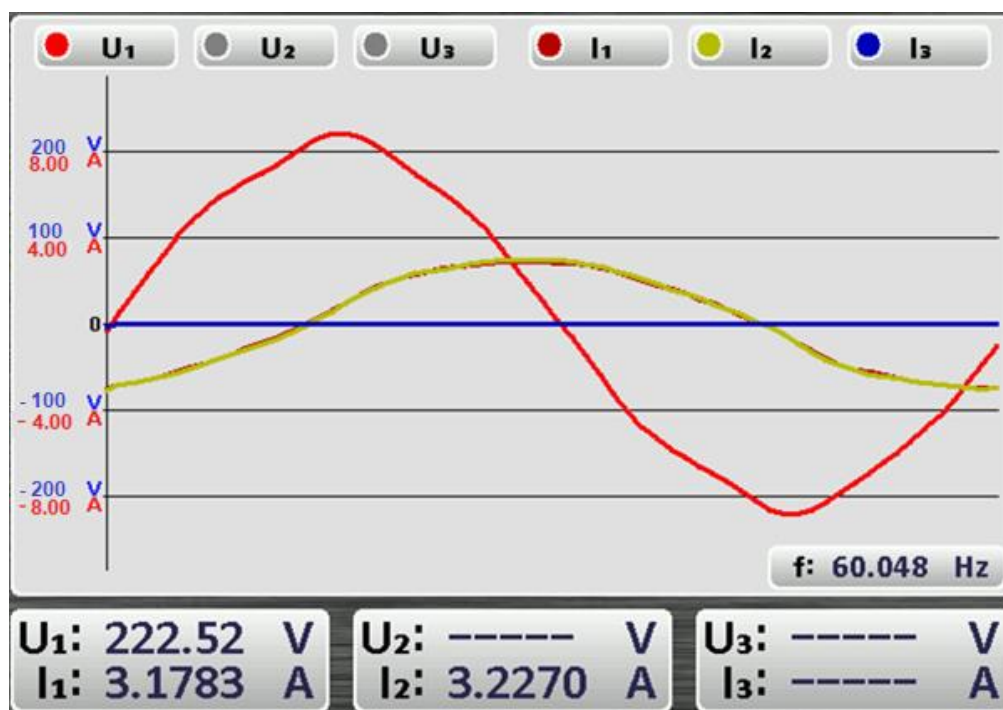
Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 3,223 A e valor médio da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 3,166 A. O desvio padrão do conjunto

1 é de 0,018 e do conjunto 2 é de 0,013, apresentando erro percentual médio de 0,465% e 0,354% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é zero, haja vista não ter nenhuma carga aplicada nesse ponto.

Para efeito comparativo, os valores médios de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 3,176 A e no conjunto 2 de 3,221 A com desvio padrão de 0,007 nos dois pontos. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,154% para o conjunto 1 e de 0,183% para o conjunto 2.

Na Figura 42 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho claro a forma de onda de tensão, vermelho escuro a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 42 – Forma de onda da primeira sequência de testes com carga indutiva



Fonte: O Autor (2021).

Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal desviado, a corrente elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica medida após o medidor. Por tratar-se de carga indutiva, destaca-se a defasagem de 78° da forma de onda de corrente em relação a forma de onda de tensão, resultando em um fator de potência de 0,21.

Na segunda sequência de testes com carga indutiva foi aplicado um motor de



indução monofásico de 1/2 CV no ramal de carga desviado, obtendo as medições de amplitude de corrente elétrica apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Medições da segunda sequência de testes com carga indutiva

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
3,169	-	3,202	3,210	-	3,210
3,164	-	3,209	3,190	-	3,190
3,162	-	3,210	3,180	-	3,180
3,158	-	3,200	3,210	-	3,210
3,161	-	3,205	3,210	-	3,210
3,152	-	3,200	3,190	-	3,190
3,157	-	3,203	3,220	-	3,220
3,153	-	3,199	3,190	-	3,190
3,159	-	3,201	3,230	-	3,230
3,155	-	3,201	3,210	-	3,210

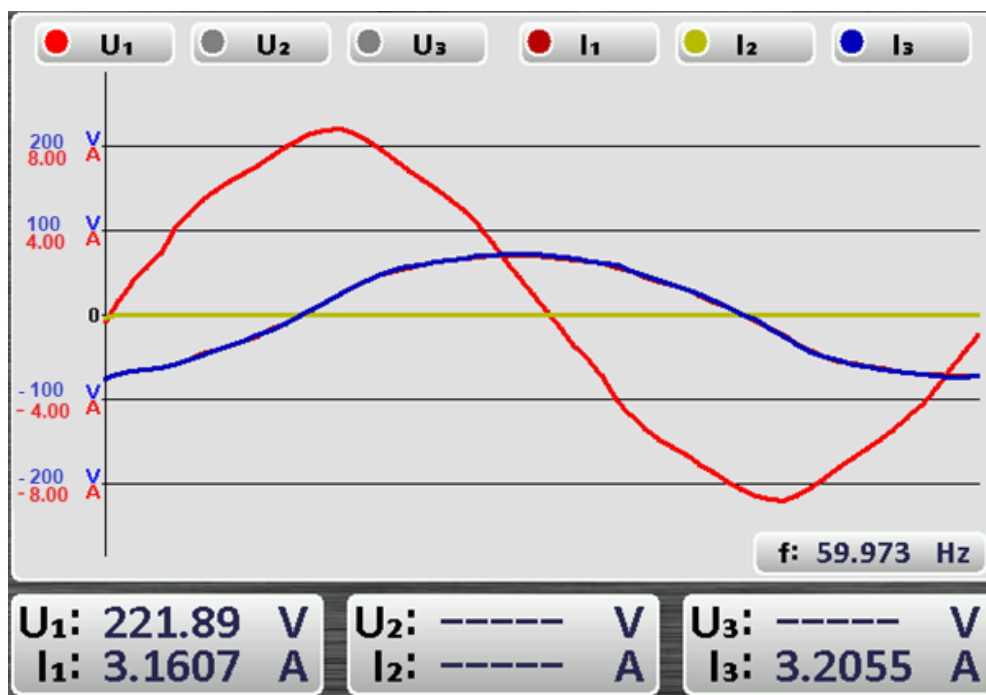
Fonte: O Autor (2021).

Levando em consideração apenas o valor medido pelo transdutor do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 3,204 A. Lembrando que nesse caso é zero a corrente medida no transdutor do conjunto 2, haja vista não ter nenhuma carga aplicada nesse ponto. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,016 e erro percentual médio de 0,412%. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é igual a medição do conjunto 1 (3,204 A).

Para efeito comparativo, o valor médio de corrente elétrica lido pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 3,159 A com desvio padrão de 0,005 e erro percentual médio de 0,127%. O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 3,203 A com desvio padrão de 0,004 e erro percentual médio de 0,094%.

Na Figura 43 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho claro a forma de onda de tensão, vermelho escuro a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 43 – Formas de ondas da segunda sequência de testes com carga indutiva



Fonte: O Autor (2021).

Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal medido, a corrente elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica desviada. Por tratar-se de carga indutiva, destaca-se a defasagem de  $78^\circ$  da forma de onda de corrente em relação a forma de onda de tensão, resultando em um fator de potência de 0,21.

Os resultados obtidos na terceira sequência de testes com cargas indutivas são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Medições da terceira sequência de testes com carga indutiva

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
4,098	4,127	-	4,160	4,130	-
4,077	4,131	-	4,160	4,100	-
4,091	4,129	-	4,170	4,110	-
4,090	4,124	-	4,180	4,110	-
4,088	4,125	-	4,210	4,110	-
4,084	4,117	-	4,210	4,090	-
4,086	4,121	-	4,180	4,110	-
4,081	4,118	-	4,160	4,110	-
4,084	4,117	-	4,140	4,110	-
4,077	4,114	-	4,140	4,090	-

Fonte: O Autor (2021).

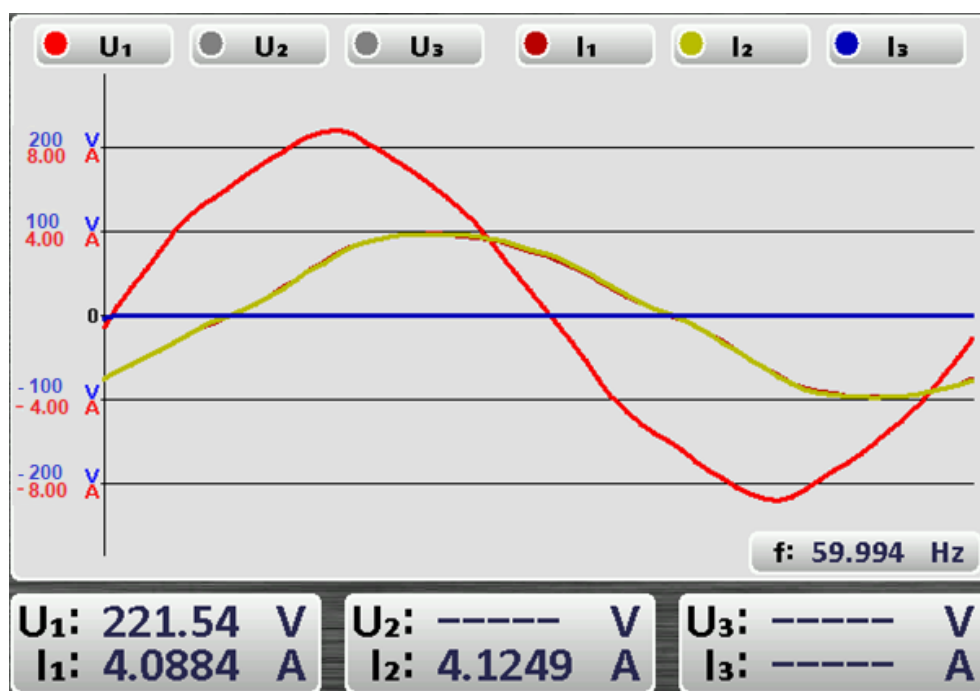
Nesse teste foi aplicado um motor de indução monofásico de 1/2 CV no ramal de carga medido em paralelo a uma carga resistiva de  $106\Omega \pm 4,0\%$ , obtendo as medições de amplitude de corrente elétrica apresentadas na Tabela 13. Logo após a execução dos testes foi realizada a medição da carga resistiva obtendo valor de  $108,70\Omega$ .

Levando em consideração apenas os valores medidos pelos transdutores do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 4,171 A e valor médio da corrente elétrica após o medidor (conjunto 2) com amplitude de 4,107 A. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,025 e do conjunto 2 é de 0,012, apresentando erro percentual médio de 0,460% e 0,200% nos conjuntos 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é zero, haja vista não ter nenhuma carga aplicada nesse ponto.

Para efeito comparativo, os valores médios de corrente elétrica lidos pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 4,086 A e no conjunto 2 de 4,122 A com desvio padrão de 0,007 e 0,006, respectivamente. O erro percentual médio para o equipamento aferidor foi de 0,122% para o conjunto 1 e de 0,119% para o conjunto 2.

Na Figura 44 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado.

Figura 44 – Formas de ondas da terceira sequência de testes com carga indutiva



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 44 é apresentado em vermelho claro a forma de onda de tensão, vermelho escuro a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal desviado, a corrente elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica medida após o medidor. Por tratar-se de carga indutiva e resistiva, destaca-se a defasagem de  $49^\circ$  da forma de onda de corrente em relação a forma de onda de tensão, resultando em um fator de potência de 0,66.

Na quarta sequência de testes com carga indutiva foi aplicado um motor de indução monofásico de 1/2 CV no ramal de carga desviado em paralelo a uma carga resistiva de  $106\Omega \pm 4,0\%$ , obtendo as medições de amplitude de corrente elétrica apresentadas na Tabela 14. Logo após a execução dos testes foi realizada a medição da carga resistiva obtendo valor de  $107,70 \Omega$ .

Tabela 14 – Medições da quarta sequência de testes com carga indutiva

EQUIPAMENTO AFERIDOR			PROJETO DESENVOLVIDO		
Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)
Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor medido (A)	Valor calculado (A)
4,078	-	4,113	4,200	-	4,200
4,072	-	4,106	4,200	-	4,200
4,083	-	4,113	4,210	-	4,210
4,083	-	4,116	4,150	-	4,150
4,082	-	4,116	4,150	-	4,150
4,078	-	4,111	4,190	-	4,190
4,073	-	4,101	4,180	-	4,180
4,070	-	4,106	4,150	-	4,150
4,071	-	4,099	4,200	-	4,200
4,071	-	4,103	4,150	-	4,150

Fonte: O Autor (2021).

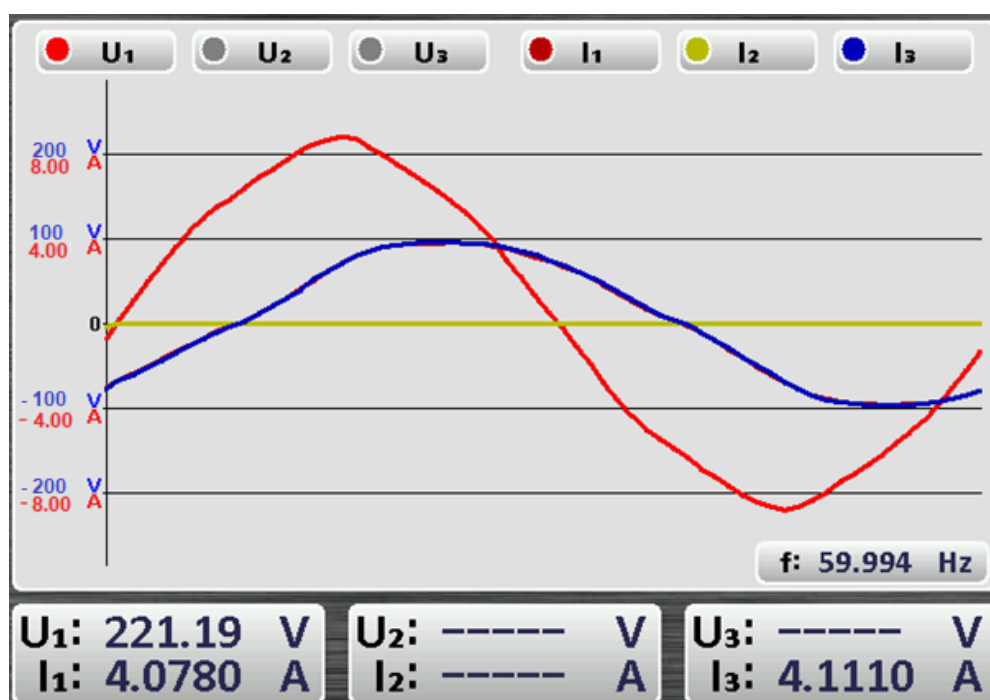
Levando em consideração apenas o valor medido pelo transdutor do projeto desenvolvido, têm-se o valor médio das leituras de corrente elétrica do ramal de ligação (conjunto 1) com amplitude de 4,178 A. Lembrando que nesse caso é zero a corrente medida no transdutor do conjunto 2, haja vista não ter nenhuma carga aplicada nesse ponto. O desvio padrão do conjunto 1 é de 0,025 e erro percentual

médio de 0,536%. Nesse caso, o valor médio calculado para a corrente elétrica da carga desviada é igual a medição do conjunto 1 (4,178 A).

Para efeito comparativo, o valor médio de corrente elétrica lido pelo equipamento aferidor no conjunto 1 foi de 4,076 A com desvio padrão de 0,005 e erro percentual médio de 0,115%. O valor médio obtido pelo equipamento aferidor na medição da corrente do ramal desviado é de 4,108 A com desvio padrão de 0,006 e erro percentual médio de 0,131%.

Na Figura 45 é apresentado a forma de onda adquirida no equipamento aferidor em um dos momentos do teste realizado, sendo em vermelho claro a forma de onda de tensão, vermelho escuro a forma de onda da corrente elétrica no ramal de ligação, em amarelo a forma de onda da corrente elétrica após o medidor e em azul a forma de onda da corrente elétrica na carga desviada.

Figura 45 – Formas de ondas da quarta sequência de testes com carga indutiva



Fonte: O Autor (2021).

Como nesse caso não há corrente elétrica no ramal medido, a corrente elétrica do ramal de ligação será igual a corrente elétrica desviada. Por tratar-se de carga indutiva e resistiva, destaca-se a defasagem de  $49^\circ$  da forma de onda de corrente em relação a forma de onda de tensão, resultando em um fator de potência de 0,66.

Para análise final dos resultados obtidos no comissionamento realizado com cargas indutivas, são apresentados na Tabela 15 as médias dos valores adquiridos

nos quatro testes realizados e apresentadas anteriormente.

Tabela 15 – Medições do projeto desenvolvido e carga indutiva aplicada

TESTE	MEDIÇÕES PROJETO DESENVOLVIDO			RESISTÊNCIA APLICADA ( $\Omega$ )		
	Corrente no Ramal de Ligação (A)	Corrente no Ramal de Carga (A)	Corrente no Ramal Desviado (A)	Carga Total no Ramal de Ligação ( $\Omega$ )	Carga Aplicada no Ramal de Carga ( $\Omega$ )	Carga Aplicada no Ramal Desviado ( $\Omega$ )
1	3,223	3,166	-	Motor	Motor	-
2	3,204	-	3,204	Motor	-	Motor
3	4,171	4,107	-	Motor e Carga Resistiva	Motor e Carga Resistiva	-
4	4,178	-	4,178	Motor e Carga Resistiva	-	Motor e Carga Resistiva

Fonte: O Autor (2021).

Vale ressaltar que as medições foram realizadas no ramal de ligação (conjunto 1) e no ramal de carga (conjunto 2), obtendo o valor do ramal desviado como a diferença dos valores entre ramal de ligação e ramal de carga medido.

Analisando as sequências de testes do comissionamento final, é possível afirmar que o produto proposto nesse projeto é eficiente para medições de cargas indutivas e resistivas, com baixo fator de potência ou fator de potência unitário, tendo em conta o transdutor aplicado ao conjunto 1 ter um erro percentual de 0,389% e o transdutor aplicado ao conjunto 2 ter um erro percentual de 0,322%.

## 4 CONCLUSÃO

Como resultado final desse trabalho acadêmico obteve-se um sistema de leitura composto por dois circuitos de condicionamento responsáveis por efetuar medições de amplitude de corrente elétrica e um sistema de controle conectado à rede local para monitoramento e fiscalização desses circuitos de medição.

O objetivo do desenvolvimento do sistema de leitura foi simular um produto para aplicação por concessionárias de distribuição de energia elétrica com a capacidade de monitorar o consumo de energia elétrica das unidades consumidores por meio da medição de corrente elétrica, contribuindo para identificação de medições com fraudes ou irregularidades visando a redução dos percentuais de perdas não técnicas de energia elétrica.

Vale ressaltar a proposta do trabalho de desenvolver solução eficiente, de fácil aplicação e com baixo custo, além de manter em utilização os medidores de energia elétrica convencionais. Com isso, buscou-se o desenvolvimento de circuitos de medição de corrente elétrica não invasivos para implementação nos sistemas já existentes das concessionárias, trazendo como custo para essas empresas apenas o desenvolvimento e aplicação desse novo produto.

Foi essencial para o sucesso do projeto a utilização de microcontroladores da plataforma Arduino que possibilitaram a integração entre os diversos componentes utilizados em cada etapa. Foi por meio desta plataforma que o projeto foi desenvolvido, entretanto até chegar a esse produto foram efetuados diversos testes individuais por etapa visando comprovar a efetividade e o funcionamento de cada parte do sistema.

O principal periférico aplicado ao projeto desenvolvido foram os transdutores de corrente elétrica. Antes da montagem final, realizaram-se testes preliminares nesses dispositivos com a aplicação de quatro diferentes combinações de cargas resistivas objetivando verificar e comprovar o bom funcionamento desses equipamentos para medição de corrente elétrica com diferentes valores de cargas aplicadas. Salienta-se que nessa etapa de testes foi utilizado um equipamento aferidor calibrado para comparação dos resultados adquiridos, validando os resultados e garantindo a possibilidade de aplicação com sucesso dos transdutores no projeto final.

Desenvolveu-se também um sistema de comunicação sem fio via radiofrequência entre os circuitos de condicionamento utilizando módulo rádio

transceptor. O principal diferencial da aplicação desse modelo de comunicação é o mesmo ser do tipo sem fio (*wireless*), pois com isso inibe a possibilidade de violação em caso de aplicação prática desse sistema. Os resultados obtidos nos testes desses dispositivos foram satisfatórios, obtendo um sistema confiável e seguro de envio de dados via radiofrequência para troca de informações.

Outro ponto de destaque entre os periféricos utilizados é a comunicação entre sistema de leitura e sistema de controle utilizando a tecnologia GSM/GPRS. A garantia de sucesso para aplicação desse periférico foi comprovada nos testes preliminares enviando e recebendo dados por meio de mensagens SMS entre dispositivos.

Realizaram-se também testes preliminares na conexão à rede local do sistema de controle com a utilização de módulo ethernet, entretanto, para uma aplicação comercial futura esse sistema deverá ser desenvolvido de maneira mais robusta e sofisticada para atender as demandas da implementação do produto em grande escala.

Para comprovar a viabilidade de aplicação da tecnologia desenvolvida, foram realizadas montagens para reprodução de instalações de entradas de energia elétrica permitindo a realização de testes com aplicação de cargas elétricas resistivas e indutivas, almejando a simulação de diversas situações possíveis em caso de aplicações práticas, levando em consideração situações normais ou fraudulentas.

No comissionamento final, primeiramente foram realizadas oito sequências de testes aplicando distintas combinações de cargas resistivas almejando variar as amplitudes de corrente elétrica no ramal de ligação (conjunto 1) e no ramal de carga (conjunto 2). Além disso, também foram aplicadas cargas resistivas no ramal desviado, pois com isso comprovou-se a eficácia do projeto para detecção de instalações irregulares. Os resultados obtidos demonstraram-se dentro do esperado, haja vista que os transdutores de corrente elétrica mantiveram a linearidade das medições para baixos e altos valores de corrente elétrica.

Constatada a eficiência do protótipo para medições com cargas resistivas, foram aplicadas cargas indutivas ao sistema para verificação de sua operação também com esse tipo de carga. Seja apenas com o motor monofásico aplicado ou nos testes com cargas resistivas em paralelo ao motor, os transdutores de corrente elétrica mantiveram seu bom funcionamento apresentando resultados com um baixo erro percentual, comprovando o funcionamento do sistema de medição desenvolvido para cargas elétricas resistivas e indutivas, com baixo fator de potência ou com fator



de potência unitário.

Vale ressaltar que no comissionamento final foi utilizado um equipamento aferidor calibrado para comparação dos resultados adquiridos, validando as medições realizadas pelos dispositivos aplicados no projeto.

Após todos os testes realizados, constatou-se a aplicabilidade do produto desenvolvido, uma vez que o transdutor aplicado ao conjunto 1 apresentou um erro médio percentual de 0,389% e o transdutor aplicado ao conjunto 2 um erro médio percentual de 0,322%. Com isso comprova-se o sucesso dos resultados adquiridos nas sequências de testes ao comparar os dados obtidos pelos transdutores em relação ao equipamento aferidor (classe de precisão 0,2%), destacando o erro percentual semelhante entre as medições do protótipo desenvolvido e do equipamento aferidor utilizado. Evidencia-se também a linearidade das medições e o baixo grau de dispersão nos testes realizadas, tendo em conta os baixos índices de desvio padrão.

Através dos diversos testes realizados na fase experimental desse trabalho afirmou-se a efetividade do sistema proposto para aplicação comercial futura, haja vista que como resultado obteve-se uma solução de fácil aplicação e com confiabilidade comprovada. Como possibilidade de adaptação desse sistema, é viável a substituição dos microcontroladores da plataforma Arduino utilizados por microcontroladores do tipo PIC, visando diminuir o custo de aplicação, tendo em conta o menor preço deste tipo de componente.

Sugere-se também como aplicação futura a implementação do sistema de medição de corrente elétrica do ramal de carga como parte integrante do medidor de energia elétrica, com isso, dificultaria a aplicação de adulterações diretamente nos equipamentos de medição.

Como perspectiva futura do trabalho, destaca-se também a implementação de sistema de leitura das tensões nos pontos de aplicação do produto. Com isso, permite a expansão dessa tecnologia para monitoramento da tensão em cada unidade consumidora proporcionando as concessionárias de distribuição de energia elétrica uma ferramenta para controle da qualidade de energia.

Em relação aos testes, na continuidade do desenvolvimento do produto, sugere-se a realização de testes com cargas do tipo não linear para comprovar o funcionamento desse produto também para esse tipo de carga.

Portanto, é possível afirmar que o trabalho acadêmico alcançou o objetivo

proposto ao desenvolver uma tecnologia viável para aplicação futura, porém o assunto do presente trabalho não se esgota aqui, mas projeta a novos estudos, almejando obter um produto final a nível comercial para aplicação em grande escala, visando contribuir com os serviços de combate ao aumento das perdas não técnicas e recuperações de receitas financeiras realizados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa N° 414**. [S. l.], 9 set. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2020.

ANEEL. **Como é composta a tarifa**. In: ANEEL (Brasil). [S. l.], 4 fev. 2016. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/conteudo-educativo/-/asset\\_publisher/vE6ahPFxsWHt/content/composicao-da-tarifa/654800](https://www.aneel.gov.br/conteudo-educativo/-/asset_publisher/vE6ahPFxsWHt/content/composicao-da-tarifa/654800)>. Acesso em: 22 out. 2020.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: 1º Trimestre 2019**. [S. l.], mar. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+de+2019/>>. Acesso em: 13 maio 2020.

ANEEL. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+2019.pdf>>. Acesso em: jan. 2021.

ASEVEDO, Francis Rocha De. **Abordagem Linear Generalizada Para Estimar Perdas Não Técnicas De Energia Elétrica**. Orientador: Reinaldo Castro Souza. 2011. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro - PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=18163@1>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CAGNON, J.A.; FONTES, I.R.; ANDREOLI, A.L.; COSTA JR., B. C.; MARTINS, L. C. **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Leitura Automática para Medição de Energia Elétrica em Unidades Consumidoras**, [S. l.], 2007.

CELESC. **Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição**: Norma Técnica N-321.0001, Santa Catarina, p. 48-48, jul. 2019. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/padrao-entrada/N3210001-Fornecimento-Energia-Eletrica-Tensao-Secundaria.pdf>>. Acesso em: 3 fev. 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. 2021. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>>. Acesso em: mar. 2021.

EXTRA. Rede de luz blindada para acabar com gatos no Rio. **Jornal Extra**, Rio de Janeiro, p. 1-1, 8 nov. 2013. Disponível em: <<https://extra.globo.com/economia/rede-de-luz-blindada-para-acabar-com-gatos-no-rio-10719249.html>>. Acesso em: 4 maio 2021.

FALCÃO, Djalma M. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid**. 2010. Simpósio Brasileiro de Sistema Elétricos., 2010. Disponível em: <[http://www.eletrica.ufpr.br/odilon/te339/artigo\\_SMART\\_GRID.PDF](http://www.eletrica.ufpr.br/odilon/te339/artigo_SMART_GRID.PDF)>. Acesso em: 12 ago. 2020.

HUBACK, Vanessa Barroso da Silva. **Medidas Ao Combate A Perdas Elétricas Não Técnicas Em Áreas Com Severas Restrições À Operação De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica**. 2018. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <[http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/12\\_huback1.pdf](http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/12_huback1.pdf)>. Acesso em: 13 abr. 2021.

PELEGRINI, Marcelo Aparecido; VALE, Zita A.. **Redes Elétricas Inteligentes: Diálogo Setorial Brasil-União Europeia (2014)**. Brasil, 10 nov. 2014. Disponível em: <[http://www.sectordialogues.org/sites/default/files/acoes/documentos/redes\\_eletricas\\_inteligentes\\_-\\_dialogo\\_setorial\\_brasil-uniao\\_europeia\\_2014.pdf](http://www.sectordialogues.org/sites/default/files/acoes/documentos/redes_eletricas_inteligentes_-_dialogo_setorial_brasil-uniao_europeia_2014.pdf)>. Acesso em: 9 set. 2020.

PEREIRA, Guilherme; WEISS, Mariana. **Redes Inteligentes: Principais Desafios Para O Caso Brasileiro**. FGV ENERGIA, dez. 2017. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/19648/Coluna%20Opinio%20Dezembro%20-%20Redes%20inteligentes%20-%20Fernanda%20e%20Guilherme.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2020.

RAMOS, Jadeilson de Santana Bezerra. **Instrumentação Eletrônica sem Fio: Transmitindo Dados com Módulos XBee ZigBee e PIC16F877A**. 1. ed. São Paulo: Érica LTDA., 2013. 238 p.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. **Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local**. dez. 2013. Disponível em: <<http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/rivera1.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

VELASCO, Loana Nunes. **Análise Experimental de Erros de Medição de Energia Elétrica Ativa em Medidores Eletromagnéticos tipo Indução, Sujeitos a Distorções Harmônicas de Correntes e Tensões, em Sistemas Equilibrados e Desequilibrados**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - UNESP – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira – SP, 2007. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87277/velasco\\_In\\_me\\_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87277/velasco_In_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 22 fev. 2021.

## ANEXOS

### A1 – Resultados obtidos em sequências de testes iniciais

#### A1.1 Teste 1 dos transdutores

EQUIPAMENTO AFERIDOR		PROJETO DESENVOLVIDO	
Corrente no Aferidor 1 (A)	Corrente no Aferidor 2 (A)	Corrente no Transdutor 1 (A)	Corrente no Transdutor 2 (A)
2,117	2,115	2,140	2,050
2,116	2,115	2,140	2,050
2,117	2,116	2,150	2,040
2,115	2,113	2,150	2,020
2,112	2,111	2,130	2,040
2,112	2,110	2,130	2,050
2,113	2,112	2,160	2,010
2,111	2,110	2,140	2,030
2,112	2,109	2,140	2,030
2,113	2,111	2,160	2,020

Fonte: O Autor (2021).

#### A1.2 Teste 2 dos transdutores

EQUIPAMENTO AFERIDOR		PROJETO DESENVOLVIDO	
Corrente no Aferidor 1 (A)	Corrente no Aferidor 2 (A)	Corrente no Transdutor 1 (A)	Corrente no Transdutor 2 (A)
4,143	4,143	4,250	4,120
4,142	4,145	4,250	4,150
4,141	4,143	4,270	4,130
4,147	4,149	4,230	4,130
4,152	4,154	4,250	4,130
4,151	4,152	4,250	4,140
4,154	4,156	4,280	4,110
4,151	4,151	4,250	4,120
4,153	4,153	4,250	4,110
4,152	4,154	4,260	4,110

Fonte: O Autor (2021).

### A1.3 Teste 3 dos transdutores

EQUIPAMENTO AFERIDOR		PROJETO DESENVOLVIDO	
Corrente no Aferidor 1 (A)	Corrente no Aferidor 2 (A)	Corrente no Transdutor 1 (A)	Corrente no Transdutor 2 (A)
6,119	6,122	6,290	6,140
6,125	6,128	6,210	6,160
6,129	6,131	6,260	6,170
6,131	6,134	6,250	6,170
6,129	6,131	6,290	6,170
6,142	6,146	6,270	6,150
6,142	6,145	6,290	6,190
6,143	6,142	6,320	6,170
6,136	6,140	6,230	6,160
6,134	6,137	6,310	6,170

Fonte: O Autor (2021).

### A1.4 Teste 4 dos transdutores

EQUIPAMENTO AFERIDOR		PROJETO DESENVOLVIDO	
Corrente no Aferidor 1 (A)	Corrente no Aferidor 2 (A)	Corrente no Transdutor 1 (A)	Corrente no Transdutor 2 (A)
8,214	8,218	8,290	8,170
8,213	8,221	8,290	8,170
8,218	8,223	8,260	8,130
8,223	8,222	8,220	8,160
8,223	8,234	8,350	8,140
8,233	8,253	8,300	8,180
8,257	8,262	8,340	8,230
8,246	8,251	8,310	8,170
8,242	8,250	8,350	8,180
8,245	8,256	8,330	8,160

Fonte: O Autor (2021).

## A2 – Custos do sistema desenvolvido

### A2.1 Custos de aplicação total do sistema de leitura

Dispositivo	Qtde.	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Microcontrolador Arduino Uno	2	35,00	70,00
Módulo Transceptor nRF24L01	2	10,00	20,00
Transdutor de Corrente Elétrica SCT-013-020	2	45,00	90,00
Módulo GSM/GPRS SIM800L	1	50,00	50,00
Módulo regulador de tensão LM317 DC-DC Step Down	1	10,00	10,00
Fonte chaveada 5V/2A	1	20,00	20,00
Demais componentes elétricos	-	5,00	5,00
<b>Valor total</b>	-	-	<b>265,00</b>

Fonte: O Autor (2021).

### A2.1 Custos de aplicação total do sistema de controle

Dispositivo	Qtde.	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Microcontrolador Arduino Uno	2	35,00	70,00
Módulo Ethernet ENC28J60	1	25,00	25,00
Módulo GSM/GPRS SIM800L	1	50,00	50,00
Módulo regulador de tensão LM317 DC-DC Step Down	1	10,00	10,00
Fonte chaveada 5V/2A	1	20,00	20,00
Demais componentes elétricos	-	5,00	5,00
<b>Valor total</b>	-	-	<b>180,00</b>

Fonte: O Autor (2021).